

Geosys

**Systemanalyse
der geothermalen
Energieerzeugung**

Teil B

**Ausführliche
Ergebnisdokumentation**



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH

GeoSys

**Systemanalyse
der geothermalen
Energieerzeugung**

Teil B

Ausführliche
Ergebnisdokumentation

Thomas Brassler
Rémi Cannepin
Sebastian Feige
Gerd Frieling
Horst-Jürgen Herbert
Christoffer Heinen
Christian Strack
Christoph Vieten

Juni 2014

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde-
liegenden Arbeiten wurden im
Auftrag des Bundesministeri-
ums für Wirtschaft und Energie
(BMWi) im Rahmen des Vorha-
bens mit dem Förderkennzeichen
0325235 erstellt.

Die Arbeiten wurden von der
Gesellschaft für Anlagen- und
Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt
dieser Veröffentlichung liegt bei
den Autoren.

GRS - 316 (Teil B)
ISBN 978-3-939355-95-3

Deskriptoren

Geothermales Reservoir, Geothermie, Recht, Schutzgut, Systemanalyse, Technische Anlage, Umwelt

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Vorwort | 1 |
| 2 | Einführung | 3 |
| 2.1 | Fragestellung und Ziele | 4 |
| 2.2 | Gegenstand der Untersuchung | 5 |
| 2.3 | Verfahren zur Wärmenutzung | 7 |
| 2.4 | Geothermie in Deutschland | 10 |
| 2.4.1 | Geothermie-Regionen und geothermische Potenziale | 10 |
| 2.4.2 | Anlagen zur tiefen geothermalen Energieerzeugung | 11 |
| 2.4.3 | Wirtschaftliche Aspekte..... | 15 |
| 3 | Erschließung einer tiefen geothermischen Lagerstätte | 21 |
| 3.1 | Einführung | 21 |
| 3.2 | Bohrtechnik..... | 22 |
| 3.2.1 | Bohrverfahren..... | 23 |
| 3.2.2 | Bohrplatz | 25 |
| 3.2.3 | Bohrspülung | 31 |
| 3.2.4 | Bohrloch-Logging..... | 39 |
| 3.2.5 | Bohrrisiken..... | 39 |
| 3.2.6 | Unterschiede bei Bohrungen der E&P-Industrie und der Geothermie | 42 |
| 3.3 | Stimulationsmaßnahmen | 44 |
| 3.3.1 | Einführung | 44 |
| 3.3.2 | Hydraulische Stimulation | 47 |
| 3.3.3 | Chemische Stimulation | 54 |
| 3.3.4 | Projektbeispiele | 56 |
| 3.3.5 | Vergleich Stimulationsverfahren in der E&P-Industrie und Geothermie.... | 63 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.4 | Lagerstättenwasser und Flowback..... | 66 |
| 3.5 | Bohrlochausbau..... | 69 |
| 3.5.1 | Verrohrung..... | 69 |
| 3.5.2 | Zementierung | 75 |
| 4 | Geothermische Reservoirs | 81 |
| 4.1 | Einleitung..... | 81 |
| 4.2 | Charakteristika geothermaler Reservoirs | 82 |
| 4.2.1 | Relevante Prozesse..... | 82 |
| 4.2.2 | Wechselwirkungen zwischen Prozessen | 94 |
| 4.3 | Möglichkeiten und Grenzen der Reservoirmodellierung | 95 |
| 4.3.1 | Hydraulische Prozesse | 96 |
| 4.3.2 | Thermische Prozesse | 97 |
| 4.3.3 | Chemische Prozesse..... | 97 |
| 4.3.4 | Mechanische Prozesse..... | 100 |
| 4.3.5 | Vergleich von Rechencodes für die Modellierung des Reaktiven Stofftransport | 100 |
| 4.4 | Geothermie-Regionen Deutschlands – ein Vergleich..... | 104 |
| 4.4.1 | Das Norddeutsche Becken | 105 |
| 4.4.2 | Der Oberrheingraben..... | 114 |
| 4.4.3 | Das Süddeutsche Molassebecken..... | 124 |
| 4.5 | Modellierung einzelner Aspekte der Tiefengeothermie | 131 |
| 5 | Anlagenbetrieb..... | 137 |
| 5.1 | Kraftwerkstechnologien..... | 137 |
| 5.1.1 | Organic Rankine Cycle (ORC)..... | 138 |
| 5.1.2 | Kalina | 138 |
| 5.1.3 | Kreisläufe in Geothermieranlagen (primär / sekundär / tertiär) | 139 |
| 5.2 | Kenngrößen einer Anlage | 146 |
| 5.2.1 | Flächenbedarf..... | 147 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.2.2 | Druck in der Anlage, Durchfluss, Temperatur vor / hinter WT | 147 |
| 5.2.3 | Elektrische Brutto- und Nettoleistung | 148 |
| 5.3 | Wesentliche Kraftwerkskomponenten | 148 |
| 5.3.1 | Förderpumpen | 148 |
| 5.3.2 | Separatoren..... | 150 |
| 5.3.3 | Filtereinheiten | 151 |
| 5.3.4 | Wärmeübertrager..... | 151 |
| 5.3.5 | Turbine und Generator..... | 152 |
| 5.3.6 | Kühlanlagen..... | 152 |
| 5.3.7 | Reinjektionspumpen | 153 |
| 5.3.8 | Druckhaltung | 153 |
| 5.4 | Betriebsmittel..... | 153 |
| 5.4.1 | Sekundärseitiges Betriebsmittel | 153 |
| 5.4.2 | Inhibitoren..... | 154 |
| 5.4.3 | Weitere Betriebsmittel..... | 154 |
| 5.5 | Betriebserfahrungen | 155 |
| 5.5.1 | Korrosion und Abrasion | 156 |
| 5.5.2 | Mechanische Belastungen..... | 161 |
| 5.5.3 | Thermische und sonstige Belastungen | 161 |
| 5.5.4 | Verringerung des Wirkungsgrades der Wärmetauscher..... | 162 |
| 5.5.5 | Sonstige Fehlerursachen | 162 |
| 5.5.6 | Scaling..... | 162 |
| 5.5.7 | Umgang mit Abwässern und Lagerstättenwasser | 166 |
| 5.5.8 | Störungen und Folgen | 167 |
| 5.6 | Seismische Ereignisse bei Erkundung und Betrieb | 172 |
| 5.6.1 | Aufgabenstellung | 172 |
| 5.6.2 | Vorbemerkung | 172 |
| 5.6.3 | Natürliche Seismizität | 173 |
| 5.6.4 | Induzierte Seismizität..... | 175 |
| 5.6.5 | Fallbeispiele..... | 190 |
| 5.6.6 | Relevante Projekte | 223 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.6.7 | Risikobewertung für zukünftige Projekte, Empfehlungen | 229 |
| 5.6.8 | Zusammenfassung Seismik..... | 236 |
| 6 | Rechtliche Rahmenbedingungen | 243 |
| 6.1 | Einleitung..... | 243 |
| 6.1.1 | Allgemeines | 243 |
| 6.1.2 | Potentielle Umwelt- und Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit Anlagen der Tiefengeothermie..... | 244 |
| 6.1.3 | Aktuelle Entwicklungen mit Bezug zur Geothermie in den Länderparlamenten..... | 246 |
| 6.1.4 | Zielsetzung, Gegenstand der Untersuchung und Vorgehensweise | 253 |
| 6.2 | Rechtsrahmen für die Planung, die Errichtung und den Betrieb einer Geothermieanlage | 255 |
| 6.2.1 | Informationsrechte, Öffentlichkeitsbeteiligung und Verbandsklagemöglichkeiten | 255 |
| 6.2.2 | Planungsrecht..... | 289 |
| 6.2.3 | Allgemeines zum Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Nutzung der Tiefengeothermie | 329 |
| 6.2.4 | Exkurs: Verhältnis untergesetzlicher Normen/Regelwerke zu unbestimmten Rechtsbegriffen | 337 |
| 6.2.5 | Bergrecht..... | 343 |
| 6.2.6 | Bodenschutzrecht..... | 373 |
| 6.2.7 | Wasserrecht | 377 |
| 6.2.8 | Immissionsschutzrecht..... | 406 |
| 6.2.9 | Anlagensicherheitsrecht (übertägiger Anlagenteil)..... | 413 |
| 6.2.10 | Strahlenschutzrecht | 422 |
| 6.2.11 | Sonstige Regelungen im Bereich Arbeits- und Gesundheitsschutz..... | 431 |
| 6.2.12 | Abfallrecht..... | 439 |
| 6.2.13 | Haftungsrechtliche Aspekte | 456 |
| 6.3 | Energiewirtschaftsrechtliche und umweltpolitische Förderprogramme ... | 483 |
| 6.3.1 | Marktanreizprogramm..... | 484 |
| 6.3.2 | Forschungsförderung durch den Bund..... | 487 |
| 6.3.3 | Förderprogramme der Länder..... | 489 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 6.4 | Vergabe- und kommunalrechtliche Aspekte..... | 496 |
| 6.4.1 | Allgemeines | 496 |
| 6.4.2 | Projektträgerschaft..... | 497 |
| 6.4.3 | Bewertung des Auftrags..... | 506 |
| 6.4.4 | Umweltschutz im Vergaberecht | 509 |
| 6.4.5 | Rechtsschutzmöglichkeiten nach §§ 102 ff. GWB..... | 510 |
| 6.4.6 | Anschluss- und Benutzungszwang für Fernwärmeversorgungsanlagen | 511 |
| 6.4.7 | Vergabe von Konzessionen bei Geothermie-Projekten..... | 513 |
| 6.4.8 | Zwischenergebnis..... | 515 |
| 6.5 | Gesamtergebnis | 516 |
| 7 | Einwirkungen von Wirkfaktoren auf Schutzgüter im Lebensweg einer Geothermieanlage | 517 |
| 7.1 | Projektphasen..... | 517 |
| 7.2 | Schutzgüter | 518 |
| 7.3 | Wirkfaktoren | 522 |
| 7.3.1 | Wirkmatrix..... | 524 |
| 7.3.2 | Wechselwirkungen..... | 530 |
| 7.3.3 | Konzept für die Bewertung der Wirkfaktoren..... | 531 |
| 7.4 | Transportpfade für Schadstoffe..... | 533 |
| 7.4.1 | Pfad 0: Oberflächlicher Schadstoffeintrag | 535 |
| 7.4.2 | Pfad 1: Fließpfade entlang von Bohrungen | 536 |
| 7.4.3 | Pfad 2: Fließpfade von Fluiden entlang von Störungen..... | 550 |
| 7.4.4 | Pfad 3: Ausbreitung von Schadstoffen in Aquiferen | 554 |
| 7.5 | Einwirkungen der Wirkfaktoren auf Schutzgüter | 555 |
| 7.5.1 | Ökologische Einflüsse | 555 |
| 7.5.2 | Emissionen und Immissionen | 569 |
| 7.5.3 | Funktionsverluste..... | 591 |
| 7.5.4 | Geomechanische und hydraulische Einflüsse..... | 596 |
| 7.5.5 | Thermische Einflüsse | 607 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 8 | Risikoanalyse..... | 615 |
| 8.1 | Beispielhafte PSA..... | 623 |
| 8.2 | Fazit..... | 656 |
| 9 | Wissenschaftlich-technische Ergebnisse..... | 659 |
| 9.1 | Kompartiment „Recht“..... | 659 |
| 9.2 | Kompartiment „Geothermales Reservoir“..... | 665 |
| 9.2.1 | Physikalische Prozesse – seismische Ereignisse | 666 |
| 9.2.2 | Chemische Prozesse und reaktiver Stofftransport | 669 |
| 9.3 | Kompartiment „Technische Anlage“ | 674 |
| 9.4 | Kompartiment „Umwelt 1“ (oberirdischer Anlagenbereich)..... | 676 |
| 9.4.1 | Konkrete Fragestellungen NORM & Geothermie | 676 |
| 9.5 | Kompartiment „Umwelt 2“ (unterirdischer Anlagenbereich)..... | 685 |
| 9.5.1 | Bohrablauf und -technik..... | 686 |
| 9.5.2 | Werkstoffe | 687 |
| 9.5.3 | Auswirkungen bei der Stimulation geothermaler Lagerstätten | 688 |
| 9.5.4 | Schadstoffemissionen und -immissionen | 689 |
| 9.5.5 | Auswirkungen hydro-geomechanischer Prozesse..... | 692 |
| 9.5.6 | Thermische Auswirkungen..... | 693 |
| 9.5.7 | Funktionsverluste (Wasser und Boden) | 694 |
| 9.5.8 | Erfolgte und derzeitige Forschungsarbeiten, möglicher Forschungsbedarf..... | 694 |
| 10 | Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 699 |
| 10.1 | Allgemeines | 699 |
| 10.2 | Kompartiment “Recht“ | 700 |
| 10.3 | Kompartiment “Geothermales Reservoir“ | 705 |
| 10.4 | Kompartiment “Technische Anlage“ | 708 |
| 10.5 | Kompartiment “Umwelt“ | 709 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 11 | Literaturverzeichnis..... | 717 |
| 11.1 | Verzeichnis der im naturwissenschaftlich-technischen Bereich zitierten Literatur | 717 |
| 11.2 | Verzeichnis der im Kompartiment Recht zitierten Literatur | 760 |
| 12 | Glossar | 769 |
| 13 | Abbildungsverzeichnis..... | 793 |
| 14 | Tabellenverzeichnis..... | 801 |
| 15 | Anhänge | 805 |
| 15.1 | Stoffbeschreibung Erschließungsphase | 805 |
| 15.1.1 | Einführung | 805 |
| 15.1.2 | Stoffbeschreibung für die Erschließungsphase | 807 |
| 15.1.3 | Beschreibung der Stoffgruppen | 810 |
| 15.2 | Modellierung geochemischer Prozesse | 823 |

1 Vorwort

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie¹ (BMWi) geförderte Vorhaben 0325235 „Systemanalyse der geothermalen Energieerzeugung“ (Kurztitel: GeoSys) bezieht sich auf die „Bekanntmachung über die Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich erneuerbare Energien“ (amtlicher Teil des Bundesanzeigers Nummer 186 vom Freitag, 5. Dezember 2008, Seite 4352 ff.), insbesondere auf den Abschnitt 2.4 „Geothermie“ und dessen Teil-Thema „Entwicklung von Methoden, Verfahren und Entscheidungshilfen, die zur Vorbereitung dienen und im Zuge der Exploration das Fündigkeits- und Erfolgsrisiko vermindern“. Im Vorhaben wurden mittels einer interdisziplinären Systemanalyse der Entwicklungsstand und die Fortschritte der Tiefengeothermie in Deutschland aufgezeigt sowie aus Sicht der GRS bestehender Handlungsbedarf identifiziert. Die Studie stellt einen Beitrag zur Verbesserung der mittelfristigen Verfügbarkeit und der Effizienz der in Deutschland betriebenen Tiefengeothermie-Anlagen dar. Sie soll dazu führen, die Produktivität und Akzeptanz geothermaler Anlagen zu steigern. Dazu wurden die technischen und ökologischen Aspekte sowie die zu betrachtenden Schutzgüter, Prozesse und Wirkfaktoren identifiziert sowie verfügbare Daten analysiert und dokumentiert. Hierauf aufbauend wurden anhand konkret identifizierter Phänomene im Anlagenbetrieb Modellrechnungen und probabilistische Analysen durchgeführt, die sowohl die Untersuchung möglicher Anlagenzustände als auch deren potenzielle Auswirkungen beinhalten. Die Arbeiten wurden von einer systematischen Untersuchung des Rechtsrahmens begleitet.

Als Systemanalyse berücksichtigt das Vorhaben gleichermaßen Planungs- und Explorationsphase, Errichtungsphase, Test- und Betriebsphase sowie den Rückbau einer Anlage der Tiefengeothermie zur Strom- und Wärmeerzeugung. Die Systemanalyse zeigt Wirkungszusammenhänge und Handlungsbedarf auf und liefert neue Ansätze und Entscheidungshilfen zum Umgang mit identifizierten Problemen.

Die vorliegende ausführliche Ergebnisdokumentation stellt alle wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens in ausführlicher Form vor und gibt die Erfah-

¹ Bei Vorhabensbeginn lag die Zuständigkeit beim damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (heute: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, BMUB)

rungen wider, die in den Arbeitspaketen aus den Kompartimenten „Recht“, „Geothermales Reservoir“, „Technische Anlage“ und „Umwelt“ gewonnen wurden.

Im getrennt erstellten Schlussbericht (GRS-316) werden die gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen in komprimierter Form dargestellt.

2 Einführung

Moderne Strom- und Wärmekraftwerke wie auch sonstige Industrieanlagen sind Ausdruck des technischen Fortschritts. Aufgrund gefährlicher Stoffe, technischer Vorgänge oder Zustände können sie aber auch ein Gefahrenpotenzial darstellen. Insofern können auch die erneuerbaren Energien mit anderen Rechtsgütern wie z. B. dem Natur- und Denkmalschutz in Konflikt geraten. Genehmigungen für Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien sind Gegenstand gerichtlicher Auseinandersetzungen. Dies beeinträchtigt insbesondere die Planungssicherheit der entsprechenden Vorhabensträger. Nutzungskonkurrenzen zu anderen Anlagen und Tätigkeiten am (geplanten) Standort eines Geothermiekraftwerks sind nicht ausgeschlossen.

Es gilt daher, Umwelteinwirkungen zu untersuchen, um ökologische Binnenkonflikte soweit wie möglich zu vermeiden und einen Beitrag für eine sachliche Diskussion der Energieversorgung durch Geothermiekraftwerke zu leisten. Für einen sach- und zielgerechten Ausbau der Geothermie sind - wie bei anderen bergbaulichen Tätigkeiten - dabei zuvorderst umfassende Kenntnisse über den geologischen Aufbau des Untergrundes entscheidend. Im zweiten Schritt kommt es dann auf die eingesetzte Technik, die verwendeten Materialien und Stoffe sowie die jeweilige Schadensvorsorge an, um potentielle Umwelt- und Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit Anlagen der Tiefengeothermie entsprechend beurteilen zu können.

Erklärtes Ziel der Förderinitiativen zum Ausbau erneuerbarer Energien ist die Umsetzung nachhaltiger und umweltfreundlicher Konzepte, um im Rahmen der geltenden energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Zielstellungen und Rahmenbedingungen in Deutschland einen Beitrag zur Umgestaltung der Energieversorgung zu leisten.

In diesem Zusammenhang war es Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen, die in der wissenschaftlichen Literatur und parlamentarischen Vorgängen erörterten Probleme, Hemmnisse und Vorgaben für die Genehmigung von Anlagen zur Nutzung der Tiefengeothermie, aber auch die in öffentlichen Diskussionen z. B. von Bürgerinitiativen benannten potentiellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken sachlich und ergebnisoffen zu analysieren. Im vorliegenden Projekt lag dabei der Schwerpunkt auf einer allgemeinen, generischen Analyse der Tiefengeothermie. Für spezifische Aussagen über konkrete Anlage wären weitergehende Analysen des jeweiligen geologischen Aufbaus des Untergrundes, der eingesetzten Technik, der verwendeten Materialien und Stoffe

sowie der jeweiligen Schadensvorsorge am betreffenden Anlagenstandort erforderlich gewesen.

2.1 Fragestellung und Ziele

Durch eine interdisziplinäre Systemanalyse der tiefen geothermalen Energiegewinnung werden in dieser Studie der Stand von Wissenschaft und Technik, sowie ein etwaiger Handlungs- und Forschungsbedarf aufgezeigt, mit dem Ziel, mittelfristig die Integrität, Verfügbarkeit, Effizienz und Akzeptanz geothermaler Anlagen zu steigern. Dazu werden die technischen und ökologischen Aspekte sowie die zu betrachtenden Schutzgüter, Prozesse und Wirkfaktoren beschrieben, verfügbare Daten analysiert und dokumentiert. Hierauf aufbauend werden anhand konkret identifizierter Wirkfaktoren in den verschiedenen Phasen eines Geothermie-Projektes Modellrechnungen und probabilistische Analysen durchgeführt, die sowohl die Untersuchung möglicher Anlagenzustände als auch deren potenzielle Auswirkungen beinhalten. Die Arbeiten werden begleitet von einer systematischen Untersuchung des Rechtsrahmens.

Auf den Menschen als Bestandteil des Ökosystems wirken Umweltauswirkungen mittelbar oder unmittelbar ein. Darüber hinaus resultieren seine Handlungen in teils erheblichen Auswirkungen auf seine Umwelt. Zur Beurteilung von Wirkfaktoren im Zusammenhang mit menschlichen Aktivitäten müssen physische Beeinträchtigungen (Gefährdung der Gesundheit durch z. B. stoffliche Emissionen), ästhetisches Empfinden (Beeinträchtigung durch Veränderung des Landschaftsbildes, Sichtbarkeit), Akzeptanz und ethische Wertvorstellungen bewertet werden. Im Rahmen des Vorhabens wird ganz wesentlich das Schutzgut „**menschliche Gesundheit**“ betrachtet.

Die konkreten wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele des Vorhabens sind:

- Identifikation von Schutzgütern, Prozessen und Wirkfaktoren.
- Dokumentation von Werkzeugen und Daten für deren Analyse, Evaluation der eingesetzten Technologien, Methoden und Stoffe zur Nutzung geothermaler Ressourcen unter Berücksichtigung der identifizierten Schutzgüter, Prozesse und Wirkfaktoren.

- Durchführung einer quantitativen, probabilistischen Unsicherheitsanalyse für die geothermale Energieerzeugung: Exemplarische Anwendung entsprechender Werkzeuge für eine probabilistische Unsicherheitsanalyse im Zusammenhang mit der Abschätzung von Strahlenexpositionen von Beschäftigten.
- Bewertung weiterer wichtiger Wirkfaktoren auf Basis von Literaturrecherche und Expert judgement.
- Analyse des derzeit geltenden Rechtsrahmens mit Bezug auf die Nutzung der Tiefengeothermie.
- Identifikation länderspezifischer Unterschiede sowie potentieller Regelungsdefizite/-überschüsse unter Berücksichtigung der Erforderlichkeit, der Verhältnismäßigkeit und des Ziels der Vereinfachung des Verwaltungsverfahrens.

2.2 Gegenstand der Untersuchung

Die hier vorgestellte Studie bezieht sich ausschließlich auf Anlagen der Tiefengeothermie. Dies sind Anlagen, die Bohrungen mit einer Teufe > 400 m verwenden. Zudem werden nur „offene“ Thermalkreisläufe berücksichtigt. Die gegenwärtig in Deutschland in Betrieb befindlichen Geothermiekraftwerke nutzen ausschließlich hydrothermale Lagerstätten. In der Zukunft soll die Nutzung petrothermaler Lagerstätten ausgebaut werden. Beide geothermischen Potenziale werden in der Systemanalyse berücksichtigt.

Die Nutzung tiefer geothermischer Energie kann durch verschiedene Anlagenkonzepte realisiert werden, die sich insbesondere in der Ausführung des oberirdischen Teils der Anlage unterscheiden. Anhand von bereits gebauten, geplanten oder sich noch in der Entwicklung befindlichen Anlagen und Anlagenkonzepten werden die typischen verfahrenstechnischen Prozesse und zugrunde gelegte Auslegungsprinzipien geothermischer Anlagen dargelegt.

Festlegungen zum Untersuchungsobjekt

Untersuchungsobjekte sind „Anlagen zur Stromerzeugung“ mittels Tiefengeothermie (Geothermiekraftwerke). Hierzu werden bestehende Kraftwerkstypen zur Stromerzeugung betrachtet. In Deutschland sind Geothermiekraftwerke des ORC- und Kalinatyps in Betrieb. Die Auskopplung von Fernwärme in diesen Kraftwerkstypen ist möglich und

wird auch in Deutschland praktiziert. Die Auskopplung von Fernwärme wird jedoch in diesem Bericht nicht näher beleuchtet. Allgemein betrachtet verbessert die zusätzliche Auskopplung von Fernwärme die Wirtschaftlichkeit der Anlagen.

Festlegungen zum Untersuchungsraum

Betrachtet werden Geothermieranlagen in den drei deutschen Geothermieprovinzen Norddeutsches Becken, Oberrheingraben und Molassebecken.

Festlegungen zum Untersuchungszeitraum (Lebenszyklus der Anlage)

Betrachtet wird der gesamte Lebenszyklus einer Geothermieranlage von der Erkundung über die Erstellung der Bohrungen, den Betrieb der Anlage, die Stilllegung bis einschließlich der Zeit nach der Stilllegung.

Die Tätigkeit der GRS ist geprägt durch eine enge Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen, die ihr Wissen zu einer integralen Aussage zusammenführen. Die langjährigen Erfahrungen von Mitarbeitern der GRS in der Systemanalyse, in der Computersimulation sowie die enge Verbindung zwischen wissenschaftlicher, konzeptioneller und praktischer Tätigkeit begründet die fachliche Kompetenz der GRS.

- GeoSys Library

Im Rahmen des Vorhabens erschlossene Literatur wurde in einer Access-basierten Literatur-Datenbank gepflegt und bibliographisch aufbereitet.

- GeoSys Infopool

Liegt in einer Literaturstelle ein relevanter Sachverhalt vor, sollte dieser im GeoSys-InfoPool dokumentiert und allen Projektmitarbeitern zur Verfügung gestellt werden. Ein wichtiges Werkzeug für die Arbeit im Projekt war daher der GeoSys-InfoPool. Er dient zur Sammlung und Systematisierung von Informationen (Sachverhalte, Messwerte) zum Vorhaben. Er sicherte die permanente Verknüpfung eines Sachverhaltes mit der entsprechenden Literaturstelle.

- Rechenprogramme für die geochemische Modellierung (EQ3/6, ChemApp, PHREEQC)

Eine Vielzahl von Codes und Rechenmodellen werden in der GRS für vielfältige Anwendungsfelder entwickelt, weiterentwickelt und betrieben. Zahlreiche Codes

sind geeignet, auch Fragestellungen außerhalb des klassischen nuklearen Geschäftsfeldes der GRS zu beantworten. Simulationen liefern über die Messtechnik hinausgehende Darstellungen von Prozessen und Erkenntnisse. Mögliche Beiträge leisten GRS-Codes bei probabilistischen Analysen zum Ausfall von technischen Komponenten, Testrechnungen, die den Betrieb von Anlagen optimieren, strukturelle Analysen von Bauteilen oder der Modellierung von Bewegungen von Medien und Stoffen in Modellgebieten.

- Rechenprogramm für probabilistische Analyse (EVNTRE)

Die Simulation und die Validierung von verwendeten Modellen sind Kernelemente der Bewertung der Sicherheit technischer Anlagen. Die GRS legt dabei hohe Schutzziele an und führt probabilistische Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen zur Beurteilung von Abläufen durch. Damit sind Ausfallwahrscheinlichkeiten oder Barrierewirksamkeiten auch im nicht-nuklearen Bereich zuverlässig zu prognostizieren.

2.3 Verfahren zur Wärmenutzung

Für die Wärmegewinnung aus dem tiefen und flachen Untergrund stehen viele Verfahren zur Auswahl (Abb. 2.1). Im GeoSys-Projekt werden nur tiefe und offene Verfahren zur geothermalen Wärmegewinnung betrachtet. Es gibt keine einheitliche Konvention, ab welcher Tiefe eine Bohrung als „tief“ und bis zur welcher Tiefe eine Bohrung als „oberflächennah“ gilt. In /STO 11/ wird die Grenze bei einer Bohrungstiefe von > 400 m unter der Geländeoberfläche gezogen. In Deutschland liegen in den wirtschaftlich erschließbaren Teufenbereichen ausschließlich Niedrigenthalpie-Lagerstätten vor. Deshalb wurde der Fokus des GeoSys-Projektes auf Lagerstätten tiefer als 400 m gelegt. Es werden sowohl Anlagen der geothermalen Stromerzeugung als auch Anlagen zur Wärmeversorgung (Kraft-Wärmekopplung) betrachtet. In Deutschland sind häufig binäre Anlagentypen realisiert, die beide Verfahren anwenden, um die Wirtschaftlichkeit der Anlagen zu erhöhen.

Für die Tiefengeothermie gibt es zwei grundlegende Verfahren zur geothermalen Energiegewinnung. Zum einen kann die Wärmeenergie direkt aus dem Thermalwasser hydrothermalen Lagerstätten entzogen werden (hydrothermale Geothermie), und zum anderen können Gesteine erschlossen werden, deren Temperatur hoch genug ist, um

Wasser, das hinuntergepumpt wird, auf wirtschaftlich nutzbare Temperaturen zu erhitzen (petrothermale Geothermie).

Hydrothermale Systeme sind porös-klüftige Aquifere (Grundwasserleiter), in denen Thermalwasser mit einer wirtschaftlichen Temperatur zirkuliert. Mit Hilfe einer Bohrungsdublette wird das Thermalwasser über eine Förderbohrung der Lagerstätte entzogen und durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund verpresst. Das heiße Wasser kann zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen genutzt werden. Ab ca. 100 °C ist eine Verstromung möglich.

Petrothermale Systeme gewinnen die Wärme aus heißen Gesteinen im Untergrund. Hierbei wird Wasser in klüftig-poröse Gesteinsschichten verpresst und durch eine zweite Bohrung wieder an die Oberfläche gefördert. Durch den Fluss des Wassers zwischen den Bohrungen und den Kontakt mit dem Gestein erwärmt sich das Wasser. Das Gestein wird praktisch als Wärmetauscher verwendet und die im Gestein gespeicherte Energie entzogen. Dieses Verfahren wird Hot-Dry-Rock (HDR) genannt. In Geothermie-Projekten wie z. B. in Soultz-sous-Forêts sind die Gesteine sogar bis in einer Tiefe von 5 km mit Wasser gesättigt, es musste also kein weiteres Wasser mehr zum Anlagenbetrieb in den Untergrund eingebracht werden. In dem tiefsten, bislang abgeteufte Bohrloch, der supertiefen Kola-Bohrung, wurde Schwerkraft beeinflusstes Wasser bis in 9 km Tiefe festgestellt /KOZ 86/. Somit hatte sich der Begriff Hot „dry“ rock bislang nicht bestätigt. Deshalb ist man zu den Bezeichnungen Hot Wet Rock (HWR) bzw. Hot Fractured Rock-Systemen (HFR) übergegangen. Der umfassende Begriff ist Enhanced Geothermal Systems (EGS), welcher die zunächst erforderliche Stimulation des Reservoirs durch Wasser-Frac als gemeinsames Merkmal der umschriebenen Anlagen berücksichtigt.

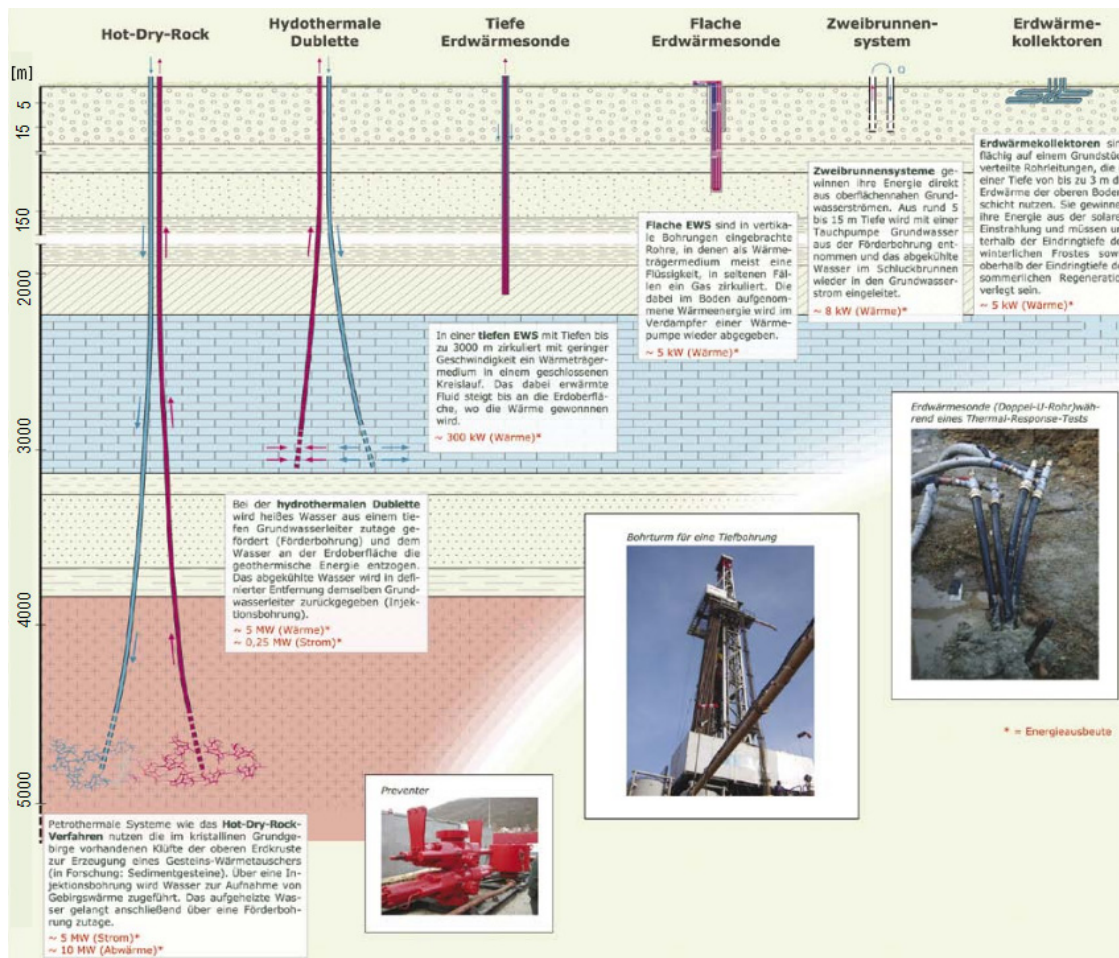


Abb. 2.1 Beispiele für unterschiedliche Nutzungen der geothermischen Energie /STO 11/

Eine dritte Möglichkeit der Nutzung von Wärme aus der Tiefengeothermie sind tiefe Erdwärmesonden (Abb. 2.1). Sie entziehen die Wärmeenergie aus einer beliebigen Gesteinsabfolge mittels eines Wärmeträgermediums, das in einem geschlossenen Kreislauf in einer Sonde zirkuliert. Dieses Verfahren ist nur zur Wärmeversorgung und nicht zur Stromerzeugung geeignet und wird hier nicht weiter betrachtet.

2.4 Geothermie in Deutschland

2.4.1 Geothermie-Regionen und geothermische Potenziale

In Deutschland gibt es drei für die Erzeugung geothermischer Energie geeignete Regionen (Abb.):

- das Norddeutsche Becken
- der Oberrheingraben
- das süddeutsche Molassebecken

Die Reservoirs dieser drei Regionen weisen aus geologischer Sicht unterschiedliche Charakteristika auf. Im Kapitel 4.4 wird ein Abriss der Geologie und ein Vergleich der drei Geothermie-Regionen Deutschlands vorgestellt.

Laut /PAS 03/ liegt das technische Gesamtpotenzial zur geothermischen Stromerzeugung bei ca. 1.200 Exa Joule (etwa 300.000 TWh), was etwa dem 600-fachen des deutschen Jahresstrombedarfes von ca. 2 Exa Joule entspricht. Das größte Potenzial befindet sich in den kristallinen Gesteinen (95 %), die übrigen 5 % verteilen sich auf Störungszonen (4 %) und hydrothermale Aquifere (1 %). Das zusätzliche Potenzial an thermischer Energie (Kraftwärmekopplung) beträgt etwa das 1,5-fache des Strompotenzials, wenn keine Wärmepumpen eingesetzt werden, bzw. das 2,5-fache, wenn Wärmepumpen verwendet werden.



Abb. 2.2 Geothermische Regionen in Deutschland (nach /GEO 14/)

2.4.2 Anlagen zur tiefen geothermalen Energieerzeugung

In der Tab. 2.1 und Abb.2.3 sind die Lokalitäten und Rahmendaten der derzeitig realisierten oder im Bau befindlichen Geothermie-Projekte zur Strom- und Wärmeerzeugung in Deutschland aufgeführt. Es zeigt sich, dass ein Boom von Geothermie-Projekten im Molassebecken um München stattfindet. Die Überzahl der Anlagen speist Wärme in ein Fernwärmenetz ein. Projekte im Oberrheingraben sind aufgrund der höheren Wärmeenthalpie eher zur Stromproduktion ausgelegt. Das Projekt in Soutz-sous-Forêts (Frankreich) dient überwiegend der Forschung auf dem Gebiet der EGS-Verfahren.

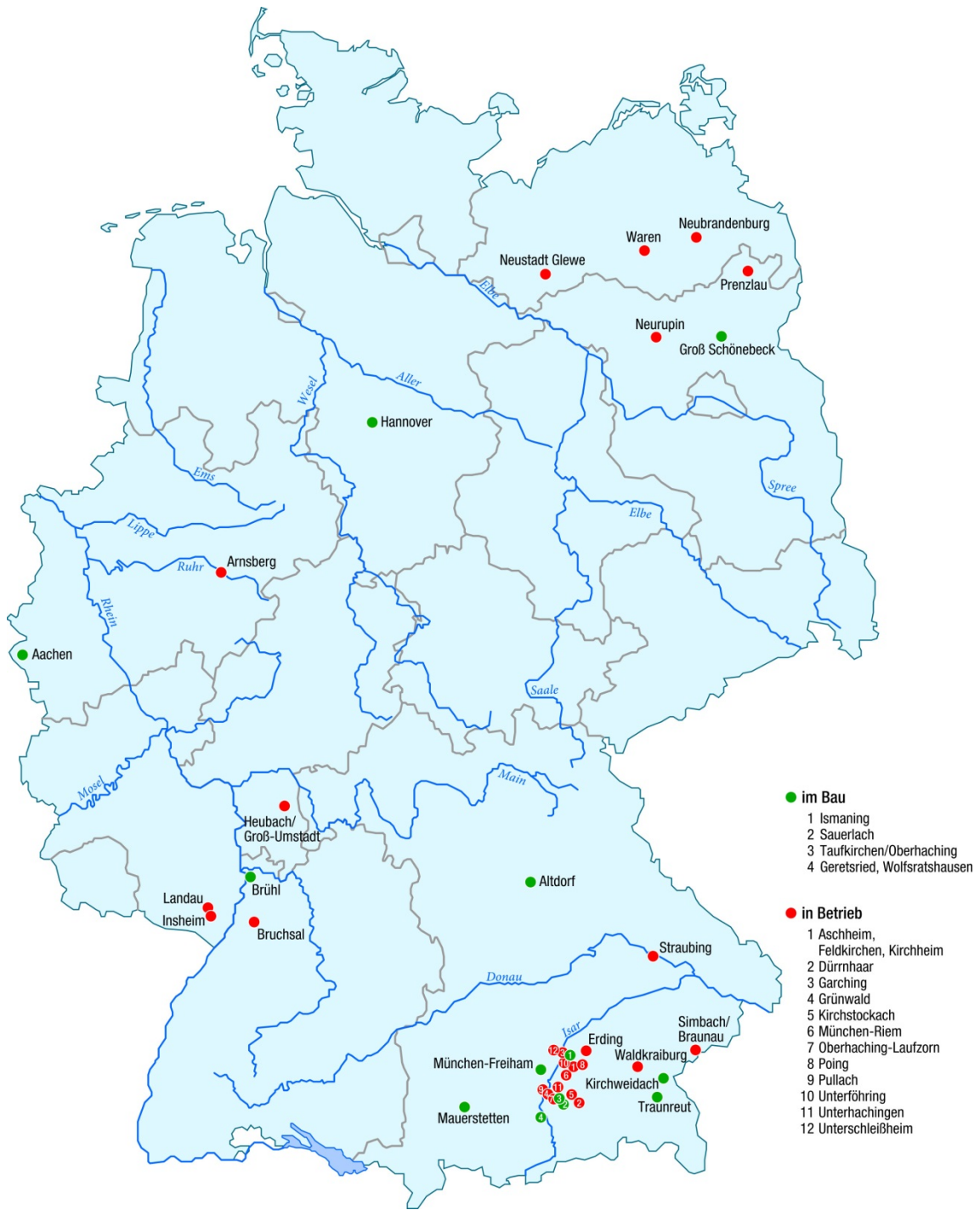


Abb. 2.3 Tiefe Geothermie-Projekte in Deutschland (Quelle GtV Bundesverband Geothermie e.V., Stand November 2013)

Tab. 2.1 Tiefengeothermie-Projekte (offenen Systeme) in Deutschland, Frankreich und der Schweiz

| Standort | Region | Status | Geothermie- verfahren | Hauptnutzung, Nebennutzung | MW _{therm.} | MW _{el.} | Fördertemperatur °C [max.] | Fließrate L/s [max.] | Teufe TVD m [max.] |
|---------------------|--------|---------|--------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Altdorf | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Fernwärme | k.A. | k.A. | 64,5 | 88 | 611 |
| Aschheim | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 9 | 0 | 85 | 75 | 2.630 |
| Bruchsal | ORG | Betrieb | Hydrothermal | Forsch., Strom. | 5,5 | 0,55 | 120 | 24 | 2.542 |
| Brühl | ORG | Im Bau | Hydrothermal | Strom., Fernw. | ca.40 | > 6 | 155 | 100 | 3.320 |
| Dürrnhaar | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Strom. | 0 | 5,5 | 135,5 | 130 | 3.720 |
| Erding | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 9,7 | 0 | 65 | 55 | 2.200 |
| Garching | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 6 | 0 | 74 | 100 | 2.100 |
| Groß Schönebeck | NDB | Im Bau | EGS | Forsch., Strom. | k.A. | k. A. | 150 | 20 | 4.400 |
| Geretsried | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Strom., Fernw. | 40 | 5,3 | 145 | 100 | 5.200 |
| Ismaning | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 7 | 0 | 77 | 85 | 2.200 |
| Insheim | ORG | Betrieb | Hydrothermal | Strom | 0 | 4,8 | 165 | 85 | 3.300 |
| Kirchstockach | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Strom. | 0 | 5,5 | 135 | 130 | 3.750 |
| Kirchweidach | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Strom., Fernw. | 5 | 6,6 | 128 | 130 | 3.500 |
| Landau in der Pfalz | ORG | Betrieb | Hydrothermal | Strom., Fernw. | 5 | 3,6 | 160 | 70 | 3.340 |
| Mauerstetten | SMB | Im Bau | EGS | Strom., Fernw. | k.A. | 5 | 130 | k.A. | 4.000 |
| München Riem | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 10 | 0 | 93 | 75 | 2.746 |
| München-Freiham | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 20 | 0 | 90 | 100 | 2.700 |
| Neubrandenburg | NDB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 3,8 | 0 | 53 | 28 | 1.267 |

Tab. 2.1 [Forts.] Tiefengeothermie-Projekte (offenen Systeme) in Deutschland, Frankreich und der Schweiz

| Standort | Region | Status | Geothermie- verfahren | Hauptnutzung, Nebennutzung | MW _{therm.} | MW _{el.} | Fördertemperatur °C [max.] | Fließrate L/s [max.] | Teufe TVD m [max.] |
|--------------------|--------|---------|--------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Neustadt-Glewe | NDB | Betrieb | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 7 | 0,2 | 99 | 35 | 2.320 |
| Neuruppin | NDB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 2,1 | 0 | 64 | 13,9 | 1.700 |
| Oberhaching | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 40 | 0 | 130 | 138 | 3.300 |
| Poing | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 7 | 0 | 76 | 100 | 3.000 |
| Pullach | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 15 | 0 | 107 | 105 | 3.445 |
| Riehen (Schweiz) | ORG | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 5,25 | 0 | 65 | 20 | 1.547 |
| Sauerlach | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Strom., Fernw. | 4 | 5 | 140 | 110 | 4.480 |
| Simbach-Braunau | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 8 | 0 | 80 | 80 | 1.920 |
| Straubing | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 4,1 | 0 | 36 | 45 | 800 |
| Soultz-sous-Forêts | ORG | Betrieb | EGS | Forschung | 21 | 2,1 | 175 | ca. 25-35 | - |
| Taufkirchen | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 40 | 5 | 133 | 120 | 3.800 |
| Traunreut | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 12 | 4 | 118 | 130 | 5.067 |
| Unterföhring | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 9 | 0 | 87 | 85 | 2.512 |
| Unterhaching | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernw., Strom. | 38 | 3,36 | 122,8 | 150 | 3.350 |
| Unterschleißheim | SMB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 28,36 | 0 | 79 | 100 | 1.960 |
| Waldkraiburg | SMB | Im Bau | Hydrothermal | Fernwärme | 13,5 | 0 | 108 | 65 | 2.650 |
| Waren / Müritz | NDB | Betrieb | Hydrothermal | Fernwärme | 1,3 | 0 | 63 | 17 | 1.547 |

NDB = Norddeutsches Becken, ORG = Oberrheingraben, SMB = Süddeutsches Molassebecken, EGS = Enhanced geothermal System /LIA 14/, /GTV 14/

2.4.3 Wirtschaftliche Aspekte

Die Wirtschaftlichkeit eines Geothermie-Projektes hängt von zahlreichen Einflussfaktoren ab. Der wichtigste Faktor ist die Fündigkeit, d. h. ob die geothermale Lagerstätte eine wirtschaftliche Thermalwassertemperatur und Schüttrate aufweist. Weitere Faktoren sind die Höhe der Bohrkosten, der Anlagenwirkungsgrad und die Möglichkeit der Wärmeauskopplung. Hinsichtlich der energiepolitischen und energiewirtschaftsrechtlichen Förderungen sei auf das Kapitel 5.3 verwiesen.

Der größte Investitionsaufwand beim Bau eines Geothermie-Kraftwerkes liegt bei der Erschließung der Lagerstätte bzw. dem Abteufen der Bohrung (Abb. 2.4). Deshalb liegt auch das größte Kostensenkungspotenzial bei den Bohrkosten. Die Entwicklung neuer, schneller und demzufolge kostengünstigerer Bohrtechniken wird von der Erdölbranche dominiert. Bei der Erdölförderung sind die Bohrkosten nicht die kritische Größe, bei geothermischen Anlagen ist dies anders. Die Bohrkosten nehmen bei Geothermie-Bohrungen bis zu drei Viertel der Gesamtinvestition in Anspruch /OPP 08/.

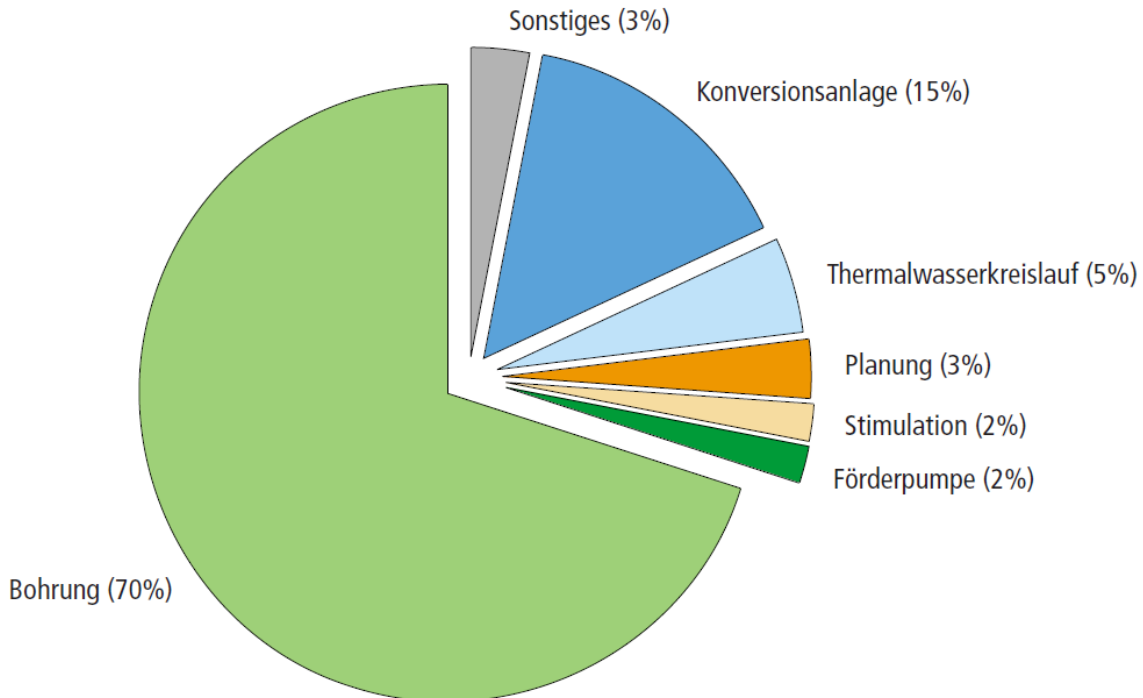


Abb. 2.4 Durchschnittliche Investitionskostenverteilung eines Geothermie-Projektes /IEU 07/

2.4.3.1 Investitionskosten Erschließung

Die Kosten einer Geothermie-Bohrung steigen mit dem Bohrlochdurchmesser, der Bohrtiefe und dem Ablenkungswinkel an. Fast alle Konzepte zur geothermalen Energieerzeugung aus tiefen Bohrungen (> 400 m, offene Systeme) sehen zwei Bohrungen vor. Damit verdoppeln sich die Bohrkosten. Nach /LEG 03b/ sind in der Abb. die einzelnen Kostenpunkte bei einer tiefen Bohrung aufgesplittet. Die Kosten beziehen sich hier auf 4.500 m Endteufe. Es werden 1.150 EUR pro Bohrmeter angesetzt.

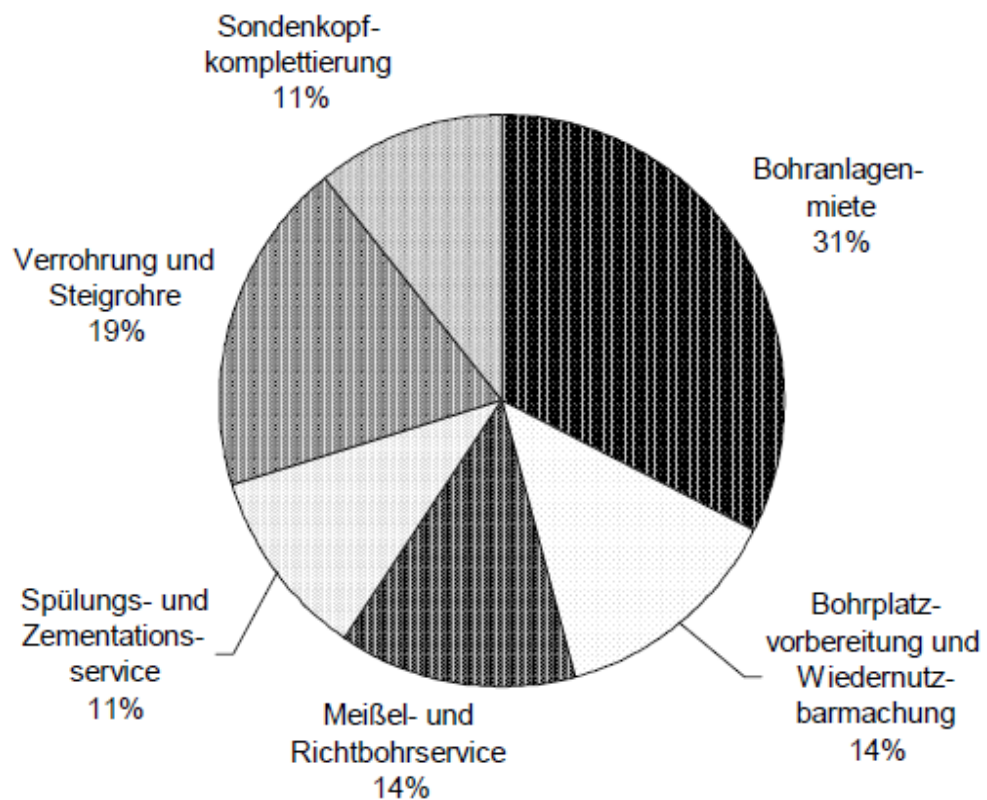


Abb. 2.5 Einzelne Kostenpunkte einer Tiefbohrung /LEG 03b/

Die sorgfältige Vorplanung einer Geothermie-Bohrung, insbesondere die Erkundung des geologischen Untergrundes, kann nicht geplante Standzeiten verhindern bzw. reduzieren und damit die Bohrzeiten verkürzen. Vor allem, wenn die Bohrung nicht fündig ist, muss die Bohrung neu abgelenkt oder sogar umgesetzt werden. Dies kann das Geothermie-Projekt unwirtschaftlich werden lassen.

Ein großer Kostenpunkt ist die Lebensdauer der Bohrmeißel. Je kürzer ihre Lebensdauer ist, desto öfter müssen sie ausgetauscht werden. Dazu muss jedes Mal das gesamte Gestänge ausgebaut werden, was den Bohrablauf erheblich verzögert. Die überwiegend auf dem Markt erhältlichen Bohrmeißel sind für Sedimentgesteine ausge-

legt, da in der E&P-Industrie hauptsächlich Lagerstätten in Sedimentgesteinen erbohrt werden. Für Geothermie Bohrungen müssen die Meißel zudem eine höhere Temperaturbeständigkeit aufweisen. Die überwiegende Zahl realisierter Geothermie-Projekte wurde in Sedimentgesteinen abgeteuft, somit waren die Bohrmeißel ausreichend. Die Lebensdauer der Bohrmeißel würde jedoch in Zukunft ein Problem werden, wenn der härtere kristalline Untergrund zur petrothermalen Energieerzeugung erschlossen werden soll, denn hier liegt das größte geothermische Potenzial.

Die Kosten für die Verrohrung sind abhängig vom verwendeten Werkstoff, aber auch von der Materialmenge. Aufgrund der hohen Förderraten von Geothermie-Bohrungen werden größere Bohrlochdurchmesser im Vergleich zu E&P-Projekten (Exploration und Produktion) der Erdöl- und Erdgasindustrie benötigt. Die Materialmenge steigt mit zunehmendem Durchmesser der Verrohrung. Deshalb ist eine optimale Planung vor der Bohrung sehr wichtig. Wird der Bohrlochdurchmesser zu klein gewählt, kann vielleicht die benötigte Förderrate nicht erreicht werden und die Anlage arbeitet nicht wirtschaftlich. Durch die Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers erhöht sich zudem die Menge an Ringraumzement, Bohrspülung und der Anlagenkosten durch die höheren Hakenlasten und den verringerten Bohrvorschritt (Tab.2.2). Zudem werden die Bohrmeißel teurer.

Tab. 2.2 Erhöhung der Bohrkosten durch die Vergrößerung des Bohrdurchmessers /NÖV 05/

| | Bohrung A | Bohrung B | Bohrung C |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| Bohrdurchmesser | 8 ½" / 6" | 12 ¼" / 8 ½" | 17 ½" / 12 ¼" |
| Spülvolumen | 100 % | 200 % | 400 % |
| Zementvolumen | 100 % | 250 % | 500 % |
| Rohrkosten | 100 % | 150 % | 200 % |
| Tageskosten Bohr-anlage | 100 % | 125 % | 150 % |

Die Kosten für die Bohranlage stellen den größten Kostenpunkt dar. Die Tageskosten der Bohranlage steigen ebenfalls mit einem größeren Bohrdurchmesser und der Tiefe der Bohrung. Bohranlagen bis 200 t Hakenlast können nur bis in Tiefen von ca. 3.500 m bohren. Der Betriebsstundensatz liegt bei ihnen um die 500 EUR/h. Um größere Bohrtiefen abteufen zu können, sind Bohranlagen mit Hakenlasten von 200 bis 500 t nötig. Bei ihnen liegt der Betriebsstundensatz bei 750 EUR/h. Wenn man von

Bohrzeiten von bis zu drei Monaten ausgeht, kann dies ein nicht zu unterschätzender Kostenfaktor sein /NÖV 05/.

2.4.3.2 Investitionskosten Anlagenbauteile

Die Kraftwerkskosten sind maßgeblich abhängig von den jeweiligen Standortbedingungen. Entscheidend für die Wahl des Kraftwerktyps sind die vorherrschenden Thermalwassertemperatur und dauerhaft erzielbaren Fließraten. Zur Abschätzung von Investitionskosten wurden zahlreiche Kostenstrukturen anhand modellhafter Geothermie-Projekte berechnet. Eine dieser Berechnungen wurde im Rahmen des Projektes „RegionER – Nachhaltige Energie am Oberrhein“ durchgeführt /SKP 08/. Die Kosten für das Kraftwerk sowie den Netzanschluss wurden dabei mit rund 12 Mio. EUR angesetzt. Diese Schätzung entspricht ähnlichen Betrachtungen seitens der BayernLB in Zusammenarbeit mit Sonntag & Partner /SUP 09/. In einer Zusammenstellung finanzieller Eckdaten werden für ein Kraftwerk (4 - 5 MW) Kosten in Höhe von 10 - 15 Mio. EUR kalkuliert.

In einer Untersuchung des Wirtschaftsforums Geothermie e.V. /WFG 11/ zur Ermittlung von Strom- und Wärmegestehungskosten wurden an zehn deutsche Projekte Fragebögen mit der Bitte um Beantwortung übermittelt. Bei dieser Untersuchung wurden erstmals Echt Daten verwendet. Es ist allerdings zu beachten, dass aufgrund der geringen Anzahl der Projekte keine signifikanten Erkenntnisse abgeleitet werden konnten. Die in /WFG 11/ untersuchten Kraftwerke weisen deutliche Leistungsunterschiede (230 kW bis 6.500 kW) auf. Für ORC-Anlagen lagen die spezifischen Kosten im Mittel bei rund 3.700 EUR/kW_{el} bis 4.400 EUR/kW_{el}. Die Kosten für die Kalina-Anlage Unterhaching betragen laut eines im Jahre 2012 veröffentlichten Datenblattes /GTU 12/ ca. 16 Mio. EUR. Die absoluten Kosten für neu zu realisierende Anlagen liegen gemäß /WFG 11/ mit über 20 Mio. EUR nahe beieinander.

2.4.3.3 Investitionen Wartung

Die Kosten für Verschleiß und Wartung sind nur sehr ungenau zu ermitteln, da entsprechende Daten aus dem längerfristigen Betrieb nicht vorliegen. Im Rahmen der Fragebogenaktion des Wirtschaftsforums Geothermie e.V. /WFG 11/ wurden nur seitens zweier Projekte verlässliche Daten vorgelegt. Die Beträge sind vergleichbar und belaufen sich auf 336.000 EUR bzw. 302.000 EUR jährlich. Da es sich bei beiden Pro-

jekten um Anlagen handelt, die erst kürzlich in Betrieb genommen wurden, sind zwei wesentliche Aspekte zu berücksichtigen. Zum einen werden noch laufend Maßnahmen zur Optimierung der Anlage vorgenommen, was die Kosten erhöht, zum anderen ist nach so kurzer Zeit nicht mit Alterungseffekten zu rechnen, was die Kosten für Wartung und Instandhaltung wiederum senkt. Gemäß /WFG 11/ ist davon auszugehen, dass sich diese beiden kostenwirksamen Effekte zukünftig gegenseitig aufheben werden.

2.4.3.4 Nutzungsdauer einer geothermalen Bohrung

Konzepte zur geothermalen Energieerzeugung sehen meistens einen Dublettenbetrieb mit zwei Bohrungen vor. Durch die eine Bohrung wird das Wasser gefördert, und durch die andere Bohrung wird das abgekühlte Wasser wieder in den Untergrund verpresst. Dies ist nötig, um den hydraulischen Druck in der Lagerstätte aufrecht zu erhalten. Das abgekühlte Wasser nimmt während der Fließpassage zwischen den beiden Bohrungen die in den Gesteinen gespeicherte Wärmeenergie auf und vermischt sich zudem mit dem anstehenden wärmeren Thermalwasser aus der Lagerstätte. Dadurch wird der Lagerstätte Wärme entzogen. Je nach Vernetzung der Klüfte und der wärmeleitenden Eigenschaften der Gesteine und der Nutzungsdauer der Geothermieanlage kann sich das Gestein unterschiedlich stark räumlich abkühlen. Je nach Abstand der Förder- und Reinjektionsbohrung erreicht die Abkühlungsfront irgendwann die Förderbohrung. Erst nach dieser Zeit, die als thermische Durchbruchzeit bezeichnet wird, kann eine erste Temperaturerniedrigung in der Entnahmebohrung festgestellt werden. Der wirtschaftliche Betrieb der Geothermieanlage ist bis zu einem unteren Temperaturgrenzwert möglich, der von der Auslegung des Heiznetzes oder der Stromerzeugungsanlage bestimmt wird. Der Mindest-Nutzungszeitraum einer geothermischen Dublette hängt somit zum einen von der technischen Lebensdauer der Bohrungen und zum anderen von der thermischen Durchbruchzeit bzw. vom Erreichen des Temperaturgrenzwertes ab. Die thermische Durchbruchzeit ist abhängig von den hydraulischen Eigenschaften der Lagerstätte und dem Abstand der beiden Bohrungen. Der Abstand von Förder- und Reinjektionsbohrung wird mit Hilfe von Modellrechnungen so gewählt, dass eine Nutzung von mindestens 20 bis 30 Jahren möglich ist /FRT 10/.

Laut /STO 11/ liegen über das Langzeitverhalten der Klüfte und der Gesteinsmatrix aufgrund der geringen Laufzeit der bisher realisierten Tiefengeothermievorhaben noch keine praktischen Erfahrungen vor. Möglicherweise dichten sich die Klufflächen gegenüber der Gesteinsmatrix aufgrund von Alterationsreaktionen (Wasser-Gesteins-

Wechselwirkungen) und einer damit einhergehenden Bildung von Sekundärmineralen (Tonmineralen) ab. Dadurch reduziert sich die Porosität bzw. die Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix. Es ist derzeit noch nicht abzuschätzen, welche Auswirkungen diese Vorgänge auf die Lebensdauer einer Geothermieanlage haben.

Es ist davon auszugehen, dass die thermische Nutzungsdauer deutlich länger ist, als die veranschlagten 20 – 30 Jahre. Die älteste Anlage in Europa, die mit dem Dubletten-Verfahren arbeitet, ist seit 1969 in der Nähe von Paris in Betrieb. Bis heute ist keine Temperaturerniedrigung an der Förderbohrung festgestellt worden. Somit lässt sich vermuten, dass der abgekühlte Bereich in der Lagerstätte durch im Untergrund zirkulierende Wässer stärker regeneriert wird als erwartet.

Der für die Wiedererwärmung des abgekühlten Bereichs erforderliche Zeitraum ist deutlich länger als die Nutzungsdauer einer geothermischen Dublette. Eine numerische Simulation einer Modelldublette im norddeutschen Becken lässt vermuten, dass bei rein konduktiver Wiedererwärmung das Temperaturfeld auch nach dem 100-fachen des Nutzungszeitraumes noch nicht vollständig ausgeglichen ist. Diese Ergebnisse konnten mit einer numerischen 3D-Modellierung einer in Betrieb befindlichen Dublette im bayerischen Molassebecken bestätigt werden /FRT 10/.

3 Erschließung einer tiefen geothermischen Lagerstätte

In diesem Kapitel werden die bohrtechnischen Verfahren und die hydrogeologischen Prozesse während der Erschließungs- und Betriebsphase beschrieben. Dies führt zu einem besseren Verständnis der technischen Risiken und möglicher Beeinträchtigungen von Schutzgütern, die durch die Erschließung und Nutzung geothermaler Lagerstätten hervorgerufen werden können.

3.1 Einführung

/TRE 10/ erstellte eine Studie, in der die Potenziale zur geothermalen Energieerzeugung in Europa bis zum Jahr 2030 untersucht wurden. Im Zuge der Studie wurden 83 Branchenexperten auch nach den größten Problemen bzw. wirtschaftlichen Risiken während Geothermie-Projekten befragt. 42 Prozent der Befragten halten das Fündigkeitsrisiko für das größte Problem von Geothermie-Projekten. Es folgen mangelhaft erstellte Bohrungen (19 Prozent) und technische Risiken (17 Prozent) bei der Erschließung einer geothermalen Lagerstätte.

Der Umstand, dass tiefe Bohrungen potentielle umweltspezifische aber auch wirtschaftliche Risiken während der Erschließung geothermaler Lagerstätten darstellen, machte eine detaillierte Verfahrens- und Prozessbeschreibung der Bohrtechnik in diesem Bericht notwendig, da nur durch das Verständnis der technischen Durchführung und der auftretenden Schwierigkeiten eine Abschätzung der auftretenden Umweltfaktoren während einer Geothermie-Bohrung erfolgen kann.

In Deutschland wird bei Tiefbohrungen nach den nationalen und internationalen Normen und Richtlinien (insb. API und WEG) auf Grundlage nationaler Gesetze (insb. Bundesberggesetz) und untergesetzlicher Regelungen (insb. Tiefbohrverordnung des Bundeslandes) gebohrt, verrohrt und zementiert. Dabei können die Ausführungsbestimmungen zwischen den Bundesländern variieren. Es gilt generell folgendes Verfahren bei der Genehmigung von Tiefbohrungen /SCI 12/:

- Ein Interessent stellt einen Antrag (Hauptbetriebsplan), in welchem die vorgesehenen Aktivitäten beschrieben sind.
- Bei größeren Vorhaben werden auch für einzelne „Bewilligungsabschnitte“ Sonderbetriebspläne verwendet, um die im Projektfortschritt gewonnenen Erkenntnisse für die Genehmigung der folgenden Schritte nutzen zu können. So werden Son-

derbetriebspläne z. B. für Bohrungen und Bohrlochtests vergeben und anschließend, basierend auf der Auswertung der Loggingergebnisse, geologischen Befunden und weiteren Bohrlochtests eine möglichen Freigabe zur Stimulation (hydraulische und chemische Stimulation) genehmigt.

- Jeder einzelne Schritt ist dabei ein eigener Verwaltungsvorgang, der unabhängig von den vorangegangenen Entscheidungen befürwortet oder abgelehnt werden kann.

Die vom Antragsteller der Bergbehörde vorgelegten Pläne (Hauptbetriebsplan und Sonderbetriebspläne) werden eingehend geprüft. Die Bergbehörde übernimmt dabei die Abstimmung mit weiteren Behörden (z. B. der Wasserbehörde). Nach der Prüfung und dem Rücklauf der Stellungnahmen weiterer Behörden erfolgt von der Bergbehörde ein Beschluss, der bei Zulassung eines Vorhabens in der Regel mit spezifischen Auflagen verbunden ist. Dabei geht das deutsche Genehmigungsverfahren davon aus, dass die Geologie und Standortbedingungen an jedem Ort einzeln zu prüfen sind. Es muss sichergestellt werden, dass alle Arbeiten nach dem Stand der Technik durchgeführt werden.

Tiefbohrungen werden von verschiedenen spezialisierten Firmen durchgeführt, die sich auf einzelne Bereiche der Bohrung aber auch der Erkundung spezialisiert haben. Dazu gehören Explorationsfirmen (seismische Erkundung), Bohrunternehmen (Bedienung des Bohrgerätes, Setzen von Rohrtouren), Firmen zur Bereitstellung der Bohrspülung, Bohrlochlogging, Zementation und Zementationskontrolle. Der Einsatz von Unternehmen und Subunternehmen für Tiefbohrungen, die nach dem DVGW Arbeitsblatt W 120 zertifiziert sind, kann entscheidend für das erfolgreiche Gelingen eines Projektes beitragen. Neben der firmeneigenen Qualitätskontrolle ist die Überwachung durch die Bergbehörden elementarer Bestandteil der Qualitätssicherung beim Tiefbohren. Prinzipiell werden alle Tiefbohrungen in den Ländern nach gleichen Richtlinien abgeteuft, auch wenn es bisher nicht gelungen ist, einen bundeseinheitlichen Ordnungsrahmen zu schaffen /SCI 12/.

3.2 Bohrtechnik

Industrielle Bohrungen zur Erdöl-, Erdgas- oder Wassergewinnung werden in Deutschland seit über hundert Jahren durchgeführt. Besonders aus der Explorations- & Produktions- (E&P) Industrie (Erdöl- und Erdgasindustrie) wurden die gesammelten Erfah-

rungen bzw. die Technik für den Bau von Tiefengeothermie-Bohrungen adaptiert. Im Grunde sind die Bohrverfahren für unterschiedliche Verwendungszwecke gleich, nur der Ausbau und das Verrohrungsschema unterscheiden Bohrungen der E&P-Industrie von denen der Geothermie /BUJ 11/. Zum allgemeinen Verständnis wird im Folgenden der generelle Ablauf bei der Erstellung einer Tiefengeothermie-Bohrung beschrieben.

3.2.1 Bohrverfahren

Die Beschreibungen in diesem Bericht beziehen sich auf das Rotary-Bohrverfahren bzw. die Spülbohrtechnik (Abb.). Bei der Spülbohrtechnik werden die Gesteinsbruchstücke aus dem Bohrloch mit Hilfe eines Spülmediums an die Oberfläche befördert. Das Spülmedium kann aus einem Gas (z. B. Luft) oder einer Flüssigkeit bestehen. Da Bohrverfahren mit Luft nur bis zu einer begrenzten Tiefe von max. 50 m angewendet werden können /BUJ 11/, werden hier nur die flüssigen Spülmedien betrachtet. Im Folgenden wird der Spülkreislauf einer Bohrung anhand der Abb. 3.2 erläutert /GDZ 14/.

Am Ende des Bohrgestänges befindet sich das Bohrwerkzeug (Punkt 9), der so genannte Rollenmeißel. Die Gesteine an der Bohrlochsohle werden vom Rollenmeißel mechanisch zerstört und zerkleinert. Der Druck des Bohrmeißels auf die Bohrlochsohle wird durch so genannte Schwerstangen realisiert (Punkt 8). In der Abb. sind klassische Rollenmeißel dargestellt, die rotierend das Gestein zerdrücken und zermahlen, wie z. B. der PDC Meißel (Diamantbesetzter Meißel), bei dem das Gestein geschält wird. Der Antrieb der Bohrmeißel erfolgt durch das Bohrgestänge über einen Drehtisch an der Oberfläche (Punkt 13). Dadurch ist das Bohrgestänge durch den Kontakt der Bohrspülung und der Bohrlochwand hohen mechanischen Belastungen (Reibung) ausgesetzt. Heutzutage wird immer häufiger ein wassergetriebener Motor (Mud Motor) am Ende des Bohrgestänges eingesetzt. Dieser Motor wird durch die Zirkulation der Bohrspülung angetrieben, eine Drehung des Bohrgestänges entfällt. Dies erleichtert die Ablenkung der Bohrungen (Directional Drilling). Die gesamte Last des Bohrgestänges hängt bei dem Bohrvorgang an einem Haken am Bohrturm. Die Hakenlast und somit die Größe der Bohranlage steigt mit der Bohrtiefe und dem Bohrdurchmesser. In der Tiefengeothermie werden deshalb größere Bohranlagen als in der E&P-Industrie benötigt.



Abb. 3.1 Verschiedene Bohrmeißel (rechts unten im Bild ist eine diamantbesetzte Bohrkronen dargestellt, die es erlaubt, Bohrkerne aus dem Gestein zu erbohren) /GUB 14/

Die Bohrspülung wird durch einen Hohlraum im Bohrgestänge hinunter bis zur Bohrlochsohle gepumpt (Punkt 7). Dort tritt sie am Bohrmeißel aus, kühlt diesen und befreit die Bohrlochsohle gleichzeitig vom Bohrklein. Danach fließt die Bohrspülung entlang des Ringraumes wieder nach oben zur Oberfläche, wobei sie das Bohrklein nach Über-tage befördert. An der Oberfläche wird die Bohrspülung aufbereitet (Punkt 12). Dazu werden das Bohrklein und mögliche gelöste Gase aus der Spülung entfernt und gegebenenfalls Additive (Zusatzstoffe) zugegeben. Danach wird die Spülung wieder hinunter in das Bohrloch gepumpt und der Kreislauf beginnt von neuem /BUJ 11/. Der Bohrlochkopf kann durch Absperrventile (Punkt 10 und 11) geschlossen werden, damit es bei unkontrollierten Druckanstiegen im Bohrloch nicht zu einem oberirdischen Fluidaus-trag kommt.

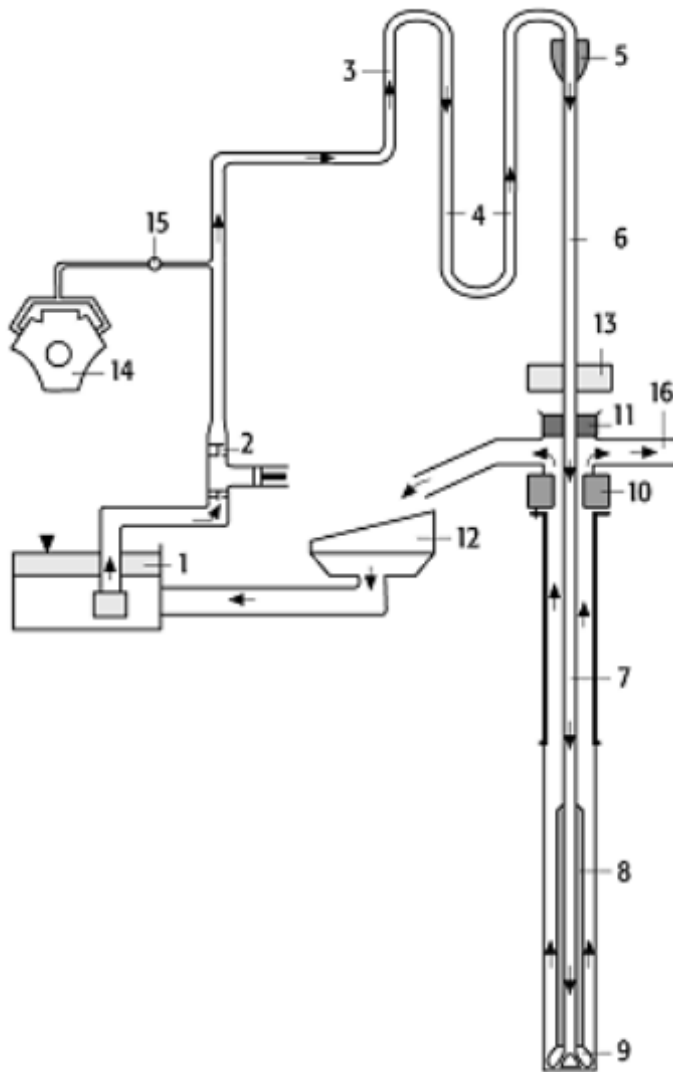


Abb. 3.2 Schematische Darstellung des Rotary Bohrverfahrens /GDZ 14/

Erläuterungen: 1 = Saugtank, 2 = Spülpumpe, 3 = Steigleitung, 4 = Spül-schlauch, 5 = Spülkopf, 6 = Kelly, 7 = Bohrgestänge, 8 = Schwer-stangen, 9 = Bohrmeißel, 10 = Preventer, 11 = Drehpreventer, 12 = Schüttelsieb, 13 = Drehtisch, 14 = Kompressor, 15 = Rückschlagventil, 16 = Austragschlauch

3.2.2 Bohrplatz

Zur Gewährleistung der Befahrbarkeit sowie aus Gründen des Grundwasser- und Immissionsschutzes wird vor jeder Bohrung ein versiegelter Bohrplatz hergestellt. Zusätzlich werden Lagerflächen, insbesondere für den abgetragenen Oberboden und die Infrastruktur, benötigt /SCN 12/. In der Abb. 3.3 sind beispielhaft die Luftaufnahme und der schematische Aufbau des Bohrplatzes der Geothermie-Bohrung in St. Gallen dargestellt. In der Luftaufnahme (obere Abbildung) erkennt man rechts runde Becken,

diese gehören nicht zum Bohrplatz sondern sind Anlagenteile einer anschließenden Kläranlage.

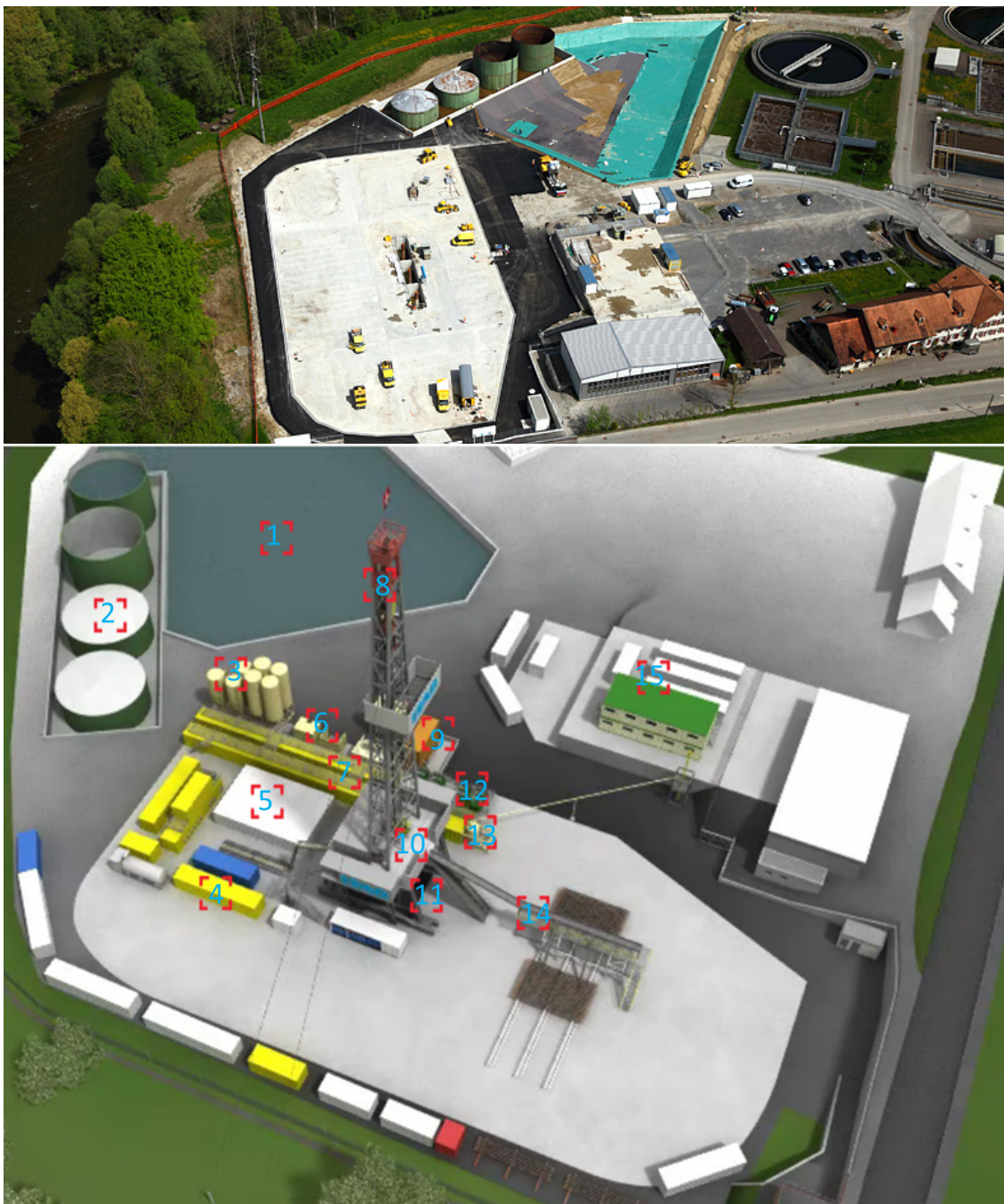


Abb. 3.3 Luftaufnahme (oben) und schematische Darstellung des Bohrplatzes der Geothermie-Bohrung in St. Gallen (verändert nach /GAL 12/)

Der Bohrturm ist in der oberen Abbildung noch nicht aufgebaut. Die Nummern in der Abbildung werden im Folgenden erklärt.

1. Zwischenspeicherbecken: Im Speicherbecken wird das Thermalwasser aus den Zirkulationstest aufgefangen und abgekühlt (6.000 m³ Speichervermögen)
2. Stapeltanks: Zur Zwischenspeicherung von Bohrspülung und Thermalwasser, sowie als Reserve für Brauchwasser (Fassungsvermögen je nach Behältergröße bis zu 1.000 m³).
3. Silos: In den Silos werden Salz und weitere Additive, die der Spülflüssigkeit bei Bedarf zugefügt werden, gespeichert. Weitere Tanks sind mit Spülflüssigkeit als Reserve gefüllt.
4. Dieselgeneratoren: Wenn kein Strom aus dem öffentlichen Netz entnommen werden kann, wird dieser durch Dieselgeneratoren erzeugt. Ein Dieselgenerator stellt zudem sicher, dass bei einer Stromentnahme aus dem öffentlichen Netz auch bei einem Stromausfall die wichtigsten Komponenten (z. B. Spülpumpen) betrieben werden können.
5. Spülpumpen: Spülpumpen sorgen für die notwendige Zirkulation der Spülflüssigkeit. Um Anwohner vor Lärmbelastung zu schützen, können die Spülpumpen durch Schallgehäuse eingekapselt werden.
6. Mixing Unit: Um die Eigenschaften der Spülflüssigkeit den jeweiligen geologischen Verhältnissen anzupassen, werden ihr in der Mischeinheit manuell verschiedene Additive zugeführt.
7. Spültanks: In den Spültanks befinden sich rund 250 m³ Spülflüssigkeit. Diese wird während der Bohrarbeiten ins Bohrloch eingepresst.
8. Bohrmast: Der Bohrmast dient zur Lastenaufnahme, bzw. zum Einführen und Ziehen des Bohrgestänges.
9. Zentrifugen: Feinkörniges Bohrklein wird mit Zentrifugen von der Spülflüssigkeit getrennt und in einer so genannten Cutting-Box gesammelt.
10. Arbeitsbühne: Hier befindet sich der Führerstand, von dem aus die Bohranlage bedient wird.
11. Blowout-Preventer: Im Unterbau über dem Bohrloch ist der Blowout-Preventer installiert.
12. Schüttelsiebe: Grobkörniges Bohrklein wird mit Schüttelsieben von der Spülflüssigkeit getrennt und in einer Cutting-Box aufgefangen.

13. Degaser: Der Degaser trennt die in der Spülflüssigkeit gelösten Gase von ihr ab. Die abgeschiedenen Gase werden in der Regel zur Gasfackel abgeleitet und verbrannt.
14. Gestängelager: Durch ein automatisches Pipehandling kann das Gestänge aus einem Gestängelager dem Bohrturm zugeführt werden.
15. Container Dorf: Da im Schichtbetrieb gearbeitet wird, befinden sich die Büros, Labors, sowie Aufenthalts- und Schlafräume direkt auf dem Bohrgelände.

Die Größe des Bohrplatzes ist im Wesentlichen abhängig von der Bohrtiefe und damit von der Größe der Bohranlage. Von der E&P-Industrie wird für den Bohrplatz eine Flächengröße von ca. 7.000 – 10.000 m² veranschlagt. Zudem werden noch 1.000 - 2.000 m² als Lagerflächen insbesondere für Oberboden und die Infrastruktur benötigt /SCN 12/. /BUJ 11/ und /UTH 12/ geben Flächengrößen zwischen etwa 3.000 und 6.200 m² an. Für die Geothermie-Bohrung in Basel (5.000 m tief) wurde eine Fläche von 5.000 m² veranschlagt. Durch das Befahren des Bodens mit schweren Maschinen wird zudem eine Fläche von bis zu 2.000 m² verdichtet. Außerdem ist der Aushub einer ca. 30 cm mächtigen Erdschicht im Bereich des Bohrplatzes notwendig /FRK 07/. Die Abb. 3.4 zeigt den Bohrplatz der Geothermie-Bohrung des Genesys-Projektes in Hannover. Aufgrund von Lärmschutzvorgaben wurde der Bohrplatz im linken Bereich mit Schallschutzwänden umstellt.

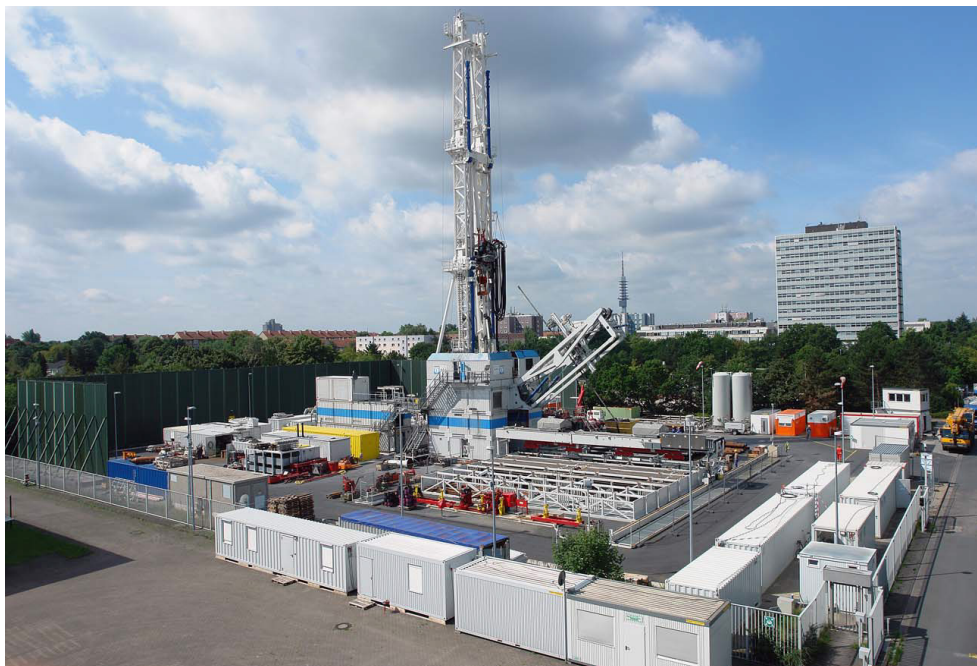


Abb. 3.4 Bohrplatz des Genesys-Projektes in Hannover /REC 11/

Jeder Bohrplatz wird durch das zuständige Bergamt abgenommen /BUJ 11/. Die Versiegelung des Bohrplatzes sollte folgende Bedingungen zur Gewährleistung des Grundwasserschutzes erfüllen /SCI 12/:

1. Abgedichteter Bohrkeller (Bereich um das Bohrloch)
2. Überlauf des Bohrkellers mit Abfluss in einen Ölabscheider und ein Auffangbecken
3. Versiegelung des Bohrplatzes (mit Randbegrenzung, damit das Regenwasser nicht von der Versiegelung in das umliegende Erdreich abfließt).

Die Ausführung des Bohrkellers erfolgt nach Maßgabe der statischen Berechnung und auf Grundlage des ingenieur-geologischen Gutachtens. Der Bohrkeller wird in stahlarmeriertem Beton inkl. Pumpensumpf erstellt und mit ordnungsgemäßem Potenzialausgleich und Blitzschutz ausgestattet /ERD 13/.

Für die Durchführung von Zirkulationstests werden Zwischenspeicherbecken in der Nähe des Bohrplatzes erstellt. Dies sind in der Regel mit Kunststoffplanen ausgekleidete Erdbecken.

Der Bohrplatz wird in zwei Bereiche unterteilt (Abb. 3.5). Der erste Bereich ist der Wassergefährdungsklassenbereich (WGK-Bereich). Die Oberfläche des WGK-Bereiches ist wasserundurchlässig (nach VAWS „Anlagenverordnung wassergefährdende Stoffe“). Er umfasst die Bereiche, in denen mit wassergefährdenden Flüssigkeiten (unabhängig von den Wassergefährdungsklassen) gearbeitet wird. In diesen Bereichen ist Vorsorge zu treffen, dass diese Flüssigkeiten nicht in den Boden eindringen können. Dieser Bereich umfasst u. a. den Bohrturmunterbau mit Bohrkeller, die Maschinenstellfläche und das Dieselöllager und kann auch Spülungstanks, „solids control“- Equipment und Bohrgutgrube bzw. -behälter umfassen, wenn hier mit wassergefährdenden Stoffen umgegangen wird. Gegebenenfalls können weitere Lagerbereiche für Stoffe und Materialien geschaffen werden, für die eine Grundwassergefährdung zu besorgen ist. Zum Beispiel müssen wassergefährdende Spülungschemikalien in einem WGK-Bereich gelagert werden. Der zweite Bereich entspricht den sonstigen Bereichen. Die sonstigen Bereiche beinhalten die Bereiche des Bohrplatzes, auf denen eine Wassergefährdung ausgeschlossen ist /BUJ 11/. Im Falle des Auftretens von Störfällen muss das zuständige Bergamt sofort verständigt werden.

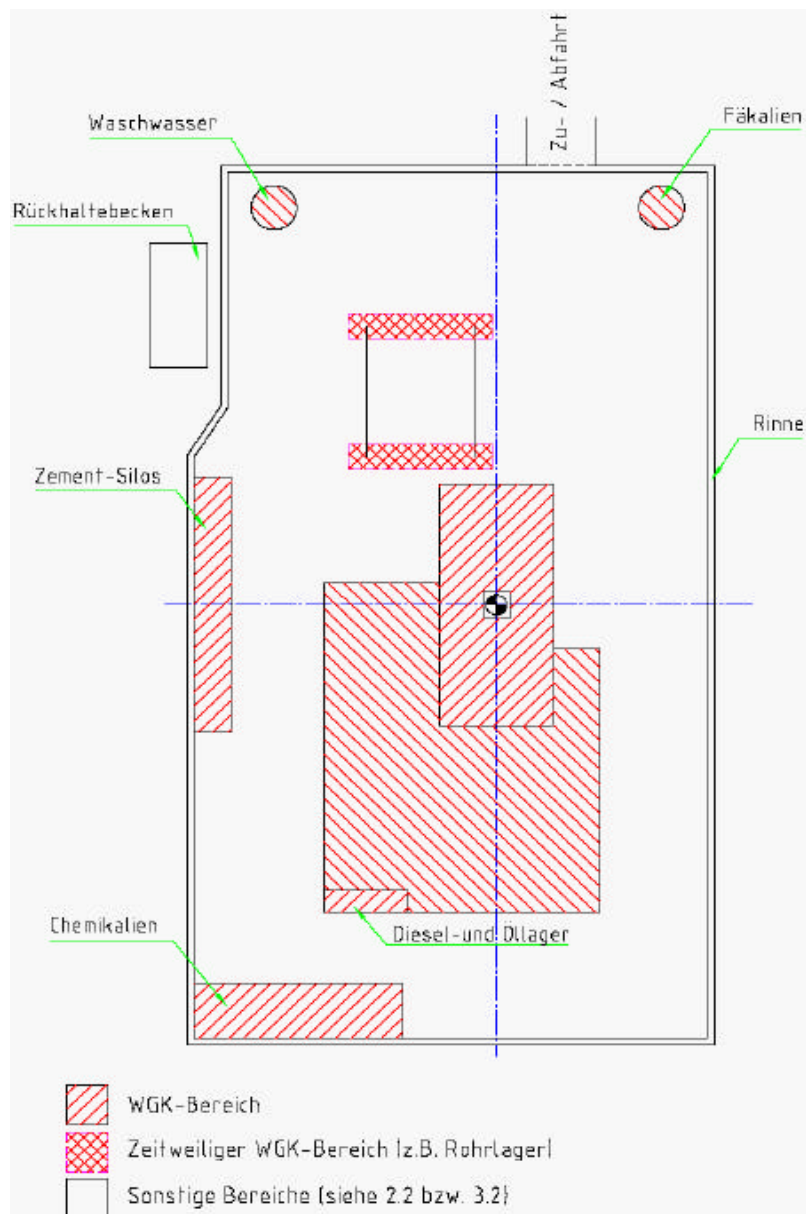


Abb. 3.5 Einteilung des Bohrplatzes in Wassergefährdungsbereiche /WEG 06a/

Für die Entwässerung der Anlage werden zwei Abwasserbecken errichtet, sodass der WGK-Bereich und der sonstige Bereich separat entwässert werden können. Das Oberflächenwasser des WGK-Bereiches wird über mehrere Sinkkästen in einen flüssigkeitsdichten Auffangbehälter aus Beton geleitet und zur externen Entsorgung dort gesammelt. Die Niederschlagswässer werden über einen Ölabscheider in einen durch HDPE-Folie abgedichteten Absetzteich geleitet und nach Beprobung mit Tankkraftwagen (TKW) zur Kläranlage abgefahren oder ggf. einer sonstigen externen Entsorgung zugeführt /SCN 12/, /UTH 12/.

3.2.3 Bohrspülung

Als Bohrspülungen bezeichnet man alle während eines Bohrvorganges im Bohrloch kontrolliert zirkulierenden Flüssigkeiten und Gase /DVG 98b/. Man unterscheidet direkte und indirekte Spülungssysteme. Der am häufigsten angewendete direkte Spülungskreislauf ist durch das Einpumpen einer Bohrspülung in den Bohrstrang und das Aufsteigen des Bohrkleins mit der Spülung durch den Ringraum gekennzeichnet (siehe Kap. 3.2.1). Die rheologischen Eigenschaften der Bohrspülung, wie z. B. die Dichte oder die Viskosität, müssen während der Bohrung fortlaufend an die geologischen Verhältnisse angepasst werden /BUJ 11/. Diese Anpassung der rheologischen Eigenschaften erfolgt durch Additive (Spülungszusätze), mit denen die Viskosität, Wasserbindung, Filtrationseigenschaften und die Dichte von Spülungen günstig beeinflusst werden. Den Stand der Technik betreffend der Bohrspülungen, die in Grundwasser führende Schichten eingebracht werden, geben die DVGW-Arbeitsblätter W 115 und W 116 /DVG 98b/, /DVG 08/ wieder. Hiernach dürfen in oberflächennahen Grundwasserleitern nur Additive verwendet werden, die nicht zu mikrobiologischen Folgeproblemen führen. Daher sieht das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) im Regelfall beim Einsatz solcher Stoffe in Bohrungen ein Anzeigeverfahren nach § 49 vor. Es empfiehlt sich, für den gesamten Bohrprozess bakteriologisch einwandfreies Wasser zu verwenden, dadurch werden viele bakteriologische Folgeprobleme in der Bohrspülung verhindert. Die Zulassung der Bohrspülung ist Teil des bergrechtlichen Betriebsplanes für die Bohrungsniederbringung. Während Grundwasser führende Schichten durchbohrt werden, dürfen nur Stoffe zum Einsatz kommen, die im Betriebsplan durch die Bergbehörde zuvor zugelassen wurden. Der Eintrag von Bohrspülung in bereits abgeteufte Bohrabschnitte wird durch unmittelbares Verrohren und Zementieren vermieden. Bohrspülungen sind mit 8 – 10 % der Bohrkosten ein nicht zu unterschätzender Kostenfaktor.

Bohrspülungen übernehmen vielfältige Aufgaben während des Bohrvorganges /BUJ 11/. Sie werden z. B. benötigt zum:

- Entfernen der Bohrkleinteilchen von der Bohrlochsohle und Transport durch den Ringraum an die Oberfläche
- In Schwebehalten des Bohrkleins sowie der Beschwerungsstoffe bei Unterbrechung der Spülungszirkulation

- Erzeugen eines hydraulischen Gegendruckes im Ringraum gegen durchteufte Gesteinsschichten, um das Eindringen von Fluiden (Öl, Gas, Wasser) in das Bohrloch zu verhindern
- Stabilisieren der Bohrlochwand durch den hydraulischen Gegendruck der Bohrspülung
- Isolieren der zu durchbohrenden Horizonte durch Bildung einer Schutzschicht an der Bohrlochwand (Filterkuchen)
- Kühlen und Schmieren von Bohrwerkzeugen und Bohrstrang
- Übertragen der hydraulischen Energie zur Bohrlochsohle zur Bohrlochsohlenreinigung und zum Betrieb von Downhole-Motoren
- Liefern des Auftriebs für den Bohrstrang

Zur Stabilisierung des Bohrloches ist ein Spülungssäulendruck notwendig, der den vom Grundwasser bzw. Formationswasser und Gestein ausgehenden Druck um mindestens 0,2 bar übersteigt /DVG 98b/. Dadurch fließt kontinuierlich Bohrspülung in das anstehende Gestein. Je höher die Durchlässigkeit des Gesteines ist, desto weiter kann die Suspension in diese eindringen. In Kluft- oder Karstaquiferen z. B. kann die Permeabilität wesentlich höher als bei Porenaquiferen sein. Während der Zirkulation und Infiltration der Bohrspülung in das umgebende Gestein verkitten Tonminerale und Additive der Bohrspülung die Klüfte bzw. den Porenraum der durchteuften Gesteine und heften sich an der Bohrlochwand an. Dies führt zur Bildung eines so genannten Filterkuchens. Dieser Filterkuchen stützt die Bohrlochwand und sorgt gleichzeitig dafür, dass Spülungs- oder Filtrat-Verluste ebenso reduziert werden wie der Zufluss von Formationsfluiden in das Bohrloch /BUJ 11/.

In Abhängigkeit des Bohrlochvolumens und der geologischen Randbedingungen kann die Spülmengemenge unter Voraussetzung durchschnittlicher Spülungsverluste zwischen ca. 1.000 bis 4.000 m³ je Tiefbohrung liegen. In geologischen Ausnahmefällen sind Verbrauchsraten bis 10.000 m³ möglich /FRK 07/. Für die Geothermie-Bohrung in Basel wurde ein Spülvolumen auf Wasserbasis pro Bohrung von rund 600 bis 1.000 m³ Wasser veranschlagt /KAI 04/. Die Entnahme von Wasser aus einem oberflächennahen Grundwasserleiter bedarf gemäß Wasserhaushaltsgesetz einer wasserrechtlichen Erlaubnis /FRK 07/.

In stark klüftigen Bereichen oder Karstgebieten besteht die Gefahr, dass es zu hohen Spülungsverlusten und zu Grundwasserverunreinigungen, bzw. -trübungen kommt /BUJ 11/. Der Verlust an Bohrspülung kann bis zu 100 % betragen. In diesen Gesteinsschichten ist ausschließlich Luft oder Wasser in Trinkwasserqualität als Spülungsmedium zu verwenden /TLW 10/. Bei komplettem Spülungsverlust können folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- Zusätzliche Verrohrung in der Verlustzone
- Anpassungen der Spülungszusammensetzung, z. B. mehr Lost Zirkulation Materials
- Umstellung des Spülbohrverfahrens

Wenn diese Maßnahmen keinen Erfolg zeigen, ist das Spülbohrverfahren in diesem Fall nicht anwendbar /DVG 08/.

Die Bildung eines Filterkuchens ist für den Bereich der Lagerstätte, aus der später Thermalwasser gefördert werden soll, nicht erwünscht. Die beste Lösung ist es, mit Unterdruck in die Lagerstätte zu bohren, so dass der Eintrag von Bohrspülung in die Lagerstätte so gering wie möglich gehalten wird. Dieses Verfahren nennt sich „Underbalanced Drilling“ (UBD). Die Verringerung des hydrostatischen Druckes der Bohrspülung auf die Bohrlochwand kann jedoch zu Bohrlochinstabilitäten führen.

3.2.3.1 Bohrspülungs-Systeme

Während des Bohrvorganges werden meist unterschiedliche Gesteinsschichten und Grundwasserstockwerke durchbohrt. Die Bohrspülung muss dann an die jeweiligen hydrogeologischen Bedingungen angepasst werden. Bei den Bohrspülungen unterscheidet man grundsätzlich solche, die auf Basis von

- Frischwasser,
- Salzwasser,
- natürlichen oder synthetischen Ölen,
- Gasen oder Schäumen

hergestellt werden /SPE 13/. Wasserbasierte Spülungssysteme (WbS) sind die am häufigsten verwendeten Spülungen und billiger als Systeme auf Ölbasis (ÖbS) oder synthetischer Basis (SbS). Die ObS und SbS werden auch Inversions-Emulsions-Systeme genannt (Abb. 3.6). Sie basieren auf einer Öl- oder synthetischen Phase (externe Phase) und einer Salzlösung (interne Phase). Inversions-Emulsions-Systeme kommen nur zum Einsatz, wenn spezielle Anforderungen an die Inhibierung (Salz- oder Tonschichten) oder an die Viskosität der Spülung gestellt werden. Im Gegensatz zum Wasser reagieren diese Spülungen nicht mit Ton- oder Salzschieben, wodurch ein Auflösen oder Quellen dieser Schichten verhindert wird. Da Öl wassergefährdend ist, hat in den letzten Jahren ein Umdenken in der E&P-Industrie hin zur Verwendung von schnell abbaubaren biologischen oder synthetischen Ölen stattgefunden. Wasser- und Inversions-Emulsions-Systeme können so eingestellt werden, dass sie auch bei relativ hohen Temperaturen im Bohrloch stabil sind. Gasspülungen werden am häufigsten in Bereichen eingesetzt, bei denen die Gefahr einer Schädigung des Gesteines und der Verlust an Bohrspülung hoch ist.

Für die in diesem Bericht dargestellten Untersuchungen werden nur Bohrspülungen auf Wasserbasis betrachtet. Bohrspülungen können anhand der dominierenden Additive unterschieden werden (Abb. 3.6) /SPE 13/.

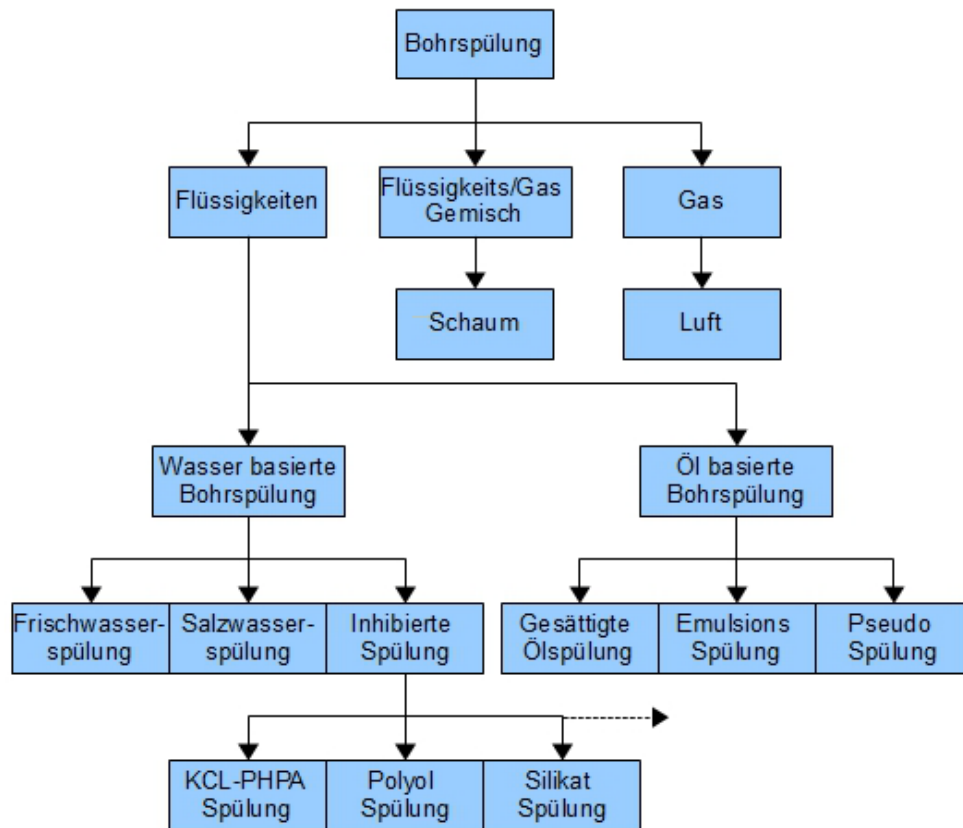


Abb. 3.6 Schematische Darstellung der verschiedenen Bohrspülungssysteme /ASM 04/

Die klassischen Bohrspülungen sind Tonsuspensionen, bestehend aus Süßwasser und speziellen Spülungstonen. Tonsuspensionen aus Bentonit werden am häufigsten eingesetzt und sind am umweltfreundlichsten /FIC 09/. Durch die Zugabe von Tonmineralen in die Bohrspülung werden die Viskosität und damit die Tragfähigkeit für den Bohrkleintransport verbessert. In einigen Fällen ist die Verwendung von Bentonit nicht möglich oder unerwünscht. In diesem Fall werden für die Erhöhung der Stabilität und des Bohrkleintransportes der Bohrspülung Polymere (natürliche, halb- und synthetische) zugesetzt. Polymere sind so genannte Monomere, die sich untereinander zu langen Kettenmolekülen verbinden können und somit Makromoleküle bilden. Durch die starke Wasseraufnahmefähigkeit der Polymere wird freies Wasser gebunden und die Viskosität der Spülung erhöht /LAS 10/. Die Abb. 3.7 zeigt die zunehmende Komplexität der Spülungszusammensetzung mit der Bohrtiefe. In oberflächennahen Schichten wird häufig mit einer Tonspülung begonnen. Danach folgen dispergierte und inhibierte Polymer-Spülungen. Da mit zunehmender Tiefe die Temperaturen steigen, werden temperaturbeständige Polymere eingesetzt. Zudem wird häufig Bohrspülung auf Basis von Salzwasser verwendet. Salzwasser verhindert beim Durchteufen von Salzschichten den Laugungseffekt. Während des letzten Bohrabschnittes in der Lagerstätte wird

in der Regel eine Spülungszusammensetzung verwendet, die die Lagerstätte nicht schädigt.

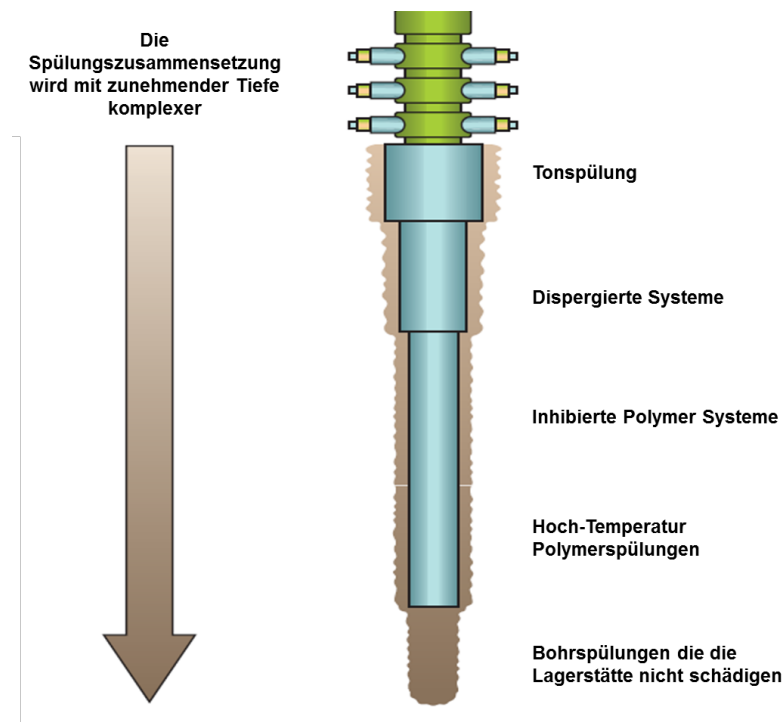


Abb. 3.7 Anforderungen an die Zusammensetzung Wasserbasierte Bohrspülungen in Abhängigkeit der Tiefe (verändert nach /OGP 09/)

3.2.3.2 Bohrspülungsadditive

Während des Abteufens der Bohrung werden der Bohrspülung Additive zugemischt, um bestimmte Fluideigenschaften zu erzielen. Welche Zusatzstoffe eingesetzt werden, hängt im Wesentlichen von den geologischen bzw. hydraulischen Verhältnissen und dem geochemischen Milieu bzw. Druck- und Temperaturverhältnissen im Untergrund ab (Abb. 3.7). Bei Tiefengeothermie-Bohrungen werden, da höhere Temperaturen als bei Bohrungen der E&P-Industrie erreicht werden, temperaturbeständige Additive eingesetzt.

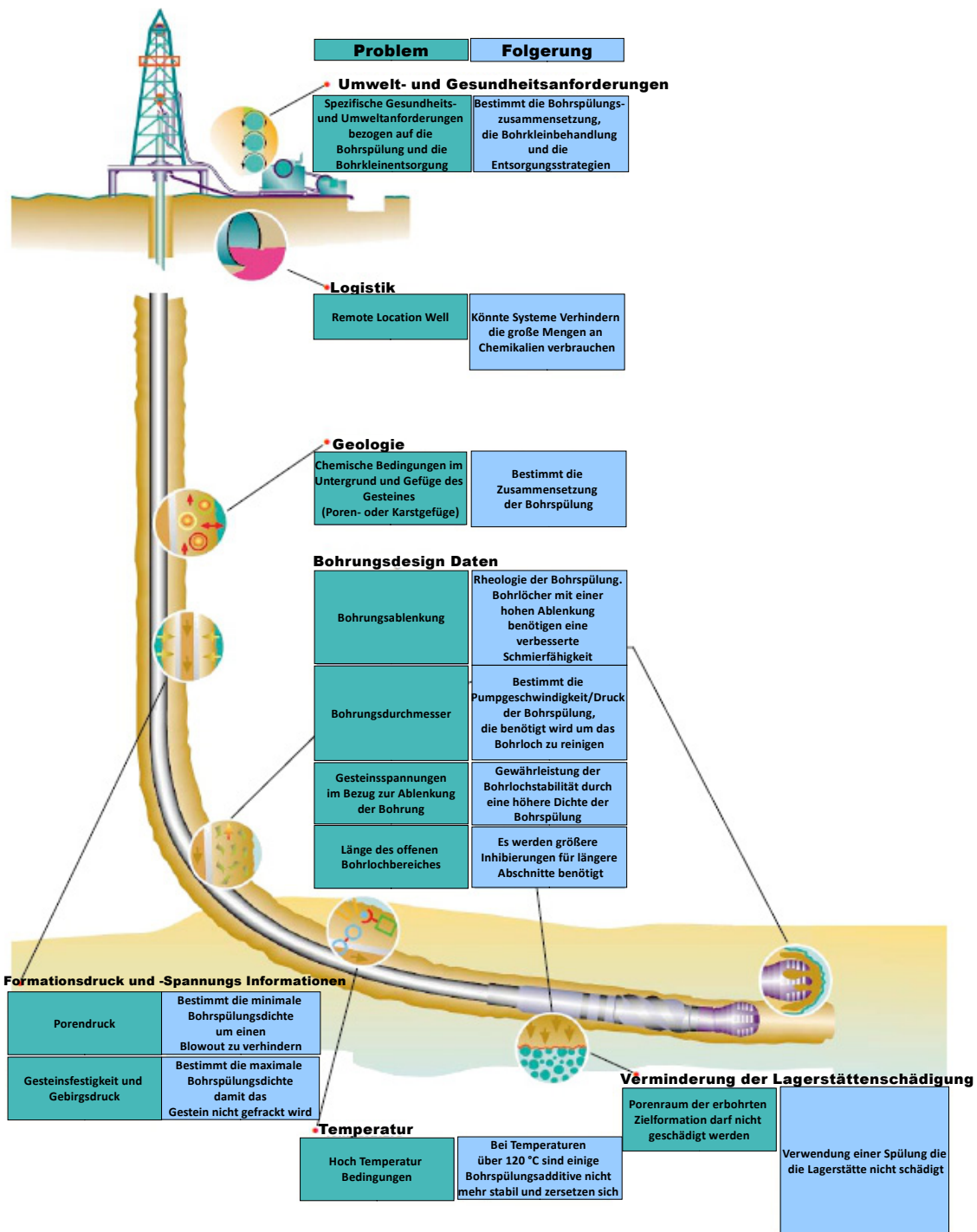


Abb. 3.8 Prozesse, die die Zusammensetzung der Bohrspülung beeinflussen (verändert nach /BLO 94/)

Der pH-Wert der Bohrspülung sollte im basischen Bereich liegen. Ein basischer pH-Wert unterdrückt die Korrosion der Bohrausrüstung, minimiert die Wasserstoffversprödung des Stahls, wenn Schwefelwasserstoff zutritt, und verbessert die Löslichkeit von Additiven /REI 96/. Zudem wird der Quellungsprozess des Bentonits verbessert (siehe Stoffbeschreibung im Anhang).

Wenn beim Bohren sehr permeable Gesteinsschichten wie z. B. Karst angebohrt werden, kann es zu einem verstärkten Abfließen der Bohrspülung kommen. Die Filtrationssteuerung der Bohrspülung in das umliegende Gestein ist deshalb eine wichtige Eigenschaft. Das Bohrfluid muss in der Lage sein, schnell einen Filterkuchen zu bilden, damit der Fluidverlust effektiv minimiert wird. Der Filterkuchen muss aber zudem dünn und erodierbar genug sein, um ihn nach dem Bohrvorgang wieder entfernen zu können, da ein direkter Kontakt zwischen anstehendem Gestein, Ringraumzement und der Verrohrung gewährleistet sein muss. Wenn während des Bohrvorganges Bohrspülungsverluste auftreten, werden Spülungsverlustmaterialien (Lost Circulation Materials) eingesetzt, um die die Verlustzone zu schließen (siehe Stoffbeschreibung im Anhang).

Zur Erhöhung des spezifischen Gewichtes der Bohrspülung werden Beschwerungsmitel eingesetzt. Durch die Erhöhung des spezifischen Gewichtes der Spülung erhöht sich der Druck auf die Bohrlochwand. Dadurch wird ein Einbrechen der Bohrlochwand verhindert. Zudem werden drückende Formationsfluide vom Eindringen in das Bohrloch gehindert /DVG 98b/. Die Dichte bzw. das hydrostatische Gewicht der Spülung sind abhängig vom lithostatischen Druck, den Fluiddrücken in den Gesteinsschichten und den Spannungen im Untergrund (siehe Stoffbeschreibung im Anhang).

Wenn tonige Gesteinsschichten angebohrt werden, kann der einsetzende Quellungsprozess bei Kontakt mit Wasser den Ringraumquerschnitt signifikant verringern, was zu einem Festsetzen des Bohrgestänges oder zu Bohrlochinstabilitäten führt. Zudem ist die Quellung von Tonen in der Lagerstätte nicht erwünscht, da sich dadurch der Porenraum bzw. die Durchlässigkeit des Gesteines verringert. Um das Quellen von Tonen zu verhindern, werden der Bohrspülung Toninhibitoren zugemischt. Toninhibitoren sollen zudem einer Tonmineralverlagerung vorbeugen (siehe Stoffbeschreibung im Anhang).

Beim Durchbohren von gasführenden Gesteinsschichten können sich die Gase in der Bohrspülung lösen. Zu den Gasen gehören z. B. Kohlendioxid oder Schwefelwasserstoff. Diese Gase können Korrosionsprozesse in Bauteilen wie dem Bohrgestänge und der Verrohrung hervorrufen. Zudem werden Anlagenbauteile durch die Zugabe von Säuren bei der Säurestimulation angegriffen. Dies kann zum Versagen der Bauteile führen. Um den Korrosionsprozess zu unterbinden, werden den Prozessfluiden häufig Korrosionsinhibitoren zugemischt. Eine detailliertere Beschreibung der Stoffgruppen befindet sich im Anhang.

3.2.4 Bohrloch-Logging

Nach jedem Bohrabschnitt wird das Bohrgestänge gezogen, und es werden detaillierte teufenbezogene Messwerte aufgezeichnet. Dazu können verschiedene Logging-Verfahren angewendet werden, z. B. zur Messung der Bohrlochoberfläche, der Spannungsorientierungen im Gestein, des Porendruckes, des Temperaturgradienten, der Gesteinsporosität und der Mächtigkeit der Gesteinsschichten. Die Vielzahl an Messungen wird im Wesentlichen zur Auslegung der Verrohungsmaterialien und der Zementation benötigt. Zudem können problematische Schichten (z. B. Kohlenwasserstoffführende Schichten) identifiziert und gegenüber anderen Schichten abgedichtet werden.

Basierend auf kernphysikalischen, akustischen, elektrischen, elektromagnetischen und sonstigen Verfahren können folgende Parameter bestimmt werden (für detailliertere Informationen siehe /SCI 09/):

- Druck
- Temperatur
- Lage des Wasserspiegels
- Bohrlochdimensionen (Kalibermessung)
- Variation des elektrischen Widerstandes – Resistivity Logs
- Variation der elastischen Eigenschaften – Sonic Logs
- Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide – γ -Log
- Magnetische Eigenschaften – Magnetic Field Log, Magnetic Susceptibility Log
- Eigenschaften des Bohrloch Fluids – Mud-Logging
- Nukleare Magnetische Resonanz (NMR)
- Gesteinsfestigkeit, Spannungsfeld – Hydro-Frac
- Probennahme (Fluid und Gestein)

3.2.5 Bohrrisiken

Geotechnische Risiken bei Tiefengeothermie-Bohrungen treten verstärkt in Regionen mit hohen Scherspannungen im Untergrund auf. Kritische Regionen sind z. B. das Al-

penvorland und der Oberrheingraben. In diesen Regionen treten häufig an Bruch- und Störungszonen hohe Scherspannungen auf. Wenn diese Scherspannungen den Bruchwiderstand des Gesteines übertreten, dann kann das Gestein versagen, und es findet eine Scherbewegung entlang einer Scherfläche statt. Wenn eine Bohrung direkt durch eine Störung abgeteuft wird, kann durch Scherbewegungen die Bohrung oder die Verrohrung beschädigt werden, was im schlimmsten Fall zur Aufgabe der Bohrung führen kann. Eine detaillierte Modellierung des Spannungsfeldes kann kritische Störungen und Gleitebenen identifizieren und somit zur Optimierung des Bohrverlaufes und der Verrohrung dienen /HUE 10/. Die Bohrrisiken steigen zudem mit der Ablenkung der Bohrung. Im Folgenden sind beispielhaft Bohrrisiken aufgelistet /SPR 07/:

- Anbohren von gespannten oder artesischen Gesteinsschichten oder Gasblasen (Kick im Ringraum)
- Differential Pressure-Sticking, aufgrund von hohen Druckunterschieden zwischen der Bohrspülung und Formationsfluiden wird das Bohrgestänge an die Bohrlochwand gedrückt und verklemmt
- Unachtsames Verbinden mehrerer Grundwasserstockwerke mit unterschiedlichen hydraulischen Drücken
- Hoher Verlust an Bohrspülung in das umgebende Gestein, z. B. im Karst (Zusammenbrechen der Bohrlochwand)
- Problematische Bohrlochstabilität aufgrund von nicht konsolidierten Sedimenten oder kritischen Scherspannungen kann zum Einbruch des Ringraumes und zur Aufgabe der Bohrung führen
- Auftreten von Bruchzonen (Zerschering der Bohrung)
- „Key-Seat“-Bildung, Ausbeulen der Bohrlochwand (Verklemmen des Bohrgestänges)

Das Anbohren gespannter Gesteinsschichten (Arteser) kann zum unkontrollierten Aufsteigen der Bohrspülung im Ringraum führen (Kick), wenn die Bohrspülung nicht rechtzeitig an die veränderten Druckverhältnisse angepasst wird.

Kurz vor Erreichen der thermalen Lagerstätte wird unter ausgeglichenen Druckverhältnissen gebohrt (underbalanced Drilling), um einen Eintrag von Bohrklein in die Lagerstätte so weit wie möglich zu reduzieren. Deshalb reagiert das System sehr sensitiv auf

Druckveränderungen /BUJ 11/. Ein Kick im Ringraum kann zudem durch die Veränderung der Spüldichte aufgrund der Ausfällung dispergierter Tonminerale hervorgerufen werden. Dies führt im ungünstigsten Fall zum Austritt heißer Thermalwässer an der Oberfläche (Blow-Out). Für tiefe Bohrungen ist die Verwendung eines Blow-Out Preventers am Bohrlochkopf vorgeschrieben. Dieser kann bei einem Kick im Ringraum durch das Anbohren unter Druck stehender Fluide umgehend geschlossen werden. Die meisten Risiken führen nicht zu negativen Umweltauswirkungen, sondern zu wirtschaftlichen Verlusten.

Viele Bohrfirmen haben ein eigenes Sicherheitsmanagementsystem aufgebaut. Dieses so genannte SCC-System (Sicherheits-Zertifikat Kontraktoren), englisch: Safety Certificate Contractors, ist ein Regelwerk für ein zertifizierbares Managementsystem. Es wurde in der Petrochemie für Unternehmen entwickelt, die als Subunternehmer (Kontraktoren) tätig werden wollen, und vereinigt Belange aus (Arbeits-)Sicherheit, Gesundheits- und Umweltschutz (SGU). Es ist also ein kombiniertes Arbeits- und Umweltschutzmanagementsystem. Die Zertifizierung erfolgt anhand eines Fragenkatalogs. Für kleine Unternehmen bis 35 Mitarbeiter und ohne Subunternehmer (Unterkontraktoren) kann eine eingeschränkte Zertifizierung erfolgen, für die übrigen müssen alle Fragen beachtet werden. Für Personaldienstleister gelten noch mal andere Anforderungen. Die Zertifizierung erfolgt durch akkreditierte Auditoren anhand eines Fragenkataloges, der in 10 Kapitel untergliedert ist /WIK 13/:

1. SGU-Politik und Organisation / SGU- Engagement des Managements
2. Gefährdungsermittlung und -bewertung
3. Personalauswahl
4. Information und Ausbildung
5. SGU-Kommunikation
6. Regeln, Vorschriften, Projektsicherheitsplan
7. SGU-Inspektionen
8. Betriebliches Gesundheitswesen
9. Einkauf und Prüfung der Materialien, Geräte und Leistungen
10. Meldung, Registrierung und Analyse von Unfällen / Beinahe Unfällen und unsicheren Situationen

Durch die Realisierung der oben genannten Punkte lässt sich der größte Teil von Bohrrisiken und dadurch resultierenden Gefahren für Mensch und Umwelt vermeiden.

Ein weiterer Punkt bei der Vermeidung von Bohrrisiken ist eine gute Vorerkundung. Wenn die zu erwartenden Schwierigkeiten bekannt sind, lassen sich im Vorfeld Gegenmaßnahmen bzw. angepasste Bohrkonzepte entwickeln. In den meisten Fällen kommt es jedoch auch bei einer guten Vorplanung zu unvorhersehbaren Schwierigkeiten, die für erfahrene Bohrfirmen in der Regel gut zu bewerkstelligen sind.

3.2.6 Unterschiede bei Bohrungen der E&P-Industrie und der Geothermie

Die wesentlichen Unterschiede zwischen konventionellen Erdöl- und Erdgasbohrungen und Tiefengeothermie-Bohrungen liegen in den erbohrten Gesteinsschichten und damit in den anzutreffenden Lagerstättenfluiden, Gesteinseigenschaften, Drücken und Temperaturen. Da in Deutschland ausschließlich Niedrigenthalpie-Lagerstätten zur geothermalen Nutzung wirtschaftlich erschließbar sind, werden hohe Förderraten benötigt, um ausreichend Energie im Wärmetauscher der Geothermieanlage umzusetzen. Um den hydraulischen Widerstand bei diesen hohen Förderraten in Grenzen zu halten, werden allgemein größere Bohrlochdurchmesser als in der E&P-Industrie benötigt. Damit steigen auch die Bohrkosten, da mit einem größeren Bohrlochdurchmesser auch Mehrkosten bei der Bohrspülung, der Bohranlage, der Verrohrung und der Zementierung entstehen (siehe Kap. 2.4.3.1). In der Regel werden die Kohlenwasserstoffe bei Erdöl/Erdgasbohrungen durch eine Bohrung zumindest bei Gaslagerstätten eruptiv gefördert. Für den Betrieb einer Geothermieanlage werden zwei Bohrungen benötigt. Für das Geothermie-Projekt in Insheim (Oberrheingraben) wurden sogar drei Bohrungen erstellt. Im Gegensatz dazu sieht die unkonventionelle Gasförderung stets mehr Bohrungen vor, um die Tight - oder Shale-Gas Vorkommen zu erschließen. Zu diesem Zweck sollen von einem Bohrplatz mehrere Bohrungen (Cluster Bohrplatz) abgeteuft werden. Geothermie-Bohrungen liegen in der Regel tiefer als E&P-Bohrungen. Dadurch werden höhere Anforderungen an die Bohrspülung aufgrund der höheren Temperaturen und Drücke gestellt. Dies spiegelt sich in den Kosten wieder. Um die hohen Förderraten bei Geothermie-Bohrungen zu erreichen, müssen Gesteinsschichten mit einer ausreichenden hydraulischen Durchlässigkeit erbohrt werden. Hohe Fließraten liegen erfahrungsgemäß in tektonisch aktiven Gesteinsschichten und Bruchzonen vor. Dadurch steigt aber das Bohrrisiko, z. B. aufgrund von Bohrlochinstabilitäten.

Im Gegensatz dazu ist man bei Erdöl/Erdgasbohrungen nicht darauf angewiesen, diese Bereiche zu erbohren, und sie werden meisten auch bewusst gemieden.

Ein nicht zu unterschätzender Punkt ist die Wahrnehmung in der Öffentlichkeit. Geothermieanlagen müssen in der Regel zur Abnahme der Fernwärme in Verbrauchernähe erstellt werden. Aus der Verbrauchernähe resultieren hohe Emissionsschutzanforderungen (z. B. Lärm, Schadstoffe, Vibrationen). Erdöl/Erdgasbohrungen sind nicht darauf angewiesen und werden meistens weiter entfernt von Siedlungen erstellt. In Tab. 3.1 sind die bohrtechnischen Unterschiede nochmals zusammengefasst.

Tab. 3.1 Vergleich von konventionellen Erdöl/Erdgas- und Geothermie-Bohrungen /FIC 09/, /SAS 09/

| Parameter | Erdöl/Erdgasbohrungen | Geothermie-Bohrungen |
|----------------------|--|---|
| Bohrkosten | 30 % der Gesamtkosten | 42 - 70 % der Gesamtkosten |
| Bohrdurchmesser | Kleiner Bohrdurchmesser | Großer Bohrlochdurchmesser |
| Anzahl der Bohrungen | Förderung der Kohlenwasserstoffe durch eine Bohrung | Zwei Bohrungen zur Förderung und Reinjektion. |
| Bohrtiefe | ca. 3.000 m | ca. 4.500 m |
| Förderung | Eruptive Förderung und Einsatz von Pumpen | Einsatz von Pumpen |
| Förderraten | Geringe Produktionsraten (<< 1.000 m ³ /d, Ausnahme Gasbohrungen) | Hohe Produktionsraten (> 8.000 m ³ /d) |
| Temperaturbereich | Temperaturen bis 150 °C | Temperaturen bis 170 °C in Deutschland |
| Geologie | Erschließung tektonisch stabiler Gesteinsschichten (Vermeidung von Bruchzonen) | Erschließung tektonisch aktiver Gesteinsschichten und Bruchzonen (höheres Bohrrisiko) |
| Bohrspülung | Mittlere Temperaturbeständigkeit | Hohe Temperaturbeständigkeit, durch den höheren Bohrlochdurchmesser erhöht sich auch die Menge an Bohrspülung |
| Standort | Fern von Siedlungsgebieten | Hohe Emissionsschutzanforderungen (z. B. an Lärm) durch Nähe an Verbraucher zur Wärmeauskopplung |

3.3 Stimulationsmaßnahmen

3.3.1 Einführung

In der Öffentlichkeit wird die Erschließung und Förderung von unkonventionellen Gasvorkommen durch Fracking-Verfahren derzeit hinsichtlich der Risiken für Mensch und Umwelt kontrovers diskutiert. Dies lenkte den Blick auch auf die Geothermiebranche, in der ebenfalls Stimulationsmaßnahmen angewendet werden. Die Technologie wurde von der E&P-Industrie übernommen und an die Bedürfnisse der Geothermie adaptiert. Im Folgenden wird daher näher auf diese Technologie eingegangen, um die Unterschiede zwischen der E&P-Industrie und der Tiefengeothermie herauszustellen und mögliche Risiken zu identifizieren.

Die Wirtschaftlichkeit eines Geothermie-Projektes in Deutschland ist von einer ausreichend hohen Temperatur in der Lagerstätte, aber aufgrund der niedrigen Thermalwassertemperaturen auch signifikant von der Förderrate bzw. der Wärmeentnahmemenge, abhängig. Die Förderrate wird durch die hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit bestimmt, die wiederum von der Größe sowie der Vernetzung der Poren, Klüfte und Karsthohlräume im Speichergestein abhängt. Um die Durchlässigkeit zwischen der Injektions- und Produktionsbohrung zu erhöhen, wird die Lagerstätte stimuliert, um einen wirtschaftlich nutzbaren Wärmetauscher zu erhalten (Abb. 3.9). Durch Stimulationsmaßnahmen können zudem sekundäre Ablagerungen in der Bohrung aber auch im Porenraum der Lagerstätte beseitigt werden. Alle Stimulationsmaßnahmen dienen dazu, die Wirtschaftlichkeit der Gewinnung durch Erhöhung des Wasserdurchflusses zu verbessern.

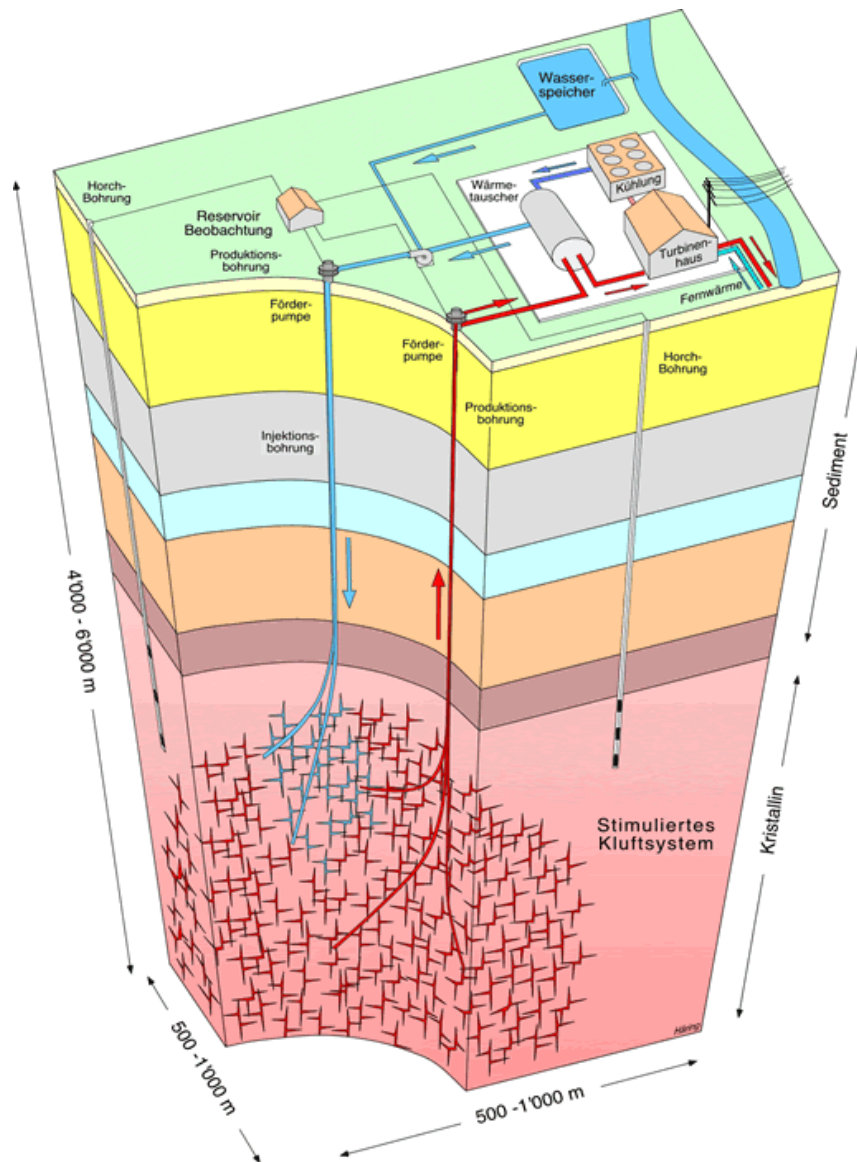


Abb. 3.9 Schematische Darstellung eines geothermalen Wärmetauschers
/BAS 04/

Um die Gebirgsdurchlässigkeit in der Lagerstätte (Speichergestein) zu erhöhen, werden vorhandene Klüfte und Spalten mit hohem hydraulischem Druck erweitert und hydraulisch miteinander verbunden (hydraulische Stimulation) oder durch Säuren erweitert (chemische Stimulation). Die chemische Stimulation wird zudem eingesetzt, um Reststoffe der Bohrspülung und der Zementation im bohrlochnahen Bereich zu entfernen. Dies erleichtert das Einfließen des Stimulationsfluides bei späteren Stimulationsmaßnahmen. Eine Übersicht der verschiedenen Stimulationsverfahren gibt Abb. 3.10.

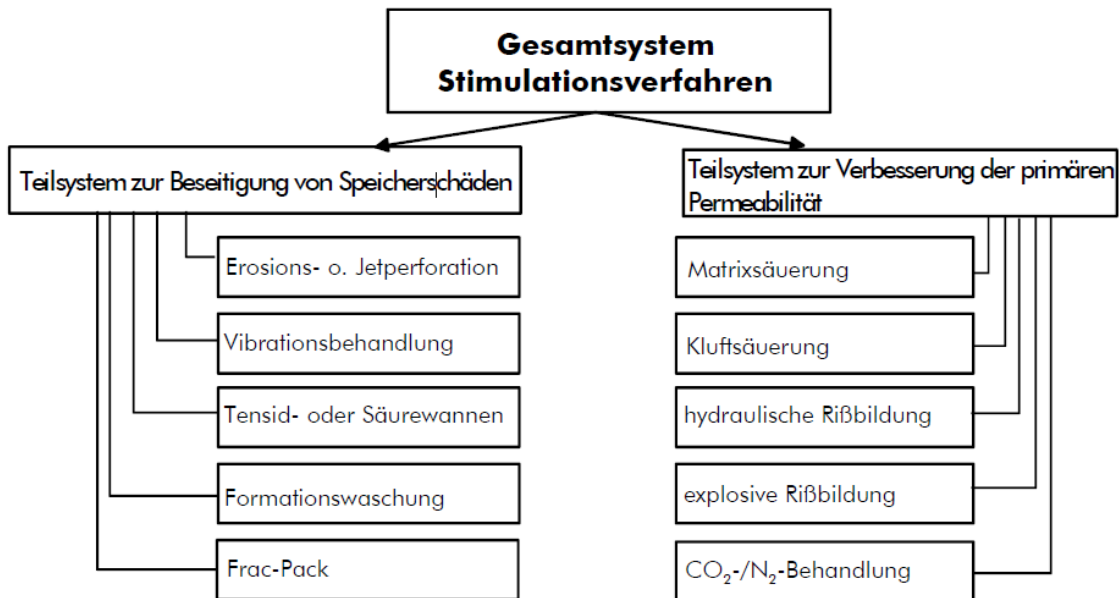


Abb. 3.10 System der zweckbezogenen Zuordnung der Stimulationsverfahren
/WOL 12/

Für hydraulische und chemische Stimulationsmaßnahmen gibt es in der E&P-Industrie eine Vielzahl an Stoffen und fertigen Stoffgemischen. Diese werden aber nur bedingt in der Geothermiebranche angewendet bzw. wurden für die Stimulation geothermischer Lagestätten optimiert. Informationen zu verwendeten Stoffen in Stimulationsfluiden wurden der Literatur des Forschungsprojektes Neustadt-Glewe sowie Geothermie-Projekten im Molassebecken entnommen. Diese wenigen Informationen können aber nur als Beispiele dienen und sind für detaillierte Risikoeinschätzungen zu geothermischen Stimulationsvorhaben nicht ausreichend. Stimulationsfluide werden nach dem verwendeten Trägerfluid in vier Gruppen unterteilt /FIN 12/, /MEI 12b/:

1. **Wasserbasierte Systeme:** Häufig werden Gele zur Erhöhung der Viskosität und zur Verbesserung des Stützmitteltransports eingesetzt; Slickwater-Fluide sind ebenfalls wasserbasierte Fluide, die durch Zusatz von Reibungsvermindernern für hohe Pumpraten bei niedriger Fluid-Viskosität und damit relativ geringer Stützmittel-Konzentrationen optimiert sind.
2. **Schaumbasierte Systeme:** Sie bestehen aus einer Wasser-Gas-Emulsion. Es kommen Inertgase wie Stickstoff (N₂) oder Kohlendioxid (CO₂) mit Schaumbildnern zum Einsatz.
3. **Ölbasierte Systeme:** Sie werden in wasserempfindlichen Gesteinen mit quellfähigen Tonmineralen eingesetzt.

4. **Säurebasierte Systeme:** Sie dienen der Hohlräumerverweiterung in gering permeablen, säurelöslichen Gesteinen wie Kalkstein oder Dolomit.

In der Geothermie kamen bislang größtenteils nur wasserbasierte Stimulationsfluide (Wasser-Frac) zum Einsatz. Schaumbasierte Systeme werden in der Regel nur bei niedrigen Drücken in Gesteinen mit Teufen von weniger als 1.500 m eingesetzt /MEI 12b/, deshalb kommt dieses Verfahren in der Tiefengeothermie nur vereinzelt zum Einsatz /GEO 12/.

Das Stimulationsfluid nimmt immer den Weg des geringsten Widerstandes. Deshalb müssen die zu stimulierenden Bereiche durch Packer von den höher permeablen Bereichen isoliert werden, da das Stimulationsfluid sonst nur durch die höher permeablen Bereiche fließen und keine Risse erzeugen würde. Eine gute Vorplanung der zu stimulierenden Bereiche, durch die Auswertung der Bohrlochloggings, ist deshalb von großer Bedeutung.

In /PIN 07/ werden zur Maximierung der Produktion von Wärmeenergie aus einer geothermalen Lagerstätte folgende Teilziele genannt:

- Maximierung des Kontaktbereiches zwischen dem heißen Gestein und dem Zirkulationfluid
- Maximierung der räumlichen Ausdehnung und der Durchlässigkeit des Kluftnetzes
- Minimierung oder Beseitigung von Kurzschlüssen zwischen dem Zirkulationsfluid und dem Kluftnetz

Nach der Stimulation wird ein Teil des Stimulationsfluids zurück an die Oberfläche gepumpt. Ein geringer Anteil verbleibt im Untergrund. Die Art und Menge der verwendeten Additive in den im Untergrund verbleibenden Stimulationsfluiden sind stark von der Lokalität bzw. der Lagerstätte abhängig und können nicht gänzlich vorhergesagt werden /UBA 11/.

3.3.2 **Hydraulische Stimulation**

Das hydraulische Stimulationsverfahren ist eine Methode der geologischen Tiefbohrtechnik, bei der durch Einpressen einer Flüssigkeit in eine durch Bohrung erreichte

Erdkrustenschicht Risse erzeugt und stabilisiert werden. Ziel ist es, die Permeabilität (Durchlässigkeit) und somit die Produktivität einer Lagerstätte so zu erhöhen, dass ein wirtschaftlicher Abbau von Bodenschätzen ermöglicht wird (Zitat aus /WIK 14/).

Um die Permeabilität (hydraulische Durchlässigkeit) einer geothermalen Lagerstätte zu erhöhen, kann diese hydraulisch stimuliert werden. Dazu wird ein Stimulationsfluid mit hohem Druck in das Speichergestein eingepresst. Die Verbesserung der Permeabilität erfolgt durch zwei Prozesse:

- Erweiterung vorhandener Klüfte
- Neubildung von Klüften

Das Stimulationsfluid verteilt sich im Speichergestein bevorzugt entlang von vorhandenen Klüften. Diese werden auch zuerst geweitet, wenn der Injektionsdruck im Speichergestein größer ist als die Normalspannung des umgebenden Gesteines, die senkrecht auf die Kluft wirkt (Abb. 3.11).

Die Neubildung von Klüften erfolgt bevorzugt an vorhandenen Schwächezonen im Gestein, dies können z. B. verheilte Klüfte sein. Zur Neubildung der Klüfte ist in der Regel ein etwas höherer Injektionsdruck als zur Erweiterung von Klüften nötig, weil zusätzlich noch die adhäsiven Kräfte der Gesteinsminerale untereinander überwunden werden müssen. Die Ausbreitungsebene der Risse steht in der Regel senkrecht zur Richtung der minimalen Hauptspannung. Da im Normalfall eine der beiden horizontalen Hauptspannungen die minimale Hauptspannung ist, verlaufen die Risse meistens vertikal. Für detailliertere Informationen siehe /LEG 03a/.

Bei durchgeführten Stimulationsmaßnahmen in Deutschland wurden Bohrlochkopfdrücke von unter 100 bis ca. 400 bar erreicht, in Abhängigkeit von den geologischen und tektonischen Gegebenheiten /GTV 11/. Es können sich Klüfte von 50 bis zu mehreren 100 m Länge bilden und bis zu 10 mm weit öffnen /HUE 10/.

Für hydraulische Stimulationsmaßnahmen muss ein großes Wasservolumen auf dem Bohrplatz verfügbar sein. Die benötigte Wassermenge ist abhängig von der Lagerstätte und liegt in Größenordnungen zwischen 30.000 und 250.000 m³ /FRK 07/. Für Stimulationsmaßnahmen während des Geothermie-Projektes in Basel wurde eine Injektionsrate von bis zu 50 l/s veranschlagt. Bei Dauerbetrieb entspricht dies einem täglichen Be-

darf von rund 4.400 m³. Insgesamt wurde für den vorgesehenen Zeitraum von zwei Wochen mit einem Wasserbedarf von ca. 50.000 m³ gerechnet /KAI 04/.

Nach den Stimulationsmaßnahmen baut sich der Fluidruck im Speichergestein wieder ab, und die Klüfte kehren in ihre Ausgangsposition zurück. Dadurch verschlechtert sich die Permeabilität im Speichergestein wieder. Damit die Permeabilität des Speichergesteines nachhaltig verbessert wird, müssen die Klüfte offengehalten bzw. gestützt werden. Dies geschieht ganz wesentlich durch den natürlichen Prozess des Kluftversatzes. Durch das Einbringen von Stützmitteln wie Quarzsand können die Klüfte zudem technisch offengehalten werden.

Der natürliche Prozess des Kluftversatzes tritt insbesondere in Regionen mit Scherspannungen auf. Durch den Injektionsdruck werden vorhandene Klüfte und Spalten geöffnet und aufgrund der Scherspannung leicht versetzt. Dadurch passen die Trennflächen nach der Stimulation nicht mehr exakt aufeinander und weisen eine höhere Durchlässigkeit auf als vor der Stimulation (Abb. 3.11). Durch den plötzlichen Versatz der Trennflächen, können seismische Ereignisse ausgelöst werden. In einem solchen Spannungsregime kann mit reinem Wasser ohne Stützmittel stimuliert werden. Der Oberrheingraben ist ein Beispiel, wo dieser Prozess zum Tragen kommt.

Wenn die Scherspannungen sehr gering sind, so dass kein Versatz der Rissflächen zu erwarten ist und die Risse sich wieder schließen könnten, kann der Einsatz von sogenannten Stützmitteln, wie z. B. Sand, zielführend sein /GTV 11/. Der Sand füllt die entstandenen Klüfte aus und hindert sie daran, sich wieder zu schließen.

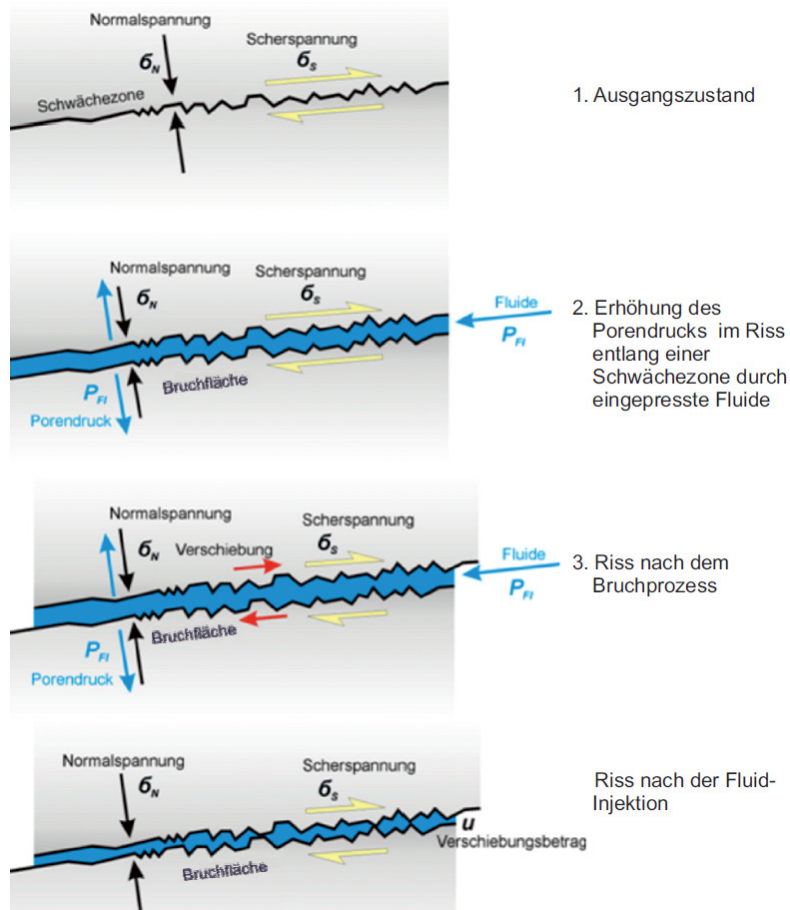


Abb. 3.11 Vereinfachte Darstellung des Kluft-Öffnungsprozesses - Um die Kluftweite nach Stimulationsende beizubehalten, kann dem Stimulationsfluid z. B. Sand zugemischt werden, der sich zwischen den Trennflächen ablagert /AND 12/

Abb. 3.12 zeigt Konzepte zur hydraulischen Anbindung von Injektions- und Förderbohrung. Das ursprüngliche in Los Alamos (USA) entwickelte Hot-Dry-Rock-Konzept sah vor, zwei Tiefbohrungen durch hydraulisch erzeugte Gesteinsrisse zu verbinden und auf diese Weise einen großflächigen unterirdischen Wärmetauscher zu schaffen. Dieses Konzept wurde optimiert. Das heißt, es wird mittlerweile nicht mehr versucht, eine direkte Verbindung der beiden Bohrungen zu schaffen, sondern indirekt über das natürliche Kluftsystem. Dies hat den Vorteil, dass durch das Kluftsystem ein größerer Wassereinzugsbereich erschlossen werden kann /SCS 09/.

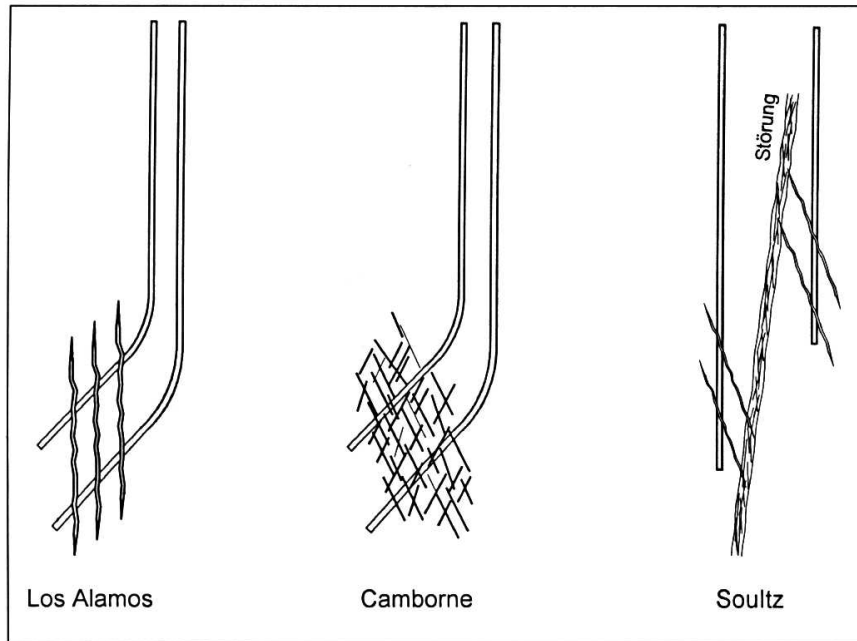


Abb. 3.12 Verschiedene konzeptuelle Modelle von Forschungsvorhaben zur hydraulischen Verbindung einer Injektions- und Förderbohrung durch das natürliche vorhandene Kluftsystem /TEN 03/ - Von links nach rechts: Los Alamos (USA), Camborne (Großbritannien), Soultz-sous-Forêts (Frankreich)

Hydraulische Stimulationsmaßnahmen können in mehrere Verfahrensschritte untergliedert werden /MEI 12b/:

1. Um die Stimulation durchführen zu können, benötigt man einen perforierten Bereich in der Verrohrung; wenn die Stimulation nicht im unverrohrten „open hole“ Bereich oder durch eine vorher eingebrachte gelochte Verrohrung durchgeführt wird, muss die Verrohrung z. B. durch genau platzierte Sprengladungen perforiert werden. Zudem muss der zu stimulierende Bohrabschnitt durch Packer isoliert werden.
2. Säuerungs-Phase (acid stage): Durch die Säuerung wird der Porenraum im bohrlochnahen Bereich von Zementrückständen, Karbonaten und ausgefallenen Mineralen befreit. Zudem findet eine Öffnung bzw. Erweiterung bereits vorhandener Klüfte im Nahbereich der Bohrung statt, dadurch wird das Einfließen des Stimulationsfluides in die Lagerstätte erleichtert (10-er m Maßstab um die Bohrung).

3. Füll-Phase (pad stage): Das Stimulationsfluid (in der Regel Wasser) wird durch stufenweise Druck- und Mengensteigerung eingepresst. Aufgrund der geringen Viskosität kann das Wasser weit in die Lagerstätte eindringen. Die Erweiterung der Klüfte ist nicht so hoch wie bei hochviskosen Stimulationsfluiden. Die künstliche Rissbildung wird dadurch eingeleitet und propagiert (100-er m-Maßstab um die Bohrung).
4. Stütz-Phase (prop stage), optional: Je nach Gesteinsschicht kann eine Zugabe eines Stützmittels in die Suspension die Gebirgsdurchlässigkeit günstig beeinflussen. In der Stützphase soll ein gleichmäßiges Füllen der Risse mit dem Stützmittel erreicht werden.
5. Spül-Phase (flush stage), optional: Durch Wasserzugabe und/oder den Einsatz von Breakern wird restliches Stützmittel und Stimulationsfluid aus der Bohrung und der Lagerstätte gespült.

3.3.2.1 Stimulationsfluid (Hydraulische Stimulation)

Die Injektion des Stimulationsfluides in die Lagerstätte kann aufgrund der unterschiedlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften des Stimulationsfluides und der Tiefenfluide zu unerwünschten chemischen Reaktionen führen. Das Stimulationsfluid muss deshalb durch Additive auf die chemischen Bedingungen in der Lagerstätte eingestellt werden. Folgende Punkte sollten laut /HUE 04a/ bei der Stimulation vermieden werden:

- Chemische/mechanische Destabilisierung von Tonmineralen in der Lagerstätte, vor allem Vermeidung von Tonmineralquellung
- Lösung bzw. Ausfällung von Mineralen in Folge der veränderten p-, Eh-, pH-, T-, Konzentrations-Bedingungen (Eisenhydroxide, Karbonate, Sulfate)
- Schädigung der Bohrlochwand durch veränderte p-, T-, Konzentrations-Bedingungen

Bei den Stimulationsfluiden werden in der Tiefengeothermie weniger Additive als in der E&P-Industrie eingesetzt. Stimulationsfluide welche bei hydraulischen Stimulationen eingesetzt werden, bestehen zum größten Teil aus Wasser. In manchen Stimulationsversuchen wurde sogar ausschließlich mit Wasser stimuliert (siehe Genesys-Projekt /SCS 09/).

In manchen Fällen ist es notwendig, dem Stimulationsfluid so genannte Stützmittel zuzugeben. Sie lagern sich nach einer Stimulationsmaßnahme in den Klüften und Spalten ab und verhindern somit, dass sich diese wieder schließen (siehe Stoffbeschreibung im Anhang). Um diese Stützmittel in der Flüssigkeit zu transportieren, werden Polymere eingesetzt. Sie erhöhen die Viskosität der Flüssigkeit und sorgen so dafür, dass die Stützmittel in Schwebelage gehalten werden. Die Polymere werden zudem zur Steigerung der Viskosität des Stimulationsfluides und damit zur Steigerung des Injektionsdruckes in der Lagerstätte eingesetzt. Zur weiteren Steigerung der Viskosität von Polymerspülungen können der Bohrspülung so genannte Quervernetzer (Cross Linker) beigemischt werden. Die Steigerung der Viskosität erfolgt durch eine Vernetzung der eingesetzten Polymere untereinander /MEI 12b/.

Wenn die Viskosität des Stimulationsfluides mit Gelen erhöht wurde, müssen diese nach der hydraulischen Stimulation ihre Viskosität verlieren damit das Stimulationsfluid rückgepumpt, ein Absetzen der Stützmittel erfolgen und die Lagerstätte saubergespült werden kann. Die Viskositätsverringerung erfolgt mit so genannten Brechern, diese "zerbrechen" die Zuckerketten der Polyzucker und führen so zu einer Verringerung der Viskosität /GTV 11/ (siehe Stoffbeschreibung im Anhang).

Eine wesentliche Aufgabe von Additiven ist die Vermeidung von Ausfällungen im Porenraum der Lagerstätte. Dieser Prozess kommt insbesondere bei siliklastischen Gesteinen zum Tragen. Um z. B. die Ausfällung von Eisen(II)-Verbindungen zu unterdrücken, wird der pH-Wert des Stimulationsfluides durch die Zugabe von Säuren abgesenkt. Bei dem Einsatz von Säuren ist der Schutz der Bohrloch-Verrohrung zu beachten. Die korrosive Wirkung der Säuren wird in der Regel durch die Zugabe eines Korrosionsinhibitors reduziert (siehe Stoffbeschreibung im Anhang). Es können aber auch organische Säuren verwendet werden, sie greifen die metallischen Werkstoffe nicht so stark an wie Salzsäure. Der Einsatz organischer Säuren ist aber auch problematisch, da diese mikrobiell zersetzt werden. Insbesondere bei der mikrobiellen Sulfat-Reduktion kommt es zur Schwefelwasserstoff (H_2S)-Bildung mit nachfolgender Metallsulfidausfällung. Dadurch erhöht sich der pH-Wert des Fluids, was wiederum eine Ausfällung von Karbonaten nach sich ziehen kann. Deshalb werden organische Säuren nur bedingt eingesetzt. Auch die Korrosions-Inhibitoren dienen Mikroorganismen als Nahrungsquelle, mit den verbundenen Problemen /HUE 04b/.

Wenn die zu stimulierende Lagerstätte Tonminerale enthält, können diese durch das eingepresste Stimulationsfluid quellen und die Porenräume verschließen. Dies würde

der Verbesserung der Durchlässigkeit der Lagerstätte entgegenwirken. Um dies zu verhindern, werden dem Stimulationsfluid Salze zugegeben, um den Austausch von Wassermolekülen mit den Kationen in den Tonen zu minimieren (siehe Stoffbeschreibung im Anhang) /REI 96/.

Ein weiteres Problem ist der Eintrag von Sauerstoff durch die Stimulationsfluide in die Lagerstätte. Sauerstoff fördert die Ausfällung von Metallhydroxiden und -oxiden. Diese Ausfällungen können den Porenraum verstopfen und die Permeabilität verringern. Um dies zu verhindern, werden Sauerstoffinhibitoren eingesetzt (siehe Stoffbeschreibung im Anhang).

Um z. B. die Sulfatreduktion oder den Abbau von Gelen durch Bakterien zu verhindern, werden Biozide zugemischt (siehe Stoffbeschreibung im Anhang). Zu beachten ist, dass eine permanente Zugabe eines Biozids zum Stimulationsfluid aus Kostengründen sicherlich nicht zu empfehlen ist. Es wäre also nur notwendig, vor Inbetriebnahme der Anlage die Förderleitungen mit einem biozidhaltigen Fluid zu spülen /HUE 04b/.

Eine weitere Stoffgruppe sind die Reibungsminderer, die die Reibung innerhalb des Stimulationsfluides verringern, um diese schneller verpumpen zu können (siehe Stoffbeschreibung im Anhang). Reibungsverminderer werden insbesondere bei sog. Slick-Water-Fracks, bei denen Stimulationsfluide mit geringer Viskosität und hohen Pumpraten eingesetzt werden, angewendet.

3.3.3 Chemische Stimulation

Zur Beseitigung von Ausfällungen im Speichergestein, von Ablagerungen in Rohren des Thermalwasserkreislaufes und zur Erweiterung von Klüften im Speichergestein können mechanische, chemische und mechanisch-chemische Verfahren eingesetzt werden (Abb. 3.10). Zum Beispiel kann nach dem Abteufen der Bohrung der unterste nicht verrohrte Bereich bohrlochnah häufig durch Bohrklein und Spülungsreste geschädigt sein und muss gereinigt werden. Zudem können in den Speichergesteinen im Verlauf ihrer Nutzung Ausfällungen und Ablagerungen entstehen, welche die Permeabilität verringern und deshalb durch chemische Stimulationsmaßnahmen beseitigt werden müssen. Für chemische Verfahren kommen unterschiedliche Säuren zum Einsatz. Es gibt zwei grundlegende Verfahren zur chemischen Stimulation /POR 07/:

Matrix-Säuerung

Bei der Matrix-Säuerung wird das Stimulationsfluid unterhalb des Druckes eingepresst, bei dem es zur Bildung oder Aufweitung von Klüften im Gestein kommen könnte. Die Säure fließt durch die Gesteinsmatrix und reagiert mit vorhandenen Poren und natürlichen Klüften bzw. löst die anstehenden Minerale. Dieses Verfahren wird im Wesentlichen zur Beseitigung von Bohrlochschäden eingesetzt, da der Einflussbereich der Säure um die Bohrung nicht sehr groß ist (10-er Meter Bereich).

Kluft-Säuerung

Die Kluft-Säuerung wird oberhalb des Frack-Druckes des anstehenden Gesteines durchgeführt. Durch das hydraulische Aufweiten und zusätzliche Ätzen der Klüfte werden zum einen die hydraulische Durchlässigkeit und zum anderen der zu stimulierende Einflussbereich erhöht. Für detailliertere Informationen zu chemischen Stimulationsverfahren siehe /POR 07/.

3.3.3.1 Stimulationsfluid (Chemische Stimulation)

Der bohrlochnahe Bereich innerhalb der Lagerstätte wird nach Erstellung der Bohrung grundsätzlich ein bis mehrfach gesäuert, um die bohrungsbedingten „Skineffekte“ zu beseitigen. Als Skineffekte werden die unterschiedlichen hydraulischen Eigenschaften im bohrlochnahen Bereich im Gegensatz zum anstehenden Gestein aufgrund von Tonquellung oder dem Eintrag von Bohr- und Stimulationsfluiden bezeichnet.

Je nach Speichergestein und Mineralausfällung werden verschiedene Säuren zudem zur chemischen Stimulation eingesetzt. Dabei wird zwischen karbonatischen und siliziklastischen Gesteinen unterschieden. In der Stoffbeschreibung im Anhang ist eine Auswahl von verschiedenen Säuren und deren Anwendungsmöglichkeiten zusammengestellt. Chemische Stimulationen sind am effektivsten in Karbonatgesteinen (hauptsächlich Kalksteine). In Karbonatgesteinen kann mit einer oder mehreren Säuerungen eine erhebliche Erhöhung der Durchlässigkeit der geothermalen Lagerstätte erreicht werden. In den Geothermieprovinzen in Deutschland treten Karbonatgesteine z. B. im Malm des Molassebeckens und dem Muschelkalk im Oberrheingraben auf.

Der Einsatz von Säuren kann auf verschiedene Arten auch zur Permeabilitätsverschlechterung in Injektionshorizonten führen: Zum einen durch die Mobilisierung von

Feinstpartikeln aufgrund der Lösung der Gesteinsmatrix und Zemente und zum anderen durch die Reaktion von Salzsäure mit Tonmineralen. Daher ist die Säurebehandlung in feldspathhaltigen und tonigen Sandsteinen problematisch /WOL 12/.

Für chemische Stimulationen in Karbonatgesteinen unter hohen Temperaturbedingungen werden häufig Mischungen von Salzsäure mit Essig- oder Ameisensäure verwendet. Aufgrund der hohen Korrosivität auf Werkstoffe müssen bei einer reinen HCl-Anwendung teurere und temperaturbeständigere Korrosionsinhibitoren verwendet werden. Während der Stimulation von Karbonatgesteinen entsteht durch die Reaktion der Säure mit dem Karbonat Kohlendioxid (CO_2). Das freigesetzte CO_2 kann die Wirkungsweise der organischen Säuren vermindern. Neue Erkenntnisse zeigen, dass beim Einsatz leicht abbaubarer organischer Verbindungen, wie z. B. Essigsäure, Oxalsäure, die mikrobielle Entwicklung gefördert wird. Dies kann bei Standorten mit geringen Temperaturen ($< 70\text{ °C}$) zu massiven Problemen (z. B. der Ausfällung von Mineralen im Porenraum der Lagerstätte) führen /WOL 12/. Die im Untergrund eingebrachten Säuren werden durch die Reaktion mit dem Gestein zu Wasser und Salz abgebaut und stellen somit kein Umweltrisiko dar /GTV 11/.

Für siliziklastische Gesteine, wie z. B. im Norddeutschen Becken oder im Oberrheingraben, kann zudem Flußsäure (HF) verwendet werden. Neben der Gefährdung der Bohrungsinstallation und dem hohen Aufwand bei deren Handhabung können durch deren Einsatz sekundäre Ausfällungen auftreten, wenn Natrium, Kalium und/oder Calcium im Gestein vorhanden sind. Der Einsatz von Flußsäure erfordert daher eine Vorbehandlung des Injektionshorizontes /WOL 12/.

Einige Säuren reagieren sehr reaktiv und zu schnell mit den Lagerstättengesteinen, so dass die Säuren bereits nach wenigen Metern um das Bohrloch „verbraucht“ sind und somit kein ausreichend großer Bereich um das Bohrloch stimuliert wird. Um die Reaktivität der Säure zu verlangsamen, werden Emulsionen verwendet. Emulsionen verzögern die Reaktionsgeschwindigkeit der Säuren mit den Gesteinen der Lagerstätte. Die gebräuchlichsten Reaktionsverzögerer sind z. B. Polymere /REI 96/.

3.3.4 Projektbeispiele

In Deutschland wird aus derzeit 19 tiefengeothermischen Anlagen Wärme und in einigen Projekten auch Strom erzeugt (Stand 2011). In mehreren dieser Geothermie-Projekte wurden bislang Stimulationsmaßnahmen zur Steigerung der Förderrate

durchgeführt. Die Tab. 3.2 gibt eine Übersicht über die erfolgten Stimulationsmaßnahmen in Deutschland, sowie weiteren Projekten in Frankreich, der Schweiz und Österreich.

Im Norddeutschen Becken wurden Stimulationsmaßnahmen in beiden GeneSys-Projekten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Hannover und Horstberg durchgeführt /JUN 05/ (www.genesys-hannover.de). In beiden Projekten wurde zur Stimulation nur Wasser ohne weitere Zusätze verwendet. Gleiches gilt für das unterbrochene Geothermie-Projekt in Bad Urach (Baden-Württemberg). Das Deutsche GeoForschungsZentrum (GFZ) führte in seinem Geothermie Forschungsvorhaben in Groß Schönebeck Stimulationsmaßnahmen durch, wobei dem Stimulationsfluid auch Additive zugegeben wurden. Im Laufe der Stimulationsmaßnahmen wurde auch in Groß Schönebeck auf Zugabe von Additiven verzichtet, da negative Auswirkungen der Stützmittel auf die Permeabilitätssteigerung vermutet wurden /ZIM 10b/.

Im Oberrheingraben wurden am französischen Standort Soultz-sous-Forêts sowie am deutschen Standort Landau (Rheinland-Pfalz) hydraulische und chemische Stimulationen durchgeführt /SCD 10/, während in der bayerischen Molasse hydraulische Verfahren in der Tiefengeothermie bislang nur in den Chattsanden (flache Geothermie) zur Anwendung kamen /FRT 10/. Zum Erreichen der angestrebten Förderraten wurden im bayerischen Unterhaching beide Bohrungen im Malmkarst mit verdünnter Salzsäure stimuliert. Nach erfolgreichem Betrieb der Geothermieranlage Unterhaching folgten viele weitere tiefe Geothermie-Projekte im Molassebecken rund um München (Tab. 3.2).

Tab. 3.2 Ausgewählte Stimulationsmaßnahmen in Deutschland bzw. Frankreich und der Schweiz (aus /EVA 11/ und /GTV 11/)

| Lokation | Region | Gestein | Tiefe (km) | Datum | Verfahren | Stimulationsfluid | Qmax (L/s) | Pw-max (MPa) |
|--------------------|--------|-------------------------------|------------|-------|-----------------------|--------------------------------|------------|--------------|
| Neustadt-Glewe | NDB | Sandsteine | 2,4 | 1995 | Hydraulisch | Wasser | 31 | 0,8 |
| Groß Schönebeck | NDB | Sandsteine, Vulkanite | 4,309 | 2007 | Hydraulisch, chemisch | Wasser, Sand, Gel, Stützmittel | 150 | 59 |
| Horstberg | NDB | Sandsteine | 4,12 | 2003 | Hydraulisch | Wasser | 50 | 32 |
| Genesys | NDB | Sandsteine | 3,834 | 2011 | Hydraulisch | Wasser | | |
| Soultz-sous-Forêts | ORG | Granite | 3,5 | 1993 | Hydraulisch, chemisch | Wasser, Sand, Stützmittel | 38 | 10 |
| Soultz-sous-Forêts | ORG | Granite | 5,0 | 2003 | Hydraulisch, chemisch | Wasser, Sand, Stützmittel | 90 | 18 |
| Landau | ORG | Granit, Sandsteine, Vulkanite | 3,34 | 2007 | Hydraulisch, chemisch | Wasser, HCl | 70 | 6 |
| Basel | ORG | Granite | 5,0 | 2006 | Hydraulisch | Wasser | 55 | 30 |
| Bad Urach | SMB | Gneis | 4,445 | 2002 | Hydraulisch | Wasser | 50 | 34 |
| Straubing | SMB | Karbonate | 0,8 | 1999 | Chemisch | Wasser, HCl | 45 | 1,5 |
| München-Pullach | SMB | Karbonate | 3,4/3,4 | 2005 | Chemisch | Wasser, HCl | 32 | 4 |
| München -Riem | SMB | Karbonate | 2,7/3,0 | 2004 | Chemisch | Wasser, HCl | 75 | 2,5 |
| Unterhaching | SMB | Karbonate | 3,6/3,35 | 2007 | Chemisch | Wasser, HCl | 2,4 | 2,5 |

NDB = Norddeutsches Becken, ORG = Oberrheingraben, SMB = Süddeutsches Molassebecken, * geplant

3.3.4.1 Geothermale Stimulationsmaßnahmen

Im Folgenden sind einige Projektbeispiele aufgeführt, in denen Stimulationsmaßnahmen durchgeführt wurden.

Groß Schönebeck

Im Norddeutschen Becken bei Groß Schönebeck wurden im Winter 2002/2003 Stimulationsmaßnahmen zu Forschungszwecken vom Deutschen GeoForschungsZentrum durchgeführt. Um die Rotliegendesteine der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 hydraulisch zu stimulieren, wurden etwa 17.000 m³ aufbereitetes Grundwasser in den Openhole Abschnitt der Bohrung verpresst. Dabei gelangt das injizierte Fluid in den Teufbereich von 3.800 – 4.300 m, wo überwiegend Sandsteine und Vulkanite anstehen (Abb. 3.13). Das in Groß Schönebeck verwendete Stimulationsfluid hatte folgende Rahmendaten /HUE 04a/:

- Salzzugabe war nicht erforderlich (nur wenige Tonminerale in der Lagerstätte),
- keine Verwendung von O₂-Inhibitoren für frisches Brunnenwasser,
- Verwendung eines O₂-Inhibitors für Leitungswasser und zwischengelagertes Wasser,
- Ansäuern mit HCl auf pH 2,5 - 3 zur Verhinderung von Eisenausfällung,
- Einsatz des Korrosions-Inhibitors Lithsolvent,
- keine Verwendung eines Biozids.

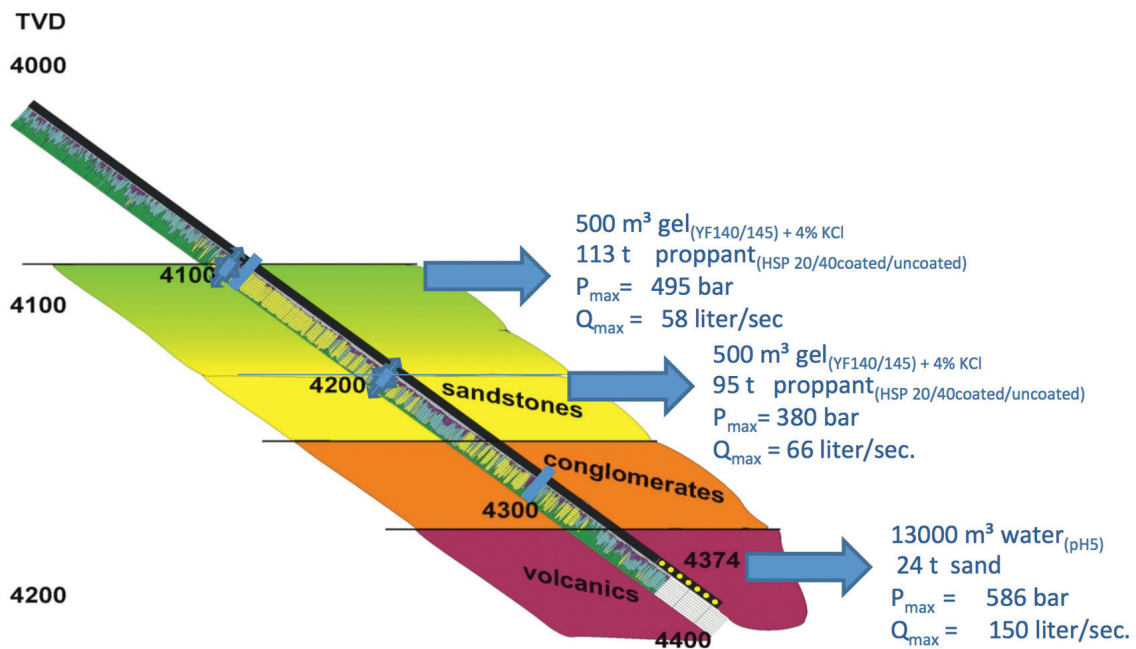


Abb. 3.13 Hydraulische Stimulationsmaßnahmen im Forschungsprojekt Groß Schönebeck /HUE 11/

Es wurden drei Stimulationsbehandlungen von unten nach oben in hydraulisch getrennten Bohrlochbereichen durchgeführt. Aufgeführt sind die jeweils eingesetzten maximalen Pumpraten, der dadurch erzielte Maximaldruck am Bohrlochkopf, die Zusammensetzung der Stützmittel und die Fluidbezeichnung und –menge.

Nach den Stimulationsversuchen zur Rissweitung in Sandsteinen in Groß Schönebeck wurden im Zeitraum von Januar bis März 2003 die Experimente auf den gesamten offenen Abschnitt der Bohrung Groß Schönebeck 3/90 erweitert (3.874 - 4.291 m). Ziel war es, zusätzlich zu den Sandsteinen die darunter liegenden Konglomerat- und vulkanischen Schichten anzuschließen und in die künftige Thermalwasserförderung einzu beziehen. Da die Stimulation der Sandsteine nicht die erwünschten Ergebnisse brachte, wurde nun auf Additive wie Gele und Stützmittel verzichtet /HUE 10/.

Horstberg

Während des Forschungsvorhabens in Horstberg (Norddeutsches Becken) wurden in der Volpriehausen-Formation mehrere Stimulationsphasen mit reinem Frischwasser ohne jegliche Additive durchgeführt. Der Stimulationsdruck wurde stufenweise von 430 bar auf 460 bar erhöht. Eine erreichbare anfängliche Injektionsrate von 7 l/s verminderte sich langfristig auf 0,5 L/s /HUE 10/.

Soultz-sous-Forêts

Im Oberrheingraben wurden mehrere Stimulationsmaßnahmen im französischen Forschungsprojekt in Soultz-sous-Forêts zur Erschließung petrothermaler EGS-Systeme durchgeführt. Bei der hydraulischen Stimulation der Bohrung GPK3 wurden z. B. insgesamt ein Volumen von 34.000 m³ Wasser verpresst mit einer mittleren Fließrate von 50 l/s. Hinsichtlich des injizierten Volumens war dies die größte Stimulationsoperation im Soultz-Projekt /TIS 06/.

Insgesamt wurde im Soultz-Projekt ein Gesteinsvolumen von 3 km² stimuliert. Die Produktivität der Lagerstätte wurde durch chemische und hydraulische Stimulationsmaßnahmen um den Faktor 20 gesteigert /POR 09/. Es wurden großflächige Risse mit einer sehr guten hydraulischen Leitfähigkeit erzeugt. Die hydraulische Leitfähigkeit der Risse ist erheblich höher, als es bei Anwendung der Proppant-Frac-Technologie möglich gewesen wäre. Das Soultz-Projekt demonstriert damit, dass das Konzept der Wasserfracs bis in große Tiefen im Granit überaus erfolgreich ist.

Basel

Im Laufe des Geothermie-Projektes in Basel wurde 2006 der kristalline Untergrund in fünf Kilometern Tiefe stimuliert. Die Planungen für die Stimulationsmaßnahmen sahen vor, eine Wassermenge von bis zu 50 l/s in das Speichergestein zu pumpen. Bei Dauerbetrieb entspricht dies einem täglichen Bedarf von rund 4.400 m³. Insgesamt wurde für den vorgesehenen Zeitraum von zwei Wochen mit einem Wasserbedarf von ca. 50.000 m³ gerechnet. Das Stimulationswasser sollte aus dem Rhein bzw. dem nahe gelegenen Hafenbecken entnommen werden. Laut /KAI 04/ sollte ausschließlich Frischwasser ohne Additive verwendet werden.

3.3.4.2 Frackingmaßnahmen zur Erkundung unkonventionellen Erdgases

Zum Vergleich wird hier auch auf Stimulationsmaßnahmen zur Erschließung von unkonventionellen Erdgasvorkommen eingegangen, wobei die in der Abb. 3.15 erwähnten Stimulationsmaßnahmen ausschließlich zur Erkundung durchgeführt wurden. Bislang wird in Deutschland noch kein unkonventionelles Erdgas gefördert.

In der E&P-Industrie ist das „Fracken“ von Kohlenwasserstoff-Lagerstätten ein Standardverfahren. Seit 1960 wurde die Frack-Technologie in Deutschland schon mehr als

300-mal bei konventionellen Erdgaslagerstätten eingesetzt (Abb. 3.14). Ein Drittel der deutschen Erdgasproduktion stammt aus geackten konventionellen Erdgaslagerstätten /WEG 12/. Im Jahr 2001 wurden weltweit mehr als 60 % der Ölquellen und mehr als 85 % der Gasbohrungen mit Stimulationsmaßnahmen behandelt /LEG 05/.

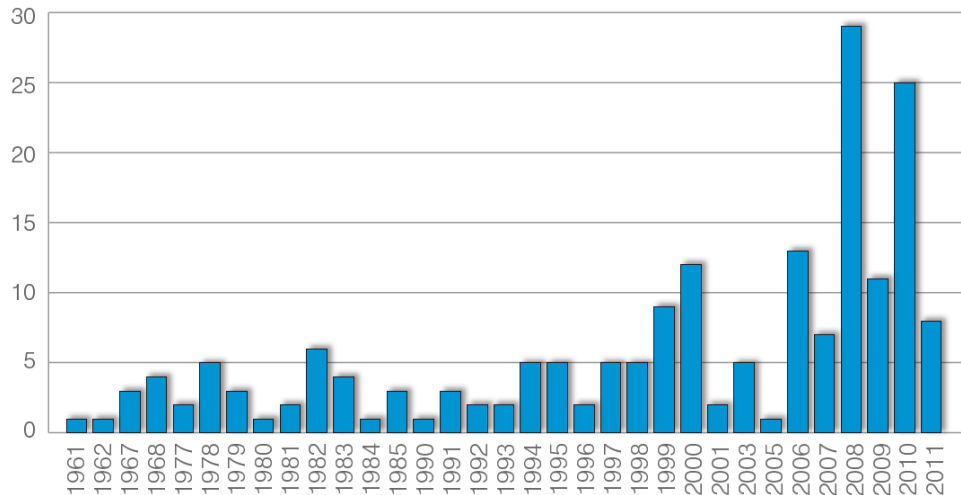


Abb. 3.14 Anzahl von hydraulischen Stimulationen seit 1961 in Deutschland /EXX 10/ - auf der y-Achse ist die Anzahl der Fracking Maßnahmen angegeben

Unkonventionelle Gasvorkommen befinden sich in sehr unterschiedlichen Teufenbereichen. Schiefergas kann schon in Tiefen ab ca. 1.000 m anstehen. TIGHT-Gasvorkommen sind eher in Tiefen ab 3.500 m anzutreffen. Dies zeigt, dass die Stimulationsdrücke zu mindestens für TIGHT-Gas Lagerstätten vergleichbar zu Stimulationsmaßnahmen in der Geothermie sind. In der Abb. 3.15 sind beispielhaft Stimulationsmaßnahmen aus den drei Hauptgesteinsarten zur Förderung unkonventionellen Erdgases dargestellt. Signifikant ist der hohe Einsatz von Stützmitteln und Additiven im Vergleich zu Stimulationsmaßnahmen in Groß Schönebeck (Abb. 3.13). Die Mengen an Stimulationsfluiden sind bei der E&P-Industrie und der Geothermie von Projekt zu Projekt und den unterschiedlichen Gesteinsschichten sehr unterschiedlich.

| Tight-Gas | | | |
|--|--|---|--|
| Söhlingen Z16 Kreis Rotenburg (Wümme), Niedersachsen | 9 Fracks in 2008 Endteufe: 6.872 m Dethlinger Sandstein (Oberrotliegendes) | <u>Gel</u> Wasserbedarf: Stützmittel: Additive: | 824 m ³ 170.100 kg 38.079 kg |
| Schiefergas | | | |
| Damme 3 Kreis Vechta, Niedersachsen | 3 Fracks in 2008 Wealdentonstein 1.045-1.530 m | <u>Slickwater</u> Wasserbedarf: Stützmittel: Additive: | 12.119 m ³ 588.000 kg 19.873 kg |
| Kohleflözgas | | | |
| Natarp Kreis Warendorf, Nordrhein-Westfalen | 2 Fracks in 1995 Flözführendes Karbon 1.800-1.947 m | <u>Gel</u> Wasserbedarf: Stickstoff: Stützmittel: Additive: | 121 m ³ 81.750 kg 41.700 kg 1.230 kg |
| Zukünftige Weiterentwicklungen | | | |
| <u>Slickwater</u> Angaben Exxon Mobil (Stand 04.02.2012) | Planung | <u>Slickwater</u> Wasserbedarf: Stützmittel: Additive: | 1.600 m ³ unbekannt 5.600 kg |
| <u>Gel</u> Angaben Exxon Mobil (Stand 04.02.2012) | Planung | <u>Gel</u> Wasserbedarf: Stützmittel: Additive: | 1.600 m ³ unbekannt 6.530-7.080 kg |

Abb. 3.15 In unkonventionellen Lagerstätten eingesetzte bzw. einsetzbare Frackfluide und deren Einsatzmengen und Tiefenbereiche /MEI 12b/

3.3.5 Vergleich Stimulationsverfahren in der E&P-Industrie und Geothermie

Im Gegensatz zur Kohlenwasserstoffgewinnung muss besonders bei der geothermischen Nutzung in porösen Sandsteinschichten deren Durchlässigkeit über einen relativ langen Betriebszeitraum gewährleistet sein. Aus diesem Grund sind die Erfahrungen aus der E&P-Industrie nur teilweise übertragbar, und es müssen relativ hohe Anforderungen an die Injektionsfluide bei Tiefengeothermie-Bohrungen gestellt werden /HUE 04a/. Dies wird auch nochmal in dem folgenden Zitat eines Gutachtens zur unkonventionellen Gasförderung herausgestellt.

„Obwohl bei Vorhaben der Tiefengeothermie teilweise auch eine hydraulische Stimulation (Fracking) des Untergrundes erfolgt, sind die Ergebnisse aus dem vorliegenden Gutachten nicht ohne Weiteres darauf übertragbar, da u. a. die eingesetzten Fluide, die benötigten Volumina, die Pumpraten und -drücke und die Tiefe der Zielformationen teilweise sehr unterschiedlich von denen bei der Erdgasexploration und -gewinnung sind /MEI 12a/.“

3.3.5.1 Unterschiede der Verfahren

In der E&P-Industrie soll durch Fracking-Maßnahmen die Produktivität einer Kohlenwasserstoff-Lagerstätte erhöht werden. Dies geschieht dadurch, dass durch Stimulationsmaßnahmen Wegsamkeiten um das Bohrloch in der Lagerstätte geschaffen oder geweitet werden, damit die Kohlenwasserstoffe besser zur Förderbohrung fließen können. In der Geothermie werden im Wesentlichen zwei Stimulationsverfahren angewendet. Zum einen können geothermale Lagerstätten hydraulisch oder chemisch stimuliert werden. Im Wesentlichen soll dadurch langfristig und nachhaltig, u. a. der hydraulische Anschluss zwischen zwei Bohrungen durch ein natürliches Kluftsystem erreicht werden.

Das ursprüngliche Hot-Dry-Rock-Konzept (HDR) sah vor, dass zwei Bohrungen, die in einem gering permeablen Gestein abgeteuft wurden, durch Stimulationsmaßnahmen und einem induziertem Rissystem hydraulisch miteinander zu verbinden. Messungen aus dem Forschungsprojekt in Soultz ergaben, dass an der Förderbohrung nur etwa ein Drittel des injizierten Thermalwassers ankommt, der Rest fließt durch Störungszonen ab bzw. zu. Dies führte dazu, dass Bohrungen nicht direkt durch eine erzeugte Kluft verbunden werden, sondern die Bohrungen über ein vorhandenes natürliches Kluftnetz, welches die Lagerstätte durchzieht, anschließt. In der E&P-Industrie wird meistens nur ein kleiner Bereich um die Bohrung stimuliert /SCS 09/.

Der wesentliche Unterschied zwischen den Verfahren liegt in den unterschiedlich erbohrten Lagerstättengesteinen und deren Zusammensetzung und mechanischen Verhaltens. Unkonventionelles Erdgas ist z. B. in Schiefergestein eingeschlossen. Schiefergestein reagiert weitgehend plastisch, daher ist das Aufbrechen zur Gewährleistung einer nachhaltigen Permeabilität aufwendig, da erzeugte Risse und Klüfte sich wieder schließen können. Um dies zu verhindern, wird durch die Zugabe von Stützmitteln ein Offenhalten der erzeugten Risse sichergestellt. Das Stimulationsfluid muss auf die chemischen und geohydraulischen Verhältnisse in der Lagerstätte durch die Zugabe von Additiven eingestellt werden. Um diese Stützmittel zu transportieren, muss die Tragfähigkeit (Viskosität) der Stimulationsfluide durch die Zugabe von Gelen erhöht werden. Geothermische Lagerstätten sind hingegen wesentlich spröder, da hier im Wesentlichen Granite, Sandsteine und Karbonate stimuliert werden, welche von sich aus eine gewisse Stützwirkung mitbringen (siehe Kap. 3.3.2). Zur hydraulischen Stimulation geothermaler Reservoirs werden daher in der Regel weniger bis gar keine Additive eingesetzt. Doch auch bei Stimulationsmaßnahmen für Geothermie-Projekte

wird die Verwendung von Stützmitteln in Betracht gezogen (siehe /GEO 12/). Das Problem bei den hochviskosen Gelen und den darin enthaltenen Stützmitteln ist, dass sie nicht über weite Strecken transportiert werden können. Zudem würden die großen Volumina an hochviskosen Stimulationsfluiden die Erschließungskosten sprengen. Aus diesem Grunde ist das Ziel für Geothermie-Projekte, Stimulationsmaßnahmen in Zukunft mit reinem Wasser als Stimulationsfluid durchzuführen. Bislang wurden in durchgeführten Stimulationsprojekten mit reinem Wasser gute Erfahrungen gemacht. Die Risse blieben durch einen Selbststützungsmechanismus offen (siehe Abb. 3.11). Die Transmissivität übertrifft sogar die Werte von mit Stützmittel gefüllten Rissen /SCS 09/.

Tenside (Surfactants), welche in der Stimulation von Kohlenwasserstofflagerstätten eingesetzt werden, werden in der Geothermie nur bedingt benötigt, weil keine Kohlenwasserstofflagerstätten stimuliert werden. Aus diesem Grunde werden Suspendiermittel (nonemulsifier surfactants) ebensowenig benötigt /KAL 08/. Die chemische Behandlung zur Beseitigung von Speicherschäden im bohrlochnahen Bereich ist bei der E&P-Industrie und der Geothermie vergleichbar. Eine Zugabe von Additiven ist hier aufgrund des Verfahrens unumgänglich.

Um großräumige Wärmetauscher zu produzieren, müssen große Mengen an Wasser verpresst werden. Bei typischen Stimulationsmaßnahmen während Geothermie-Projekten werden Wasservolumina von 10.000 bis 30.000 m³ bei Fließraten von bis zu 100 l/s verpresst. Zum Vergleich werden in der E&P-Industrie im Mittel nur etwa 5.000 m³ Stimulationsfluid verpresst. In der Tab. 3.3 sind die wesentlichen Unterschiede zwischen Stimulationsmaßnahmen der E&P-Industrie und Geothermie nochmals zusammengefasst.

Tab. 3.3 Vergleich der Stimulation geothermaler Lagerstätten und dem Fracking unkonventioneller Lagerstätten in der E&P-Industrie

| Parameter | E&P-Industrie | Tiefengeothermie |
|--------------------|--|---|
| Verfahren | Bereich um die Bohrung wird stimuliert | Hydraulischer Anschluss zweier Bohrungen durch ein natürliches Kluftsystem |
| Stimulationstiefe | 1.000 bis 3.500 m | ca. 2.000 – 5.000 m |
| Injektionsdruck | Geringere Drücke als in der Tiefengeothermie | In der Regel höhere Drücke, aufgrund der größeren Tiefe und Festigkeit der Gesteine |
| Geologie | Tonsteine, Sandsteine | Sandsteine, Karbonate und Vulkanite |
| Lagerstättenfluide | Hochmineralisiert und mit Kohlenwasserstoffen angereichert | Hochmineralisiert, es können Kohlenwasserstoffe auftreten |
| Additive | Vielzahl von Additiven | Kein bis vermehrter Einsatz von Additiven, je nach eingesetzten Verfahren (chemisch, hydraulisch) |

3.4 Lagerstättenwasser und Flowback

Eine Herausforderung stellt die Entsorgung der Abwässer (Flowback) der Bohrspülungs- und Stimulationsverfahren dar. Der Flowback ist das Fluid, welches wieder an die Oberfläche rückgepumpt wird. Durch den Bohr- und Stimulationsprozess vermischen sich die Prozessfluide mit dem Formations- und Lagerstättenwässern (Abb. 3.16). Im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken sind die anstehenden Wässer im Untergrund so hoch mineralisiert, dass eine unbehandelte Entsorgung der Wässer nicht möglich ist. Der Flowback enthält zudem die verwendeten bereits beschriebenen Prozessfluide mit den beigemischten Additiven.

Die im Flowback gelösten Minerale können in Abhängigkeit ihrer Konzentrationen toxische Eigenschaften besitzen (siehe Stoffbeschreibung im Anhang). Zudem sind unter Umständen radioaktive Stoffe (Naturally Occurring Radioactive Substances - NORM) im Lagerstättenwasser, wie z. B. Radium 226 und 228 enthalten. In den austretenden Gasen kann zudem Radon enthalten sein (siehe /KEM 13/). Die häufigsten Gase geothermischer Standorte sind Stickstoff (N₂), Methan (CH₄), Kohlendioxid (CO₂), Schwefelwasserstoff (H₂S) und gelegentlich Wasserstoff (H₂). Gasvolumina und Zusammensetzung hängen von den geologischen Randbedingungen des geothermischen Standortes bzw. des Reservoirs ab /REP 10/. Während des Bohrbetriebes wird in der Regel eine unabhängige Gasüberwachungsfirma beauftragt, die permanent die Gaskonzentration in der Bohrspülung erfasst. Es werden jeweils die Konzentrationen von

H₂S und Kohlenwasserstoffen im ppm-Bereich gemessen und aufgezeichnet. Beim Überschreiten eines Grenzwertes wird automatisch ein optisches und akustisches Signal ausgelöst. Auf jeder Tiefbohrung ist während der Bohrarbeiten ein Sicherheitsabschluss (Blow-out Preventer) des Bohrloches vorgesehen, der im Alarmfall die Bohrung sofort hydraulisch abschließt /KAI 04/.

Gegenwärtige Praxis ist es, dass der an die Oberfläche geförderte Flowback nach einer Zwischenbehandlung in sogenannten Versenkbohrungen bzw. Disposalbohrungen vorrangig in ausgebeutete Lagerstätten oder andere unterirdische Gesteinsschichten in großer Tiefe (bis mehrere 1.000 m) verpresst wird /UBA 11/.

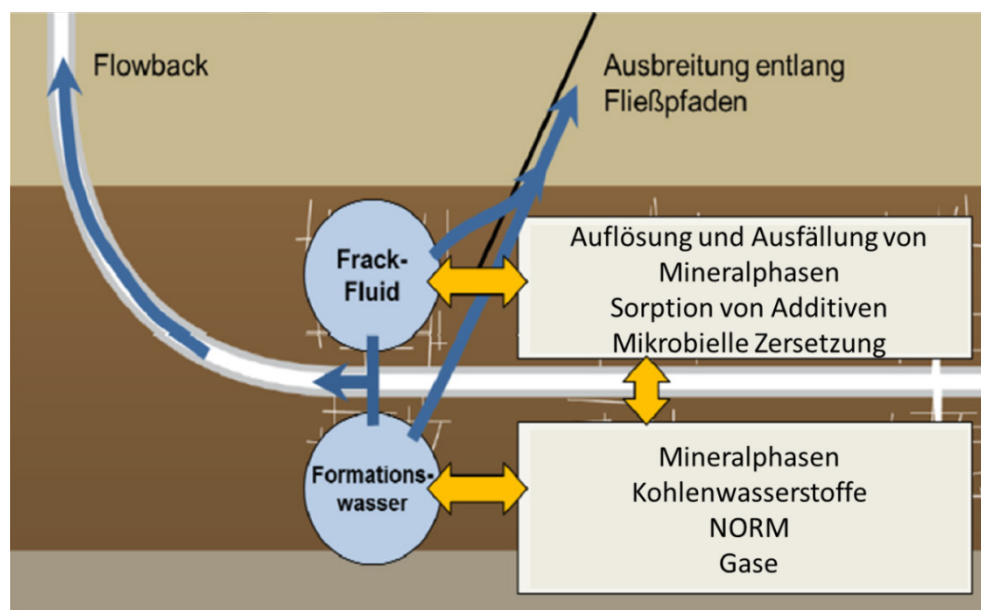


Abb. 3.16 Schematische Darstellung des Flowbacks (verändert nach /MEI 12a/)

Entsorgung von Abwässern

Neben der Verpressung und Oberflächenableitung von Abwässern, die überwiegend im nordamerikanischen Raum angewendet wird, lassen sich die Maßnahmen zur Entsorgung von Abwässern in folgende Unterpunkte gliedern /ROS 12/:

- Generelle Verminderung des eingesetzten Fluidvolumens,
- Aufbereitung des Flowbacks und der Bohrspülung zur Wiederverwertung,
- Aufbereitung zur anschließenden Entsorgung,
- Aufbereitung zur alternativen Nutzung,

- Alternative Nutzung des Flowback oder der Bohrspülung.

Die schematische Abb. 3.17 fasst die generellen Möglichkeiten zur Behandlung des Flowbacks zusammen.

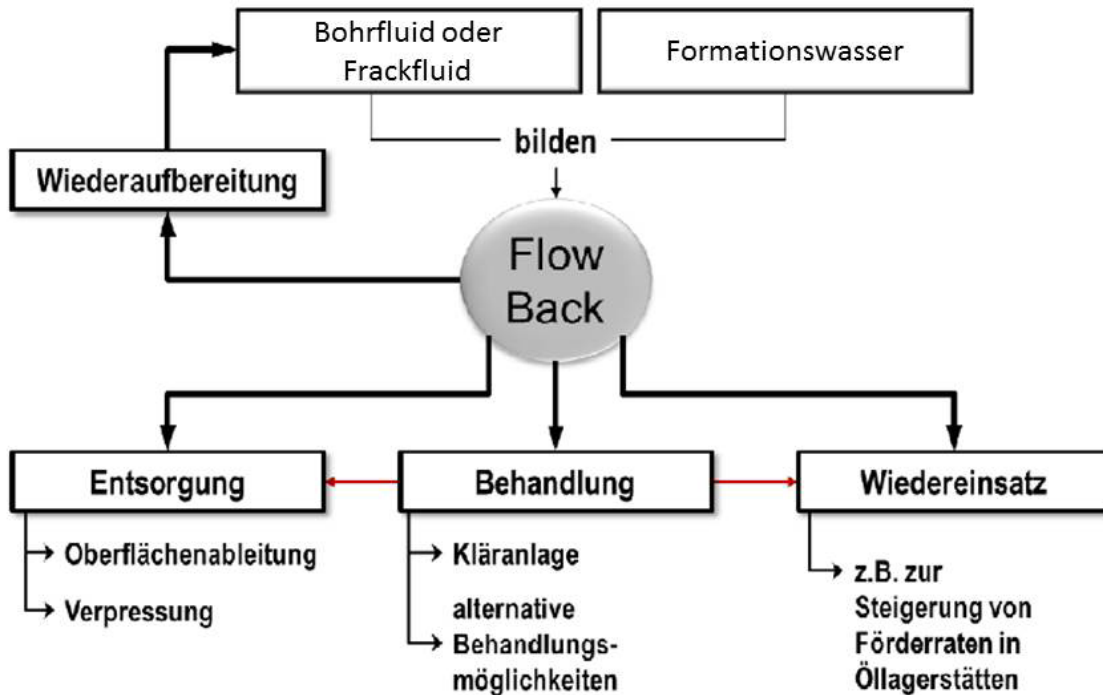


Abb. 3.17 Ablaufdiagramm und Fallunterscheidung zur Behandlung des Flowbacks (geändert nach /ROS 12/)

Die Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in eine kommunale Kläranlage ist Grundlage des Merkblattes DWA-M 115 „Indirekteinleitung nicht häuslichen Abwassers“. Danach ist es die Aufgabe der Wasserbehörden, Anforderungen an das Einleiten von Abwasser festzulegen. Weitere Informationen zur Abfallbehandlung gibt /ROS 12/.

Für die Entsorgung von Abwässern, deren Aufbereitung bzw. oberflächliche Entsorgung unwirtschaftlich ist, werden in Deutschland alte Produktionsbohrungen genutzt. Die Entsorgung erfolgt entsprechend der Tiefbohrverordnung BVOT /ROS 12/.

Bei der Entsorgung der allgemein anfallenden Abwässer ist zwischen Oberflächen- und Niederschlagswässern und den Produktionsabwässern zu unterscheiden. Oberflächenwasser der Verkehrswege und der Dachflächen von den Einrichtungen werden getrennt von den Produktionsabwässern gesammelt, gelagert und entsorgt. Die Bohrspülungen für die Exploration werden von den für die Bohrung beauftragten Firmen in Eigenregie bewirtschaftet und in der Regel wiederverwertet /ROS 12/.

Jedoch können beim Stimulationsprozess und bei der Behandlung des Flowbacks weitere Abfälle anfallen, z. B. durch Abscheidung von Feststoffen oder Schlämmen. Diese Abfälle sind entsprechend der Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung AVV) zuzuordnen und entsprechend dem im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) (ab 01.06.2012 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)) festgelegten Rechtsrahmen zu behandeln.

Für die Verwertung von Abfällen, die in den unter Bergaufsicht stehenden untertägigen Grubenbauen als Versatzmaterial eingesetzt werden, gilt die Versatzverordnung. Für die Abfälle, die bei Prozessen der Exploration bzw. dem Fracking und der möglichen Aufbereitung der Abwässer (betriebsintern oder -extern) anfallen, können folgende Kategorien/Schlüsselnummern der AVV zum Tragen kommen:

- 0105 Bohrschlämme und andere Bohrabfälle
- 010504 Schlämme und Abfälle aus Süßwasserbohrungen
- 010505 Ölhaltige Bohrschlämme und -abfälle
- 010506 Bohrschlämme und andere Bohrabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten
- 010507 Barythaltige Bohrschlämme und -abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 010505 und 010506 fallen
- 010508 Chlorid haltige Bohrschlämme und -abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 010505 und 010506 fallen
- 010599 Abfälle a. n. g.

3.5 Bohrlochausbau

3.5.1 Verrohrung

Bereits in der Planungsphase einer Geothermie-Bohrung können Fehler gemacht werden, die das Projekt später teurer oder sogar unwirtschaftlich werden lassen. Risikominimierung beginnt daher bereits in der Planungsphase. Eine sorgfältige geologisch-technische Planung ist deshalb von großer Bedeutung. Die Auswahl des „passenden“ Verrohrungsschemas hat z. B. erheblichen Einfluss auf die Bohrkosten /SPR 07/.

Die Aufstellung eines Bohr- und Verrohrungsschemas erfolgt von unten nach oben, wobei der Zweck der Bohrung entscheidend für den Ausbau ist. Bei Bohrungen für die E&P-Industrie werden kleinere Bohrdurchmesser benötigt als bei einer Geothermie-Bohrung. Der Rohrdurchmesser, Wandstärken und Verbindungen sind genormt und den Empfehlungen des American Petroleum Institute (API) zu entnehmen. Die Berechnung von Futterrohren erfolgt nach der API-Vorschrift gemäß API-BUL5C3 bzw. nach der vom Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung (WEG) herausgegebenen Richtlinie „Futterrohrberechnung“ vom Juni 2006 /BEL 06/.

Die Richtlinien für den Ausbau von Bohrungen, in denen hydraulische Stimulationen durchgeführt werden sollen, sind im „API Guidance Document HF1“ festgelegt /API 09/. Dabei sollte die Ankerrohrtour komplett und die Produktionsrohrtour mindestens 153 m (500 ft.) oberhalb des zu stimulierenden Horizontes zementiert werden /SCI 12/.

Vor dem Einbau muss eine Auslegung der Rohre (Casing-Design) erfolgen. Die Auslegung der Rohrtouren erfolgt entsprechend den maximal möglichen Belastungen bei Einbau, Zementation, Stimulation bzw. in der Betriebsphase (Materialgüte, Wanddicke und Art der Verbinder). Hierzu erfolgt eine Berechnung von der:

- Außendruckfestigkeit,
- Innendruckfestigkeit,
- Zugfestigkeit und biaxiale Beanspruchungen,

mit den entsprechendem Sicherheitsnachweisen für die einzelnen Lastfälle /KAB 03/. Das Abteufen der Bohrung erfolgt in mehreren Abschnitten, die einzeln voneinander verrohrt und zementiert werden müssen. Die Längen der Bohrabschnitte richten sich nach den durchteuften Gesteinsschichten bzw. ob kritische Schichten abgedichtet werden müssen. Kritische Schichten sind z. B. leicht lösliche und instabile Gesteine wie Gipse und Salze oder Gesteinsschichten, in denen Kohlenwasserstoffe oder unter Druck stehende Fluide anstehen. Wenn Grundwasserhorizonte angetroffen werden, werden diese bis zum begrenzenden Grundwasserstauer im Liegenden durchbohrt und innerhalb der grundwasserführenden Schichten verrohrt und zementiert. Dies soll eine hydraulische Verbindung zu anderen kritischen Gesteinsschichten und Aquiferen verhindern. Die Anzahl an Bohrabschnitten richtet sich nach der Anzahl an Aquiferen und kritischen Gesteinsschichten. Mit der Teufe nimmt nach jedem Bohrabschnitt der Rohrdurchmesser ab, weil die Verrohrung jeweils immer durch das vorherige Rohr

passen muss. Die Abb. 3.18 zeigt den schematischen Aufbau des Bohrlochausbaus für das Genesys-Projekt in Hannover (siehe /JUN 05/).

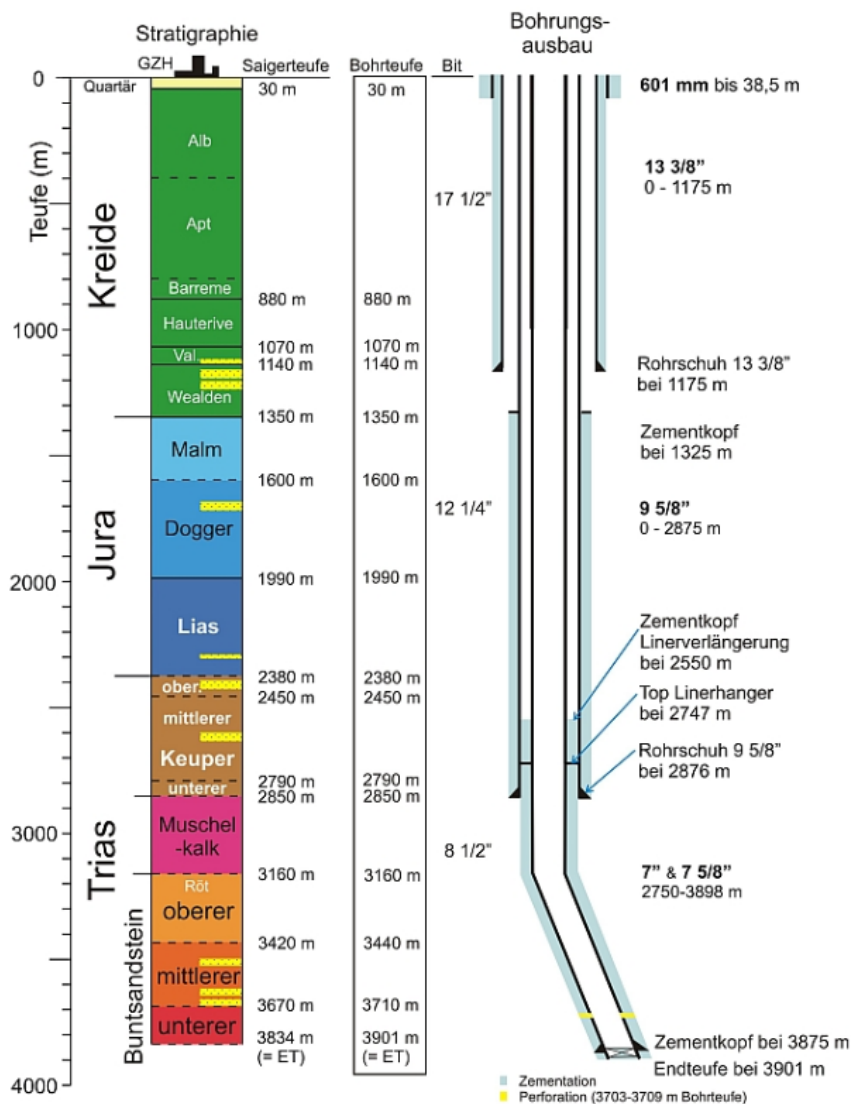


Abb. 3.18 Bohrlochausbau der Geothermie-Bohrung für das Genesys-Projekt /BGR 13/

Im Folgenden werden einige Anforderungen an das Bohrlochdesign von Geothermie-Bohrungen aufgezählt /SAA 08/. Danach werden die verschiedenen Rohrtouren näher erläutert. Für weitere Informationen siehe /WEG 06b/.

- Der geringe spezifische Energieinhalt des Thermalwassers erfordert hohe Fördermengen und entsprechend große Förderrohrdurchmesser
- Eine Bohrlochkomplettierung ohne Förderrohrtour (Förderung/Reinjektion über die Casings) ist nur einsetzbar, wenn keine oder vernachlässigbare Korrosion

auf das Casing einwirkt, ansonsten kann es zum Totalausfall der Bohrung kommen

- Die hohen Thermalwassertemperaturen führen im Betrieb zu erheblichen Längenänderungen/Spannungen in der Verrohrung (Längenänderungen im 10er m – Bereich)
- Eine identische Konstruktion von Reinjektions- und Förderbohrung ermöglicht einen Funktionswechsel im Zuge der bohrtechnischen Erschließung der Lagerstätte

Standrohr

Das Standrohr soll das Einbrechen der im oberen Bereich anstehenden Lockersedimente ebenso verhindern wie ein Unterspülen der Bohranlagenfundamente bei der Spülungszirkulation. Zudem wird der Zutritt von Oberflächenwasser in Grundwasserhorizonte verhindert. Das Standrohr muss deshalb in eine stabile Gesteinsschicht eingebracht und in den Bohrkeller einzementiert werden. Das Standrohr wird, soweit es die Bodenverhältnisse zulassen, bis in eine Teufe von 15 – 50 m in das Erdreich gerammt /BUJ 11/.

Ankerrohrtour

Die Ankerrohrtour wird typischerweise bis in eine wasserundurchlässige Schicht abgeteuft ab der keine Tiefenwässer mehr angetroffen werden, die mit oberflächennahen Aquiferen in Kontakt stehen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass keine Fluide aus tieferliegenden Schichten in das Grundwasser fließen. Unter den geologischen Bedingungen Mitteleuropas ist dies in der Regel die Basis der nicht oder wenig verfestigten Sedimente des Quartärs und des Tertiärs. Die Ankerrohrtour sichert somit den weniger standfesten Bereich der Lockersedimente ab. Zudem dient die Ankerrohrtour zur Lastaufnahme der nachfolgenden Rohrfahrten und der Steigrohre und der Vermeidung von Spülungsverlusten.

Zudem wird auf die Ankerrohrtour die Blowout-Preventeranlage montiert. Die Einbautiefe dieser Rohrtour ist so zu wählen, dass sie beim weiteren Bohrverlauf dem möglicherweise zu erwartenden Lagerstättendrücken auch bei einem geschlossenen Preventer standhält. Die Tiefe der Ankerrohrtour kann von ein paar hundert Metern bis zu 2.000 m Tiefe oder mehr betragen. Es wird empfohlen, die Ankerrohrtour mindestens

30 m unterhalb des tiefsten Aquiferes einzubauen und die Rohrtour komplett von unten nach oben zu zementieren, um eine vollständige Isolierung der Aquifere zu gewährleisten. In einigen Fällen werden kritische hydrogeologische Bedingungen angetroffen, so dass die Ankerrohrtour nicht tief genug gesetzt werden kann, um den tiefsten Aquifer abzudichten. In diesem Fall ist es notwendig, zusätzliche so genannte Zwischenrohr-touren einzubauen /BUJ 11/.

Zwischenrohr-touren

Zum Einbau von Zwischenrohr-touren kommt es, wenn zwischen den Einbauteufen von Ankerrohrtour und Produktionsrohrtour verschiedene kritische Bereiche angetroffen werden. Zu diesen Schichten gehören z. B. Bereiche mit hohen Spülungsverlusten, Nachfall von Sediment in das Bohrloch, quellende Gesteinsschichten, Auskesselungen in der Bohrlochwand und Zufluss von drückenden Formationsfluiden. Auch hier muss vermieden werden, dass verschiedene Grundwasserleiter hydraulisch verbunden werden. Deshalb werden hier, analog zum Setzen von Standrohr und Ankertour, die einzelnen Gesteinsschichten nacheinander durchbohrt und verrohrt /SCI 12/. In vielen Fällen ist es nicht notwendig, die Zwischenrohr-touren komplett zu zementieren. Dies gilt insbesondere in den Fällen, in denen die Ankerrohrtour die Grundwasservorkommen vollständig schützt /API 09/.

Produktionsrohrtour

Die letzte Rohrtour, die bis in den Bereich der durchbohrten Lagerstätte reicht, wird Produktionsrohrtour genannt. Der Zweck der Produktionsrohrtour ist die zonale Isolierung der Förderzone von allen anderen Gesteinsschichten. Da diese Rohrtour im direkten Kontakt mit den Fluiden in der Lagerstätte steht, werden besondere Materialanforderungen an die Verrohrung gestellt. Wenn die Produktionsrohrtour nicht bis zutage eingebaut, sondern in der vorhergehenden Rohrtour abgehängt ist, wird eine solche Rohrtour als Liner bezeichnet /BUJ 11/. Die Produktionsrohrtour muss nicht komplett zementiert werden. Der Zementkopf sollte mindestens 150 m über der Geothermielagerstätte liegen.

Förderrohrtour (Tubingstrang)

Da Schäden an der Produktionsrohrtour zum Verlust der Bohrung führen können, wird in die Produktionsrohrtour noch eine so genannte Förderrohrtour eingebaut. Diese wird

am unteren Ende gegen die Produktionsrohrtour bzw. perforierte Rohrabschnitte durch einen Packer abgedichtet. Im Zwischenraum zwischen Liner und Rohrtour wird eine nicht korrosive Schutzflüssigkeit eingefüllt. Undichtigkeiten im Liner können durch einen Druckanstieg im Zwischenraum registriert werden /SCI 12/.

Die Förderrohrtour, die als Tagedtour und damit längste Rohrtour den größten Belastungen ausgesetzt ist, ist sehr kostenintensiv. Deshalb gehen ihrem Einbau meistens ausgedehnte Lagerstättenuntersuchungen voraus, die klären sollen, ob die Produktivität der Lagerstätte überhaupt gegeben ist.

Bei stark korrosiven Wässern muss sichergestellt werden, dass die Förderrohrtour nicht versagt. Dazu kann folgende Maßnahme dienen: In den Strang bzw. in die über-tägige Rohrleitung wird ein Metallstück eingehängt, das etwas korrosionsempfindlicher ist als das Material, aus dem der Tubingstrang hergestellt wurde. Nach Unterschreiten einer vorher errechneten Materialmindestdicke wird der Tubingstrang ausgetauscht /BUJ 11/.

Rohrverbindungen

Futterrohre werden mittels Schraubverbindern miteinander verbunden. Allerdings sollen diese Verbinder in den meisten Fällen nicht nur die Rohrtour zusammenhalten, sondern sie müssen auch noch zusätzliche Aufgaben erfüllen, z. B. die Rohrtour abdichten. Grundsätzlich ist bei den Rohrverbindern zwischen hydraulisch dichten Verbindern und gasdichten Verbindern zu unterscheiden.

3.5.1.1 Verrohrungswerkstoffe

Die Auswahl der Werkstoffe hängt von der Zusammensetzung des Thermalwassers und den Spannungsverhältnissen im Untergrund ab. Es können metallische Werkstoffe, beschichtete Werkstoffe und Verbundwerkstoffe zum Einsatz kommen /BAC 12/.

- Unlegierte Kohlenstoff-Stähle (geringer Widerstand gegen Korrosion)
- Hochlegierte Chrom-Nickelstähle (keine flächenhafte Korrosion)
- Duplex Stähle (sehr gute Korrosionsbeständigkeiten)
- Super Duplex Stähle (sehr gute Korrosionsbeständigkeiten, bis 280 °C geeignet)

- Austenitische Stähle (gute Beständigkeit gegen Erosion und Korrosion)
- Stähle aus Nickelbasislegierungen (gute Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen)
- Stähle aus Titanlegierungen (exzellente Korrosionsbeständigkeit)

Die Materialkosten, aber auch die günstigen Materialeigenschaften, nehmen bei den oben aufgezählten Materialien von oben nach unten zu. Eine Alternative zu hochwertigen Stählen stellen beschichtete Stähle dar. Diese sind wesentlich günstiger, da auch unlegierte Stähle verwendet werden können und sie weisen eine gute Beständigkeit gegenüber Korrosion auf. Durch ihre geringere Oberflächenrauigkeit kommt es zudem zu weniger Ablagerungen und einem geringeren Druckverlust bei der Förderung. Voraussetzung ist aber, dass keine Feststoffe im Thermalwasser transportiert werden, die die Oberflächenbeschichtung abrasiv entfernen. Diese Feststoffe müssen, z. B. wenn diese Werkstoffe in Geothermieranlagen eingesetzt werden, vorher herausgefiltert werden. Hierzu werden Filter am Bohrlochkopf der Förderbohrung installiert.

3.5.2 Zementierung

Die derzeitige Zementationstechnik bei Geothermie-Bohrungen entspricht im Prinzip der von herkömmlichen Öl- und Gasbohrungen. Die geochemische Umgebung ist bei Geothermie-Bohrungen jedoch vielerorts aggressiver, deshalb werden höhere Anforderungen an diese Zemente gestellt /NEL 90/.

Durch die Zementierung des Ringraumes zwischen der Verrohrung und dem Gebirge mit Zement wird sichergestellt, dass keine hydraulische Verbindung zwischen Grundwasserstockwerken entstehen kann, dass die Verrohrung fest im Gebirge verankert ist, dass keine hydraulische Verbindung zwischen Lagerstätte und Tagesoberfläche entsteht und die Verrohrung vor aggressiven Formationsfluiden geschützt ist. Eine weitere Aufgabe ist es, die Verrohrung selbst am Knicken oder Versagen zu hindern. Bei der Ringraumzementation wird der Zementschlamm in den Futterrohren hinunter- und im Ringraum wieder hochgepumpt (Kontraktorverfahren), wobei sie die im Ringraum befindliche Bohrspülung vor sich herschiebt und verdrängt (Abb. 3.19).

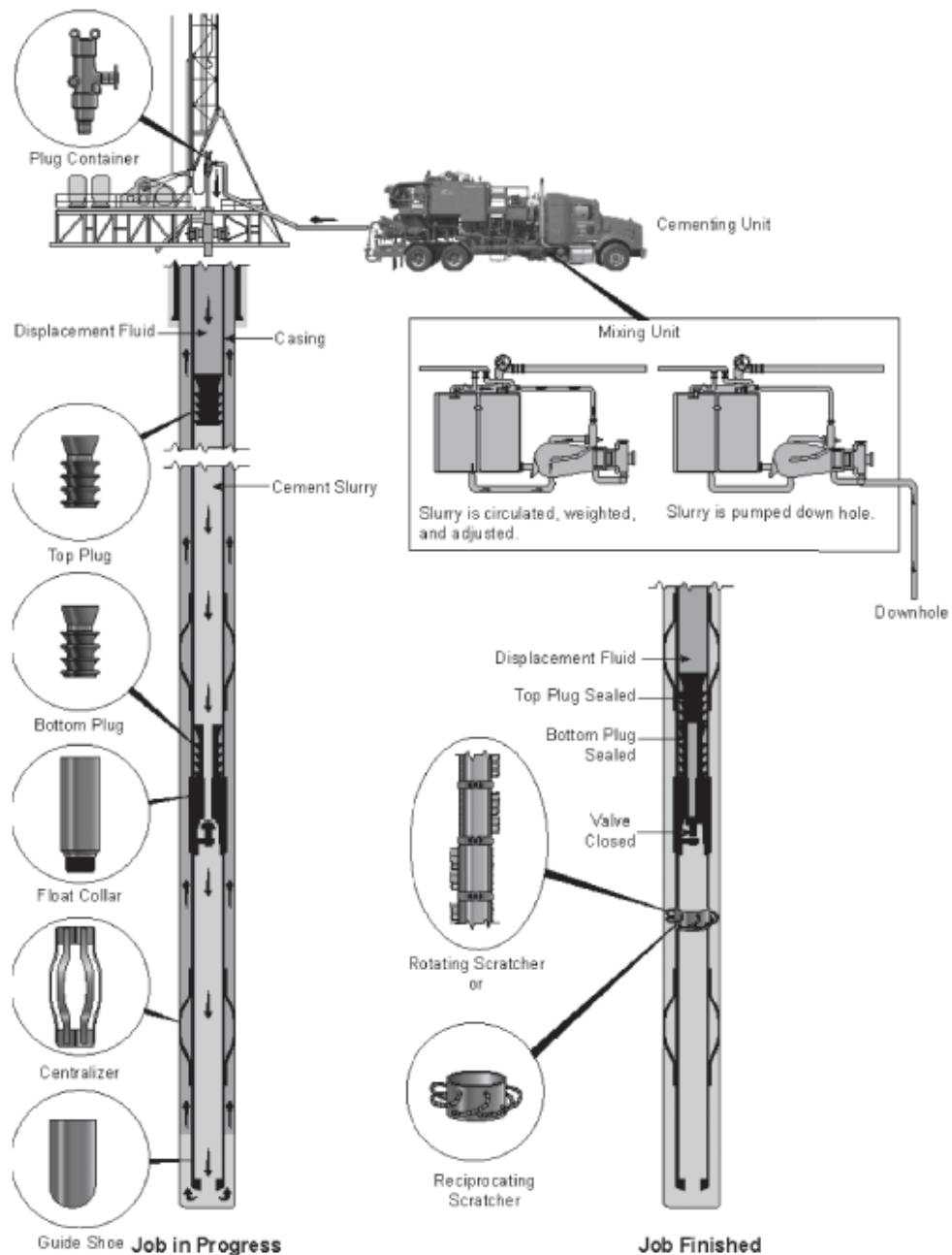


Abb. 3.19 Zementierung mit dem Kontraktorverfahren /API 09/

Durch folgende Einflüsse kann die Zementation fehlerhaft in die Bohrung eingebracht werden /BRA 11/.

- Hydraulische Verbindung von zwei Grundwasserleitern:
Durch vertikale Druckunterschiede und den dadurch ausgelösten vertikalen Grundwasserfluss kann eine Verlagerung der Zementsuspension erfolgen, wodurch keine ausreichende Zementation stattfindet.

- Mangelhafte Verdrängung der Spülung beim Zementationsvorgang:
Eine Vermischung von Zementsuspension und Bohrspülung führt zu einer geringeren Festigkeit des ausgehärteten Zements.
- Erbohren einer gasführenden Schicht:
Dadurch kann sich die Dichte des Zementes verringern oder Gasblasen eingeschlossen werden, mit der Folge, dass eine geringere Festigkeit des ausgehärteten Zementes eintritt. Zur Vermeidung können schnell abbindende „Lead Cements“ zuerst gepumpt werden, damit diese im Ringraum nahe der Oberfläche abbinden und damit ein Druckaufbau gewährleistet ist.
- Erbohren von Kartstgesteinen oder einer Kluftzone:
Hier kann ein Abfließen der Zementsuspension durch Hohlräume stattfinden.
- Erbohren einer Zone mit starker horizontaler Grundwasserströmung:
Hieraus erfolgt eine Verdünnung der Zementsuspension.
- Falsch gewählte Zementzusammensetzung:
Dies kann zur frühzeitigen Korrosion und Erosion der Zementation führen.
- Unzureichende Entfernung des Filterkuchens:
Dadurch findet keine optimale Anbindung des Zementes an das Gebirge statt.

Beim Zementationsvorgang muss darauf geachtet werden, dass der Druck des Zementes beim Einpressen in den Ringraum nicht den Gebirgsdruck übersteigt, damit keine zusätzlichen Klüfte bzw. Wegsamkeiten gebildet werden und nicht zu viel Zementsuspension in das Gebirge entweicht. Zudem darf die Zementsuspension nicht zu schnell eingepresst werden, um die Vermischung mit der Bohrspülung so gering wie möglich zu halten.

Hohe Pumpverluste in hoch permeablen Zonen werden durch den Einsatz von „light weight“ Zementen, Schaum-Zementen oder Glasperlen verringert. Um das Einbringen der Zementsuspension zu erleichtern und eine optimale Verteilung im Ringraum zu gewährleisten, kann die Zementsuspension unter Vibrationen gesetzt werden oder die Suspension wird durch Rotation der Verrohrung in Bewegung gehalten /WOJ 02/. In der Praxis sind diese Techniken schwer umzusetzen. Es gibt eine Vielzahl von Zementationstechniken, die hier nicht weiter ausgeführt werden. Für weitere Informationen siehe /ECO 90/, /REN 11/. Die API-Richtlinie „API guidance document HF1“ gibt eine Aufstellung der Richtlinien zum Erstellen und Testen der Zementierung /API 09/.

3.5.2.1 Zementwerkstoffe

Eine ordnungsgemäße Durchführung der Zementierung ist die Grundvoraussetzung für die Funktionalität der Bohrung im späteren Betrieb. Die Auswahl des Zementes richtet sich nach dem geochemischen Milieu, welches im von den Formationsfluiden sowie dem umgebenden Gestein abhängt /BAC 12/. Daher sollten während und nach jedem Bohrabschnitt die mineralogisch-petrophysikalischen, geochemischen und geomechanischen Eigenschaften der durchteuften Gesteinsschicht durch ein geeignetes Logging-Programm identifiziert werden.

Das American Petroleum Institute (API) hat verschiedene Zementklassen für verschiedene Temperatur und Druckbedingungen klassifiziert. Die gängigsten Typen H und G werden nochmal unterteilt in den gewöhnlichen Typ O und die Moderat- (MSR) und Hoch- (HSR) Sulfat resistenten Typen. Die verschiedenen Zementklassen sind für folgende Tiefenbereiche geeignet /NYG 10/:

- Klasse A und B: Anwendbar für Tiefen bis 1.830 m
- Klasse C: Anwendbar für Tiefen von 1.830 bis 3.050 m
- Klasse G: Anwendbar für Tiefen von 3.050 bis 4.270 m
- Klasse H: Anwendbar für Tiefen ab 2.440 m

In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der durchteuften geologischen Schichten und deren Formations- bzw. Lagerstättenfluiden wird der verwendete Standard Portland Zement durch Additive an die chemischen und physikalischen Bedingungen angepasst. Die verschiedenen Additive werden in die folgenden Kategorien unterteilt /NYG 10/.

1. Beschleuniger und Verzögerer:

Diese Zusatzstoffe beschleunigen oder verlangsamen den Aushärtungsprozess. Beispiele für Beschleuniger sind Calciumchlorid, Natriumchlorid und Kaliumchlorid. Beispiele für Verzögerer sind u. a. Calcium Ligninsulfonate oder Cellulose.

2. Dichtereduzierende Materialien:

Sie verhindern eine Ausbildung von zusätzlichen Klüften im umgebenden Gebirge. Beispiele sind Bentonite und andere Tonminerale.

3. **Beschwerungsmaterialien:**
Sie erhöhen die Dichte des Zementschlammes. Beispiele sind Baryte, Hämatite und Sand.
4. **Verflüssiger:**
Sie reduzieren die Viskosität des Zementschlammes und verhindern die Kluftbildung während des Pumpens. Beispiele sind NaCl, Kalzium und Ligninsulfonate.
5. **Filtrationskontrolle:**
Sie verhindern das Abfließen von Zementschlamm in durchlässige Bereiche. Beispiele sind Natronlauge oder Calciumhydroxid.
6. **Permeabilität:**
Zur Verringerung der Permeabilität der abgebundenen Zemente werden feinkörnige Zuschlagstoffe (z. B. feinkörniger Sand, Glaskügelchen etc.) eingesetzt.

Aufgrund der vielen Einflussparameter ist das Verhalten der Zusatzstoffe auf den Zement sehr variabel, auch innerhalb einer bestimmten API-Klassifikation. Im Folgenden sind die wichtigsten Einflussparameter auf das reaktive Verhalten des Zementes zusammengefasst /NEL 90/:

- Teilchengrößenverteilung,
- Verteilung der Silikat- und Aluminat-Phasen,
- Reaktivität von Hydrat-Phasen,
- Gips/Hemihydrat Verhältnis und gesamt Sulfat-Gehalt,
- Freier Alkaligehalt und
- Chemische Beschaffenheit, der Menge und spezifischen Oberfläche der ersten Hydratationsprodukte.

Andere wichtige Parameter sind Druck, Konzentration des Additivs, Mischenergie, Mischreihenfolge und Wasser zu Zement Verhältnis. Dabei ist auch auf die im Untergrund herrschenden Temperaturen zu achten, da das Reaktionsverhalten der Zemente eine starke Temperaturabhängigkeit besitzt.

Bei dem Kontakt des Zementes mit Salzwasser wird der Portland Zement durch die Zugabe von feinem Quarzmehl stabilisiert. Bei hohen CO_2 Gehalten im Thermalwasser ist es notwendig, ein anderes Zement-System, z. B. mit Calciumphosphat- oder Calciumaluminosilikaten zu verwenden /SAL 13/.

Zemente, die mit einer Salzlauge angerührt wurden, weisen eine geringere Permeabilität und eine höhere Korrosionsbeständigkeit gegenüber Säuren auf. Durch die Salzlauge wird ohne eine stark negative Beeinflussung der Dichte ein niedrigpermeabler Zementstein gebildet. Während der Korrosion besitzt der Zement die Fähigkeit zu einer gewissen Selbstheilung, z. B. durch das Auskristallisieren von Salzkristallen. Um den Angriff der wichtigen Zementphase Portlandit zu verringern, hat sich zudem die Zugabe von SiO_2 (z. B. Quarzsand oder Quarzglas) bewährt. Die Zusätze spielen auch eine entscheidende Rolle beim Schwindverhalten des Zements beim Abbinden. Generell sind Zemente empfindlich gegenüber Säuren und Sulfaten. Durch Verwendung von Aluminosilikaten, Flugasche oder Kieselgur, aber auch von fein gemahlenem Sand, kann die Korrosion sulfathaltiger Fluide durch die Bildung sekundärer Verbindungen deutlich reduziert werden. Zudem kann die Permeabilität des abgebundenen Zements durch die Zugabe von z. B. feinkörnigem Sand und Glaskügelchen etc. verringert werden /SCI 12/.

4 Geothermische Reservoirs

4.1 Einleitung

Bis in die 1970er Jahre wurden weltweit nur Hochenthalpiereservoirs für die Gewinnung von geothermischer Energie (für die Stromproduktion) genutzt. Hohe Temperaturen wurden zur Dampferzeugung benötigt, um Turbinen zur Stromerzeugung anzutreiben. Damit konnte nur ein verschwindend kleiner Anteil der auf der Erde insgesamt verfügbaren geothermischen Energie genutzt werden.

Mit dem Aufkommen neuer Technologien, wie Kalina- und Organic Rankine Cycle (ORC)-Generatoren, wurde auch die Nutzung von Niedrigenthalpieresourcen möglich, wenngleich diese auch noch nicht immer ökonomisch war. In jüngerer Zeit wurde mit dem Anstieg der Öl- und Gaspreise, mit steigendem Umweltbewusstsein, den international geführten Diskussionen zur globalen Klimaerwärmung sowie dem in Deutschland betriebenen Ausstieg aus der Kernenergie die Nutzung dieser noch brachliegenden Reserven attraktiv.

Weil geothermale Energie wegen der inhärenten Stabilität des Energieoutputs der Anlagen als Grundlast genutzt werden kann und weil die potentiell gewinnbare Energiemenge enorm groß ist, kann angenommen werden, dass es in den kommenden Jahrzehnten zu einem starken Anstieg der installierten Leistung kommen wird. Dies dürfte auch für Deutschland zutreffen, wo das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) Mindestabnahmepreise für erzeugte Energie vorsieht.

Die Nutzung der Niedrigenthalpie-Energie sollte jedoch nur dann in Erwägung gezogen werden, wenn der geologische Untergrund ausreichend bekannt ist, die Langzeitauswirkungen der Wärmeausbeute hinlänglich bekannt sind und die Prozesse, die zu einer Störung des Anlagenbetriebs führen können, verstanden sind und beherrscht werden. In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Rechenmodellen entwickelt, die das Verständnis und die Prognose der Entwicklung geothermaler Reservoirs verbessern sollen.

Da Informationen über die tiefliegenden Reservoirs nur über einzelne Bohrungen oder über indirekte Messungen (seismische Aufnahmen) zu erlangen sind, ist es nicht einfach, die dort ablaufenden Vorgänge genau zu erfassen. Darum stellt die Entwicklung zuverlässiger Reservoirmodelle, die die einzelnen Prozesse und ihre Wechselwirkungen beschreiben, einen essentiellen Teil der laufenden Forschungsarbeiten dar.

In geothermalen Reservoiren treten hydraulische, thermische, chemische, mechanische und biologische Prozesse auf, die miteinander wechselwirken und zusammen sehr komplexe Systeme bilden. Diese zahlreichen unterschiedlichen Aspekte werden bisher noch von keinem Rechenmodell in ihrer Vollständigkeit erfasst.

In den folgenden Abschnitten des Berichtes zum Thema geothermale Reservoirs werden die Einzelprozesse mit ihrer mathematischen Beschreibung kurz vorgestellt und auf die Möglichkeiten und Grenzen der existierenden Rechenprogramme zur Beschreibung des reaktiven Stofftransports in Reservoiren eingegangen. Darauf folgt eine Beschreibung der GRS-Beiträge zu diesem Thema.

Jedes geothermale Reservoir ist in Bezug auf die geologische Beschaffenheit der Wirtsgesteine des Thermalwassers, die Lösungszusammensetzungen, die herrschenden Temperaturen, Permeabilitäten usw. einmalig. Darum ist ein allgemeines, allumfassendes Modell zur Beschreibung aller Prozesse in allen Reservoirtypen nicht einfach zu realisieren. Entsprechend existieren solche allgemeingültigen Rechenmodelle auch nicht. Zwischen geothermalen Anlagen einer bestimmten geographischen Region gibt es allerdings Gemeinsamkeiten. Im Folgenden werden zunächst die allgemeinen Charakteristika geothermaler Reservoirs beschrieben und anschließend die geothermalen Regionen Deutschlands, das Norddeutsche Becken, der Oberrheingraben und die Süddeutsche Molasse mit Beispielen für einzelne Standorte vorgestellt.

4.2 Charakteristika geothermaler Reservoirs

In geothermalen Reservoiren, aus denen Thermalwasser gefördert und reinjiziert wird, sind thermische, hydraulische, mechanische, chemische und biologische Prozesse aktiv, die sich gegenseitig beeinflussen und damit auch die Reservoirsigenschaften verändern.

4.2.1 Relevante Prozesse

Die wichtigsten Prozesse in geothermalen Reservoiren sind thermischer, hydraulischer, mechanischer und chemischer Natur. Diese werden im Folgenden beschrieben.

4.2.1.1 Thermische Prozesse

In geothermalen Systemen ist der Wärmetransport das wichtigste Phänomen, das modelliert werden muss. Der Wärmetransport darf nicht isoliert, sondern muss in Abhängigkeit von der Hydrologie des Reservoirs betrachtet werden. Jedes Modell versucht zu beschreiben, wie dem Reservoir Wärme entzogen wird und die Thermalwassertemperaturen sich im Laufe der Betriebsdauer der Anlagen verändern. Wärmeaustausch kann auf den weiter unten beschriebenen Wegen erfolgen.

4.2.1.1.1 Wärmespeicherung

Für jedes Material ist die Aufheizung mit der Speicherung von thermischer Energie gleichzusetzen. Die Gesteins- und Wassertemperatur ist direkt proportional zu der akkumulierten Energie. Die in der Gesteinsmatrix gespeicherte Wärme wird bei der Nutzung des geothermalen Reservoirs entzogen. Damit ist auch die Erfassung der potentiellen Energie in jedem Modell ein wesentlicher Aspekt. Die Effizienz der Wärmespeicherung eines Materials wird durch seine Wärmekapazität c (in $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) definiert.

$$c = \frac{\partial h}{\partial T}$$

mit:

- h = Spezifische Enthalpie des Material (in $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$)
- T = Temperatur des Materials (in K)

Daraus folgt, dass die gespeicherte Energie (Enthalpie) H (in J) für ein bestimmtes Materialvolumen V (in m^3) durch die Gleichung definiert ist:

$$H = c\rho VT$$

mit:

- ρ = Materialdichte (in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Für poröse Medien können die Wärmekapazitäten als Funktion der Porosität n ausgedrückt werden. Die untenstehende Gleichung ist nur für gesättigte poröse Medien gültig (bei ungesättigten Medien muss die Gasphase berücksichtigt werden).

$$c\rho = nc_l\rho_l + (1 - n)c_s\rho_s$$

mit:

- x_l Wert der x -Variablen für die flüssige Phase
- x_s Wert der x -Variablen für die feste Phase

4.2.1.1.2 Wärmeadvektion

Advektion ist der Hauptpfad für den Wärmetransfer im Wasser. Der Wärmetransfer erfolgt über die (makroskopische) Fluidbewegung und kann durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$j_{adv} = c_f\rho_f T v$$

mit:

- j_{adv} = der advective Wärmefluss (in $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- x_f = Wert der x -Variablen der Fluidphase
- v = die Fließgeschwindigkeit ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Aus dem Umstand, dass die Fließgeschwindigkeit den Wärmetransfer beeinflusst, ergibt sich, dass die hydraulischen Prozesse beschrieben werden müssen.

4.2.1.1.3 Wärmeleitung

Wärmeleitung ist der Hauptmechanismus zum Transport von thermischer Energie in Festkörpern. Sie findet auch in Flüssigkeiten und Gasen statt. Bei der Wärmeleitung wird (zum Unterschied von der Advektion) kein makroskopischer Materialstrom benötigt. Sie ist folglich auch weniger effizient als die Advektion. Wärmeleitung erfolgt über eine mikroskopische Bewegung der Moleküle, die ihre kinetische Energie auf ihre Nachbarn übertragen.

Wärmeleitung kann durch ein Diffusionsgesetz (eine statistische Übersetzung der Molekülbewegung) beschrieben werden:

$$j_{diff} = -\lambda \nabla T$$

mit:

- J_{diff} = der diffusive Wärmefluss (in $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
- λ = die thermische Leitfähigkeit des Materials (in $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
- $c^f t$ = die Wärmekapazität des Fluids (in $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Für poröse Medien können die Wärmeleitungen als Funktion der Porosität n ausgedrückt werden. Die folgende Gleichung kann nur in gesättigten porösen Medien eingesetzt werden (für ungesättigte Medien muss die Gasphase mit berücksichtigt werden):

$$\lambda = n\lambda_l + (1 - n)\lambda_s$$

4.2.1.1.4 Wärmedispersion

Als Dispersion bezeichnet man in der Hydrologie einen Prozess, der ähnlich der Diffusion zu einem Ausgleich von Konzentrationsgradienten im Wasser führt. Die Wärmedispersion ist ein großräumiges Phänomen. Als Resultat dieses Prozesses kommt es infolge der statistischen Verteilung der Fluidfließgeschwindigkeit zu einem Ausgleich von Konzentrationsgradienten, scharfe Gradienten werden abgeflacht.

Die Wärmedispersion wird durch die Dispersivität α (in m) charakterisiert, die eine transversale (α_T) und eine longitudinale Komponente (α_L) aufweist. Aus der Dispersivität und der Fluidfließgeschwindigkeit kann der Dispersionsvektor \vec{D} berechnet werden:

$$\vec{D} = \alpha_L |v| \delta_{LT} + (\alpha_T - \alpha_L) \frac{v_L v_T}{|v|}$$

Die Dispersion kann dann wie folgt berechnet werden:

$$j_{disp} = -c_f \rho_f \vec{D} \cdot \vec{\nabla} T$$

mit:

- J_{disp} = der dispersive Wärmefluss (in $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

4.2.1.1.5 Wärmetransportgleichung

Aus der Kombination der oben beschriebenen Wärmephänomene kann die Wärmetransportgleichung wie folgt formuliert werden:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [-(\lambda + c_f \rho_f \vec{D}) \vec{\nabla} T + c_f \rho_f v T] = Q_T$$

mit Q_T = Wärmequelle (in $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)

Für die Charakterisierung eines geothermalen Reservoirs müssen folglich folgende Parameter bekannt sein:

- Die Wärmekapazitäten (des Fluids und des Gesteins): Wärmekapazitäten sind temperaturabhängig. Wenn für das Gestein keine Messungen bei der anvisierten Temperatur vorliegen, kann als Approximation ein Defaultwert von $1000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ angenommen werden.
- Die Wärmeleitfähigkeiten des Fluids und des Gesteins.
- Die Dichten von Fluid und Gestein.
- Die Wärmequelle.

4.2.1.2 Hydraulische Prozesse

Das Darcy-Gesetz wurde von Henry Darcy 1856 als empirische Gleichung formuliert. Seither wurde es theoretisch untermauert (es handelt sich um eine spezielle Lösung der Navier-Stokes-Gleichung) und findet sehr weite Anwendung.

Es beschreibt die laminare Strömung durch ein poröses Medium und kann daher auf die Strömung in Aquiferen angewandt werden.

$$\vec{u} = -\frac{\bar{k}}{\mu}(\vec{\nabla}p - \rho_f \vec{g})$$

mit:

- \vec{u} = die Fließgeschwindigkeit (in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- \bar{k} der Permeabilitätstensor des Gesteins (in m^2)
- μ die Viskosität des Fluides (in $\text{Pa}\cdot\text{s}$)

Aus der Kombination der Darcy-Gleichung mit der Massenbilanzgleichung ergibt sich die Strömungsgleichung in einem porösen Medium:

$$S_s \frac{\partial p}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot \left[\frac{\bar{k}}{\mu} (\vec{\nabla}p - \rho_f \vec{g}) \right] = Q_f$$

mit:

- Q_f = Volumenquellterm
- S_s = der spezifische Speicherkoeffizient in (in m^{-3})

Der spezifische Speicherkoeffizient kann wie folgt definiert werden:

$$S_s = \frac{(\alpha - n)}{K_s} + \frac{n}{K_f}$$

mit:

- α = Biot-Willis Koeffizient
- n = Porosität
- K = Kompressibilität (des Fluids bzw. des Mediums in Pa^{-1})

Die Klufftströmung kann durch eine Erweiterung der Massenbilanzgleichung auch modelliert werden (unter der Annahme, dass es keine Klufftfüllung gibt).

Für die Charakterisierung der Reservoireigenschaften werden folgende Parameter benötigt:

- Porosität der Reservoirgesteine
- Permeabilität des Reservoirs und der Klüfte
- Viskosität des Fluids, welches im Reservoir bewegt wird.

Die Klufftkonfiguration und deren Permeabilität sind ebenfalls wichtige Daten, die jedoch schwer zu ermitteln sind, weil sie meist nur aus Bohrlochinformationen und seismischen Messungen stammen. Bohrkernmaterial kann sehr genaue Daten liefern, ihre Extrapolation auf Reservoirskala ist jedoch problematisch. Seismische Aufnahmen dagegen zeigen häufig nur die größeren Störungen, von denen nicht bekannt ist, ob sie hydraulisch aktiv sind. Daher sind übliche Vorgehensweisen, entweder stochastische Reservoirmodelle aufzustellen /WAT 95/ oder aus vorhandenen Informationen (Spannungsmessungen; Bohrlochmessungen, etc.) die Richtung der Hauptstörungen abzuleiten und damit Modelle mit einer begrenzten Zahl von hydraulisch aktiven Klüften aufzustellen /KOL 95/.

4.2.1.3 Mechanische Prozesse

Das Deformationsverhalten eines Materials wird durch mechanische Prozesse beschrieben, ebenso wie das Öffnungs- und Schließungsverhalten von Rissen. Für das Deformationsverhalten der verschiedenen Materialien unter mechanischer Beanspruchung finden grundsätzlich vier unterschiedliche Stoffmodelle Anwendung. Man unterscheidet dabei in

- reversible (elastische) Verformungsvorgänge und
- irreversible (inelastische) Verformungsvorgänge (Fließvorgänge).

Mit der Elastizitätstheorie werden elastische Verformungsvorgänge beschrieben, die reversibel sind, d. h. dass nach Wegfallen der äußeren Beanspruchung das Material zu seiner Ausgangsform zurückkehrt.

Reversible Verformungsvorgänge, die mit dem Beanspruchungszustand erst zeitabhängig auftreten, werden mit der Visco-Elastizitätstheorie beschrieben. Die inelastischen Verformungsvorgänge werden ebenso nach ihrer Zeitabhängigkeit unterschieden:

Die Plastizitätstheorie beschreibt den Spannungs- und Verzerrungszustand von festen Körpern unter dem Einfluss einer äußeren Beanspruchung nach Überschreitung der Plastizitätsgrenze. Dabei kommt es zu einer nach Krafteinwirkung verbleibenden irreversiblen Formveränderung.

Treten die mit der Überschreitung einer Fließgrenzbeanspruchung zusammenhängenden irreversiblen Verformungen zeitabhängig auf, so wird der Spannungs-Verzerrungszustand mit der Visko-Plastizitätstheorie beschrieben.

Diese Prozesse können mit unterschiedlichen rheologischen Modellen abgebildet werden:

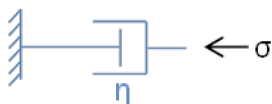
1. Federmodell: Die elastische Federkonstante k beschreibt das elastische Spannungs- (σ) bzw. Verzerrungs- (ε) Verhalten

$$\sigma = k \cdot \varepsilon$$



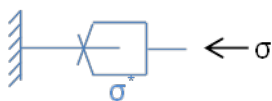
2. Das viskose Dämpfermodell beschreibt das Verhalten zwischen der Spannung und der Verzerrungsrate mit einem Proportionalitätsfaktor η

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$$




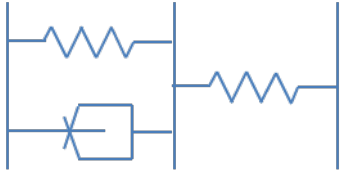
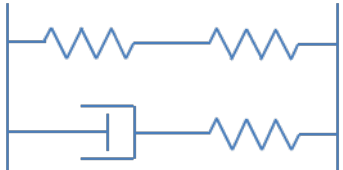
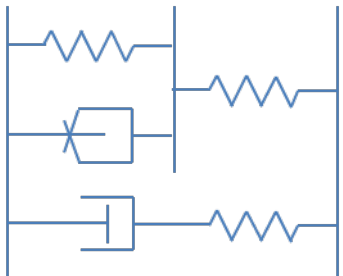
3. Ideal-plastisches Verhalten wird mit dem Gleitelement beschrieben, das erst nach Überschreitung einer Fließgrenzbeanspruchung (σ^*) zu Verzerrungen führt

$$\varepsilon = \begin{cases} 0, & \sigma < \sigma^* \\ \varepsilon(t, \sigma), & \sigma \geq \sigma^* \end{cases}$$



Mit einer Kombination dieser rheologischen Modelle kann das mechanische Spannungs-Verzerrungsverhalten von Festgesteinen modelliert werden. Die Modelle werden in Tab. 4.1 zusammen mit einem Anwendungsbeispiel angegeben.

Tab. 4.1 Zuordnung von rheologischen Modellen zu Gesteinsbeispielen mit unterschiedlichem Verformungsverhalten

| Mathematisches Modell | Rheologisches Modell | Anwendungsbeispiel |
|---------------------------|---|---|
| Elastisches Modell |  | Kristallines Gestein (Granit,...), Festes Sedimentgestein (Sandstein, ...) |
| Elasto-plastisches Modell |  | Weniger festes Sedimentgestein (Tuff,...) |
| Visko-elastisches Modell |  | Steinsalz |
| Visko-plastisches Modell |  | Tongestein |

Die vorstehend beschriebenen Modellvorstellungen können das Spannungs-Verzerrungsverhalten von festen Körpern abbilden, nicht jedoch das Öffnungs- und Schließungsverhalten von Rissen. Gerade diese Strukturen (Klüfte, Trennflächen) beeinflussen das Verformungsverhalten in situ überdimensional und sind bei der Modellierung des Verbundes von Gestein und Trennflächengefüge durch zusätzliche Materialmodelle zu berücksichtigen.

Es ist überaus schwierig zu bestimmen, wann, wie und wo es bei einem Material zum Bruch kommt (auch unter kontrollierten Laborbedingungen) und es ist notwendig die Materialstruktur genau zu kennen, wenn Vorhersagen gemacht werden sollen.

4.2.1.4 Reaktiver Stofftransport

Die chemischen Prozesse in einem geothermalen Reservoir können nur dann richtig beschrieben werden, wenn die Bewegung der reagierenden Spezies innerhalb des Systems, bekannt unter der Bezeichnung Stofftransport, mit berücksichtigt wird.

4.2.1.4.1 Stofftransport

Zur Berechnung des reaktiven Stofftransports muss zuerst der Transport der verschiedenen Spezies in der fluiden Phase modelliert werden können. Vernachlässigt man die radioaktiven und chemischen Prozesse, wird der Stofftransport analog dem Wärmetransport von drei Phänomenen angetrieben:

- Advektion, bei der die chemischen Spezies durch das sich bewegende Fluid transportiert werden und die Fluidbewegung von den hydraulischen Eigenschaften des Gesteins abhängig ist. In der Hydrologie bezeichnet man als *Advektion* den Transport eines im Wasser gelösten bzw. suspendierten Stoffes mit der Strömung des Wassers, also mit dessen mittlerer Geschwindigkeit und Richtung.
- Diffusion, bei der die Spezies infolge eines Konzentrationsgradienten bewegt werden. Die Diffusion ist ein natürlich ablaufender physikalischer Prozess, der zu einer vollständigen Durchmischung der Teilchen führt.
- Dispersion, ein Prozess, der ähnlich der Diffusion zu einem Ausgleich von Konzentrationsgradienten im Wasser führt. Im Porenraum eines Grundwasserkörpers herrscht eine sehr heterogene Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten. Nahe dem Rand einer Pore sind diese z. B. aufgrund der Viskosität des Wassers und der Reibung an der Matrix geringer als in der Mitte der Pore. Ebenso herrschen in benachbarten Poren unterschiedlicher Geometrie unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten. Anfangs direkt benachbarte Wasserteilchen bewegen sich so aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeiten, mit denen sie transportiert werden, auseinander.

Der eindimensionale Transport (1D-Transport) in einem isotropen Medium kann unter Vernachlässigung der chemischen Prozesse wie folgt beschrieben werden:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + q \frac{\partial C}{\partial x} = D_{xx} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

mit:

- C = Konzentration der transportierten Spezies (kf.m⁻³)
- q = Flussrate (m.s⁻¹)
- x = Entfernung (m)
- D_{xx} = Dispersionskoeffizient in x-Richtung (m².s⁻¹)

4.2.1.4.2 Chemische Prozesse

Der Stofftransport ist ohne Berücksichtigung der physikalischen (radioaktiven) und chemischen Prozesse nicht vollständig beschrieben.

In geothermalen Reservoiren befinden sich die Gesteine in einem radioaktiven Gleichgewicht, d. h. Bildung und Zerfall der Nuklide halten sich die Waage. Die Gesteine sind die Quelle der radioaktiven Elemente in den Lösungen, d. h. die Konzentration von Radionukliden in den Fluiden ist relativ konstant. Darum ist es nicht erforderlich, den radioaktiven Zerfall mit zu berücksichtigen.

Die chemischen Prozesse dagegen haben entscheidenden Einfluss auf die Zusammensetzung der Grundwässer. Auflösungs- und Ausfällungsprozesse können die Porosität und damit die Durchlässigkeit der Reservoirgesteine stark verändern. Darum ist es wichtig, diese Prozesse im Detail zu verstehen und sie quantitativ beschreiben zu können. Mobilisierung und Ausfällung von Spezies im geothermalen System sollten orts- und zeitabhängig richtig beschreibbar sein.

In einem geothermalen System gibt es eine große Anzahl von chemischen Spezies, die miteinander wechselwirken. Dazu sind die Wässer in den Reservoiren der Tiefengeothermie häufig hochsalinar und enthalten gelöste Gase (CO₂, CH₄, N₂, u. a. u. a.). Dieses hochkomplexe chemi-

sche System ist im Laufe der geothermalen Energiegewinnung großen Veränderungen unterworfen.

Beim Aufstieg des Thermalwassers in der Produktionsbohrung sowie beim nachfolgenden Wärmeentzug reduzieren sich der Druck (typischerweise von 300-500 bar auf 20 bar) und die Temperatur (von 150-100°C auf 70°C). Dies führt zur Übersättigung und Ausfällung gelöster Minerale, zur Entgasung der gelösten Gase und damit zu starken Änderungen des geochemischen Milieus. Gleichzeitig kann es zur Korrosion der Bohrlochverrohrung kommen, was zur Freisetzung von weiteren Elementen ins Fluid führen kann.

Nach der Reinjektion des abgekühlten Thermalwassers über die Reinjektionsbohrung wird der Wasserdruck wieder erhöht. Das reinjizierte Wasser erreicht jedoch die Reservoirtiefe mit einer Temperatur und einer chemischen Zusammensetzung, die sich von dem dort befindlichen Thermalwasser stark unterscheidet, was zu intensiven Wechselwirkungen mit dem Reservoirgestein führen und die Porosität und Permeabilität weiter verändern kann. Alle diese beschriebenen Prozesse müssen verstanden werden und quantitativ beschreibbar sein: Dazu gehören:

1. Säure-/Basen-Reaktionen. Säuren und Basen in der Lösung reagieren miteinander und bestimmen den pH-Wert der Wässer.
2. Oxidations-/Reduktionsreaktionen. Oxidierende und reduzierende Spezies reagieren miteinander und legen den Eh-Wert der Wässer fest.
3. Komplexbildungsreaktionen, bei denen Anionen und Kationen der Lösung sich zu neuen komplexen aquatischen Spezies kombinieren.
4. Sorptionsreaktionen, bei denen die wässrigen Spezies an der Gesteinsmatrix sorbiert werden. Sorption ist eine Sammelbezeichnung für Vorgänge, die zu einer Anreicherung eines Stoffes innerhalb einer Phase oder auf einer Grenzfläche zwischen zwei Phasen führen. Die Anreicherung innerhalb einer Phase nennt man Absorption, die an der Grenzfläche Adsorption.
5. Mineralauflösung und Ausfällung.
6. Gasauflösung und Entgasung (besonders in den Bohrungen von Bedeutung).

Die o. g. Reaktionstypen können über Gleichgewichtsgleichungen dargestellt werden, in die die entsprechenden Gleichgewichtskonstanten eingehen. Diese Gleichgewichtskonstanten sind jedoch häufig nicht ausreichend, um die chemischen Prozesse richtig zu modellieren, weil manche Reaktionen kinetisch kontrolliert sind. Beispielsweise ist die Aufenthaltsdauer des Thermal-

wassers in der Geothermieanlage im Vergleich zur Verweildauer im Reservoir sehr kurz. Einige Mineralphasen fallen darum in der Anlage nicht aus, auch wenn dort Sättigungskonzentrationen erreicht werden. Diese Phasen können dann später in der Reinjektionsbohrung oder im Reservoir ausfallen. Zusätzlich zu den anorganisch-chemischen Reaktionen können auch Bakterien, die mit dem Wasser ins Reservoir eingebracht werden, chemische Reaktionen auslösen, die die Effizienz einer Geothermieanlage beeinflussen können.

4.2.2 Wechselwirkungen zwischen Prozessen

Die verschiedenen thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozesse in geothermalen Reservoiren beeinflussen sich gegenseitig und damit die Reservoireigenschaften. Tab. 4.2 zeigt diese Zusammenhänge.

Tab. 4.2 Wechselwirkungen in geothermischen Reservoiren: X-Prozesse beeinflussen Y-Prozesse /FOK 11/

| Y Prozess X Prozess | Hydraulisch | Thermisch | Mechanisch | Chemisch | Radiologisch |
|------------------------|--|---|--|---|--|
| Hydraulisch | Strömung Klüfte Permeabilität Porosität Diffusion | Thermische Diffusion Konvektion Adiabatische Prozesse | Quellen von Tonen Poro- Elastizität Kompaktion Hydraulisches Fracken | P-abhängige Reaktionen Transport gelöster Spezies | Mobilisierung von Radionukli- den |
| Thermisch | Thermische Stimulation (Viskosität) Zwei- Phasenfluss | Thermische Leitfähigkeit Wärmekapazitäten | Thermo- elastizität Plastizität Thermisches Fracking | T-abhängige Reaktionen | --- |
| Mechanisch | Kluftgeo- metrien durch Kompaktion angetriebene Thermalwas- serpro- duktion | --- | $\epsilon - \sigma$ (nicht) lineare Elastizität Plastizität Seismizität Subsidenz | Änderungen reaktiver Oberflächen | --- |
| Chemisch | Gesteinsauf- lösung Ausfällungen im Porenraum | Reaktionswärme | Quellung | Chemische Gleichgewichte Kinetik | Mobilisierung von Radionukli- den |
| Radiologisch | -- | Wärmeproduktion | --- | --- | Zerfallsreihen des U und Th |

Aus der Tabelle wird auch die Komplexität der Phänomene deutlich, die in geothermischen Reservoiren zu betrachten sind und die die Entwicklung von Rechenmodellen, die das Reservoir vollständig beschreiben können, so schwierig machen. Dabei sind in dieser Tabelle biologische Prozesse, die auch eine Rolle spielen können, nicht aufgeführt.

4.3 Möglichkeiten und Grenzen der Reservoirmodellierung

Realitätsnahe Vorstellungen über die vielen konkurrierenden Phänomene und wechselwirkenden Elemente bei der Förderung von Thermalwasser aus einem geothermischen Reservoir können über direkte Messungen und/oder rechnerische Modellierungen erhalten werden.

Für die Modellierung werden gekoppelte Rechencodes benötigt, die in der Lage sind, die hydraulische Strömung, den Wärmetransport, den reaktiven Stofftransport und mechanische Prozesse zu beschreiben.

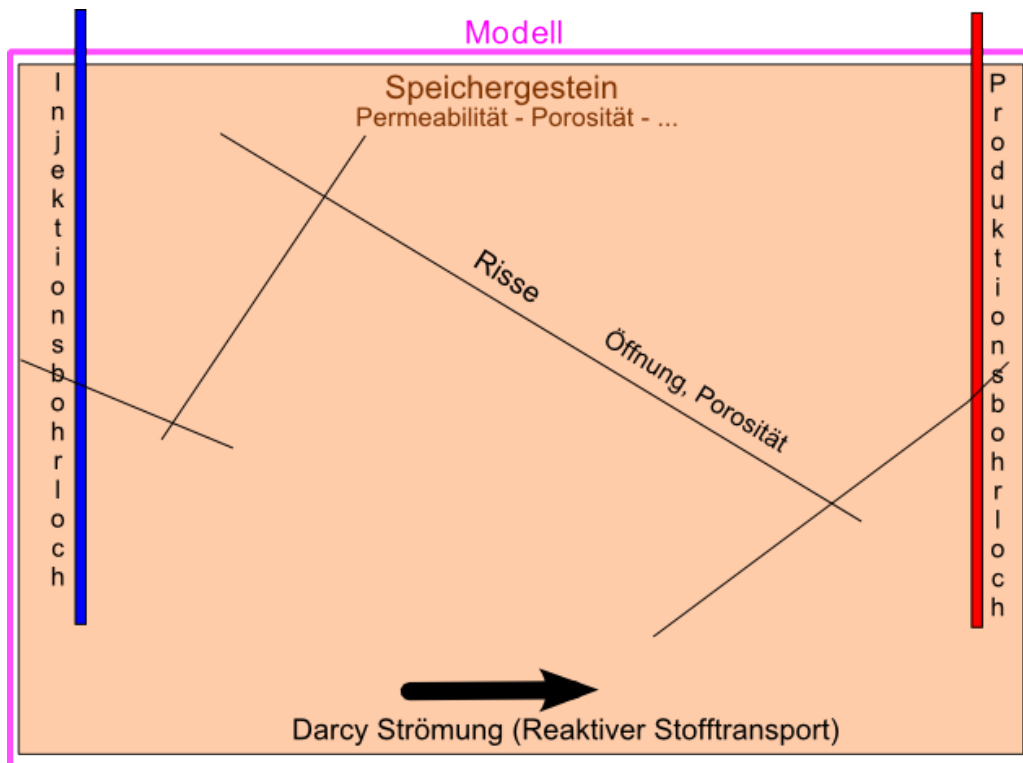


Abb. 4.1 Modell eines geothermischen Reservoirs

In den folgenden Abschnitten wird gezeigt, wie die wichtigsten Prozesse in den Rechenmodellen beschrieben werden.

4.3.1 Hydraulische Prozesse

Zur Berechnung der Strömung von Fluiden und Gasen im Reservoir wird in den meisten Rechen-codes die Darcy-Gleichung verwendet. In Niedrigenthalpie-Reservoiren wird zur Energiegewinnung Thermalwasser gefördert, dessen Temperatur (unter dem herrschenden Druck im Reservoir) unterhalb der Verdampfungstemperatur liegt. Das heißt, dass es nicht erforderlich ist, Zweiphasenströmung zu modellieren, sondern dass es ausreicht, die Fluidströmung zu beschreiben.

Allerdings kann bei Verwendung der Darcy-Gleichung turbulente Strömung nicht beschrieben werden, was für die richtige Beschreibung der Strömung in der Nähe der Bohrungen, wo solche Randeffekte auftreten können, problematisch sein kann. Es kann jedoch auch sein, dass die Länge der aktiven Zone des Bohrlochs (der Bereich, wo das Wasser aus dem Reservoir ins Bohrloch übergeht, oftmals Hunderte von Metern) ausreicht, um turbulente Strömung auszuschließen, vor allem bei üblichen Fließraten von 80 - 100 kg/s. Für großräumige Modellierungen eines ganzen Reservoirs können solche lokalen turbulenten Phänomene in erster Näherung vernachlässigt werden, da sie nur sehr geringe Anteile des gesamten betrachteten Gebietes betreffen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Fähigkeit eines Modells, die Strömung sowohl in der porösen Matrix als auch in Klüften zu beschreiben. Da Klüfte einen entscheidenden Einfluss auf die Strömungseigenschaften eines Reservoirs haben, muss das Fließverhalten der Wässer auch auf Klüften beschrieben werden. In manche Rechen-codes ist diese Möglichkeit bereits implementiert. Aber auch mit Codes, bei denen das nicht der Fall ist, kann das Fließverhalten auf Klüften beschrieben werden. Dort werden die Klüfte als eigene Elemente mit einer Porosität nahe Null in der Gesteinsmatrix angenommen und eine räumlichen Diskretisierung gewählt, die den Abmessungen der Klüfte angepasst ist.

4.3.2 Thermische Prozesse

Der Wärmetransport ist recht gut verstanden und kann daher von den gängigen Rechencodes gut modelliert werden. Ein Problem stellt noch die Berechnung der Wärmeadvektion dar, weil dafür die Fluidströmung in der Gesteinsmatrix bekannt sein muss.

4.3.3 Chemische Prozesse

Geochemische Rechencodes sind auf thermodynamische Datenbasen angewiesen, mit denen Gleichgewichtsmodellierungen der ablaufenden chemischen Reaktionen durchgeführt werden können. Durch intensive internationale Forschungsarbeiten sind in den letzten Jahrzehnten solche Datenbasen für die Belange der Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen für Standardbedingungen (25°C und Atmosphärendruck) entwickelt worden. Im Unterschied zur Endlagerung radioaktiver Abfälle müssen für Belange der Geothermie die Temperatur- und Druckabhängigkeiten thermodynamischer Daten bekannt sein, um zufriedenstellende Modellierungsergebnisse zu erhalten. Diese Abhängigkeiten sind für die meisten in der Geothermie relevanten Ionenkombinationen nicht oder noch nicht bekannt und müssen ermittelt werden. Erschwerend kommt hinzu, dass in zwei der drei Geothermieprovinzen Deutschlands hochsalinare Wässer vorkommen, die mit den international verfügbaren Datenbasen (die für die Modellierung niedrigrsalinärer Wässer entwickelt wurden) nicht beschreibbar sind. Um hochsalinare Lösungen richtig beschreiben zu können, müssen Wechselwirkungsparameter, sogenannte Pitzerparameter, bekannt sein bzw. ermittelt werden und zwar sowohl temperatur- als auch druckabhängig. Dank der Forschungsarbeiten für die Endlagerung im Salz wurden in Deutschland solche Pitzerparameter für viele auch in der Geothermie relevanten chemischen Reaktionen abgeleitet, wenngleich auch nur für Standardbedingungen. Temperatur- und Druckabhängigkeiten für einzelne in der Geothermie besonders wichtige Prozesse wurden in dem Forschungsvorhaben GeoDat ermittelt. Andere Daten, besonders die für die Beschreibung redox-sensitiver Reaktionen, stehen noch aus und müssen noch ermittelt werden.

Im Unterschied zur Endlagerung radioaktiver Abfälle kommt dem Druck in der Geothermie eine besondere Bedeutung zu, da sich dieser auf dem Transportweg der Fluide stark ändert. Veranschaulicht wird dies in Abb. 4.2. Diese zeigt als Beispiel die Temperatur- und Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Kalzit. Thermalwasser, welches im Reservoir 150 °C heiß ist und unter 500 bar Druck steht, verändert seine Temperatur in der Förderbohrung, auf dem Weg nach oben vergleichsweise wenig, der Druck allerdings fällt von 500 bar auf 1 bar ab, was zu einer 20%-

igen Reduzierung der Kalzitlöslichkeit und somit zu massiver Scalebildung führt. Problematisch bei der Modellierung dieser Prozesse ist, dass der Einfluss von Hintergrundsalzen, die zu einer insgesamt höheren Ionenstärke führen, nicht bekannt ist und in dedizierten Versuchen ermittelt werden müsste. Entsprechende Forschungsprogramme sind aufwändig und schwierig zu finanzieren. Letztlich führt dies zu der Situation, dass diese Effekte i. d. R. nicht richtig beschrieben werden können und die, Modellierungsergebnisse letztlich nicht belastbar sind.

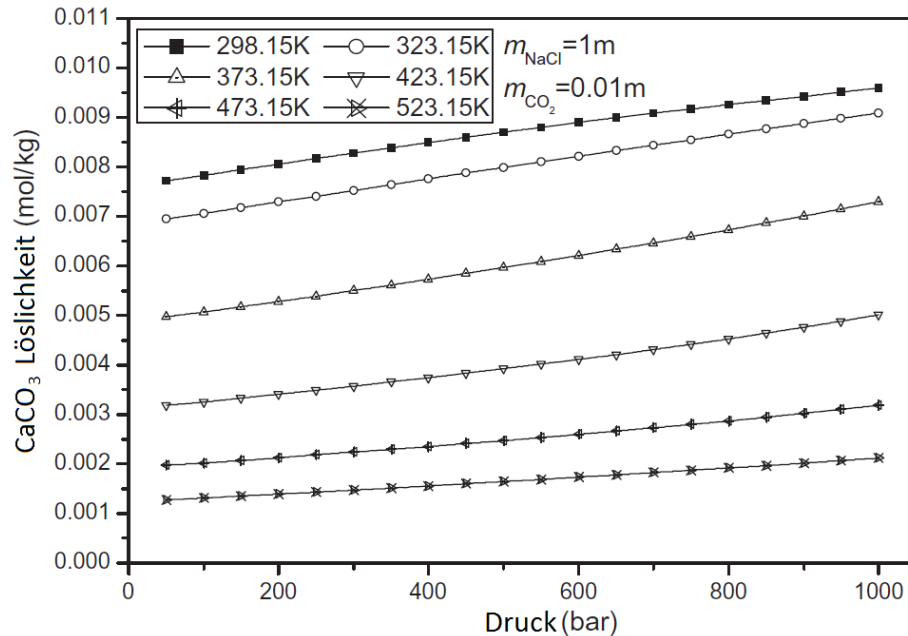


Abb. 4.2 Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Kalzit bei verschiedenen Temperaturen in einer 1-Molal. NaCl-Lösung mit 0,01 m CO₂ /DUA 08/

Über die geochemischen Modellrechnungen können Rückschlüsse auf Änderungen der hydraulischen Eigenschaften des Reservoirs gezogen werden. Als Ergebnis der Modellierung lassen sich Volumenänderungen berechnen, die wiederum Rückschlüsse auf Veränderungen der Permeabilität des Reservoirs zulassen. So ergeben sich wertvolle Hinweise z. B. auf die Auswirkungen der Einleitung abgekühlter Lösung in das Reservoir im Bereich der Reinjektionsbohrung. Hier kann es durch die Vermischung mit dem heißen Thermalwasser zur Reduzierung der Löslichkeit von Mineralen wie Karbonaten und Silikaten (Feldspäten) kommen, die dann ausfallen und die Poren verschließen, wodurch sich die hydraulischen Eigenschaften des Gesteins stark verändern können.

Änderungen von Porosität und Permeabilität müssen auch für die Klüfte ermittelt werden. Dafür können jedoch nicht die gleichen Porositäts-/Permeabilitätsbeziehungen benutzt werden, die für

die poröse Matrix gelten. Ausfällungen auf Klüften finden nicht gleichmäßig im gesamten Hohlraum der Kluft statt, sondern an den Kluftwandungen. Die Öffnungsweiten der Klüfte werden somit reduziert. Dadurch verringert sich die Kluftpermeabilität jedoch nicht gleichmäßig. Sie wird vielmehr von den Orten mit der geringsten Öffnungsweite bestimmt. Dieses Phänomen kann von den verfügbaren Rechencodes in der Regel nicht beschrieben werden. In der GRS wird z. Z. eine Doktorarbeit durchgeführt, die diese Funktionalität in den Code OpenGeoSys implementieren soll.

Letztendlich spielen in der Geothermie, anders als in der Endlagerproblematik, kinetische Prozesse eine wichtige Rolle. In einem Endlager werden die chemischen Prozesse über extrem lange Zeiträume betrachtet, in denen sich Temperaturen und Drücke praktisch nicht ändern und sich Gleichgewichte einstellen können. Entsprechend können kinetische Effekte vernachlässigt werden. In der Geothermie dagegen wird Thermalwasser sehr schnell aus großen Tiefen an die Oberfläche gepumpt, wodurch sich Temperaturen und Drücke sehr schnell und sehr stark verändern und für eine Gleichgewichtseinstellung die Zeiten viel zu kurz sind. Dadurch kommt es zu starken Übersättigungen, die im System während des Betriebs einer Anlage durch Ausfällungen (Scalebildung) an nicht genau zu definierenden Orten auch nur z. T. abgebaut werden. Daher können geochemische Codes, die nur Gleichgewichte betrachten, keine befriedigenden Antworten auf die interessanten Fragen der Geothermie liefern, da sie nicht in der Lage sind, die Realität befriedigend abzubilden. Kinetische Parameter werden gebraucht, die in der Regel nicht vorhanden sind und nur experimentell bestimmt werden können. So ist beispielsweise die Bildung von Quarz kinetisch gehemmt, d. h. sie erfolgt viel langsamer als die Gleichgewichtseinstellung. Wird dieser Umstand nicht berücksichtigt, ist nach der Rechnung eine Ausfällung sofort nach Erreichen der Sättigung zu erwarten, was zu einer instantanen Änderung der Permeabilität führt. Dies entspricht jedoch nicht den Beobachtungen.

Computercodes sollten alle relevanten chemischen Reaktionen im Reservoir und in der Anlage berechnen können, um die Auswirkungen des Betriebes richtig widerzuspiegeln. Würden sie diese Anforderungen erfüllen, wären sie sehr hilfreiche Werkzeuge für eine Optimierung und Kostenreduzierung des Anlagenbetriebes. Von diesem Wunschziel ist man heute jedoch noch weit entfernt. Die ersten wichtigen Schritte in diese Richtung wurden mit GeoDat erfolgreich getan. Es ist jedoch wichtig, die Bemühungen nicht einzustellen, sondern konsequent weiter zu führen. Dafür gibt es in Deutschland kompetente Teams, die diese Aufgabe bei entsprechender Förderung in absehbarer Zeit lösen könnten. Die Einrichtung eines Arbeitskreises Geochemie für die Belange der Geothermie wäre dabei zielführend.

4.3.4 Mechanische Prozesse

Die im Kapitel 4.2.1.3 vorgestellten rheologischen Modelle zum Materialverhalten für die Modellierung mechanischer Prozesse sind in der Regel nicht in der Lage, lokale Phänomene, wie das Auftreten von Klüften und Störungen und deren zeitliche Fortpflanzung, zu beschreiben. Für die Belange der Geothermie sollten Rechencodes verwendet werden, die in der Lage sind Klufflächen und deren zeitabhängigen Veränderungen zu beschreiben. Diese Prozesse sind von herausragender Bedeutung, weil sie wahrscheinlich für den überwiegenden Teil der Permeabilitätsänderungen im Reservoir verantwortlich sind.

Thermo-mechanisch-hydraulische Prozesse, wie die Auswirkungen der Auskühlung des geothermischen Reservoirs durch Wärmeentzug während der Betriebsphase auf die Permeabilität der Gesteine können nicht modelliert werden. Ebenso wenig kann das Öffnen und Schließen von Klüften durch Druckänderungen beschrieben werden. Gleiches gilt für mikroseismische Ereignisse, die durch mechanische Prozesse ausgelöst werden.

4.3.5 Vergleich von Rechencodes für die Modellierung des Reaktiven Stofftransport

In Tab. 4.3 werden einige der verfügbaren Rechencodes für den reaktiven Stofftransport miteinander verglichen. Dabei wird festgestellt welche der in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Prozesse abgebildet werden können und wie vollständig deren Implementierung realisiert ist. Fehlende Features werden kommentiert. In der Tabelle sind Informationen von /WAN 11/, /BER 13/, /XU 12/, /BET 13/, /YEH 13/, /KOL 12/ zusammengetragen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass von den betrachteten Codes OpenGeoSys und Toughreact die meisten Anforderungen an die komplexen Modellierungsbedürfnisse geothermischer Reservoirs erfüllen. Toughreact hat den Vorteil, dass es die Änderungen von Klüften besser beschreiben kann, während OpenGeoSys viel flexibler in Bezug auf chemische Modellrechnungen ist. Ein weiterer Vorteil von OpenGeoSys ist die freie Verfügbarkeit als Open Source Code.

Tab. 4.3 Vergleich von vier Rechenprogrammen für Reaktiven Stofftransport

| Prozess | Geochemist's Workbench /WAN 11/, /BET 13/ | Hydrogeochem /WAN 11/, /YEH 04/ | OpenGeoSys /KOL 14/ | Toughreact /XU 12/, /BER 13/, /WAN 11/ |
|-----------------------------------|--|---|--|--|
| Allgemeine Spezifikationen | 1D oder 2D reaktiver Transport, 3D nicht verfügbar. | 3D reaktiver Stofftransport-Code | 3D reaktiver Stofftransport-Code | 3D reaktiver Stofftransport-Code |
| | Entwickelt von Aqueous solutions, LLC | Entwickelt von Oak Ridge National Laboratory | Entwickelt von UFZ Leipzig | Entwickelt von Lawrence Berkeley National Laboratory |
| | Lizenz gegen Bezahlung | Lizenz gegen Bezahlung | Frei verfügbar | Lizenz gegen Bezahlung |
| | Kein open source code | Kein open source code | Open source code | Kein open source code |
| Hydraulic processes | Darcy Strömung implementiert | Darcy Strömung implementiert | Darcy Strömung implementiert | Darcy Strömung implementiert |
| | Nur 1-Phasen-Fluss | Nur 1-Phasen-Fluss | Mehrphasenfluss möglich | Mehrphasenfluss möglich |
| | Klüfte werden als Dual Porositäts-Modell mit einer stagnierenden und einer frei fließenden Zone beschrieben. | Klüfte können nur kleinkalig über die Veränderung homogener Parameter mit einer Porosität nahe Null modelliert werden | Klüfte über eingebaute Strukturen modellierbar: 2D-Elemente mit einer Porosität nahe Null und zugewiesener Kluftweite sind in einer in einer 3D-Umgebung eingebettet | Klüfte über eingebaute Strukturen modellierbar |
| Wärme-transport | Ja | Ja | Ja | Ja |

| Prozess | Geochemist's Workbench /WAN 11/, /BET 13/ | Hydrogeochem /WAN 11/, /YEH 04/ | OpenGeoSys /KOL 14/ | Toughreact /XU 12/, /BER 13/, /WAN 11/ |
|---------------------------------|--|--|--|--|
| Reaktiver Stofftransport | Geochemische Modellierungen mit eingebautem chemischem Modul | Geochemische Modellierungen mit eingebautem chemischem Modul | Geochemische Berechnungen mit unabhängigen angekoppelten Chemiecodes (PHREEQC, GEMS-SELEKTOR, Chemapp) | Geochemische Modellierungen mit eingebautem chemischem Modul |
| | Thermodynamische Datenbasen werden problembezogen erzeugt | Alle chemischen Reaktionen müssen in Input-Files einzeln definiert werden. Keine eigene thermodynamische Datenbasis verfügbar. | Thermodynamische Datenbasen werden aus einer „Default Datenbasis“ erzeugt, um mit angekoppelten Rechenprogrammen z. B. GEMS geochemische Modellierungen durchzuführen | Thermodynamische Datenbasen werden problembezogen erzeugt |
| | Modelle für Sorption, Säure/Basen- und Oxidationen/Reduktionsreaktionen, Oberflächenkomplexierung, Mineralauflösung und -Ausfällung sowie Gasauflösung und Entmischung verfügbar | Modelle für Sorption, Säure/Basen- und Oxidationen/Reduktionsreaktionen, Oberflächenkomplexierung, Mineralauflösung und Ausfällung verfügbar | Modelle für Sorption, Säure/Basen- und Oxidationen/Reduktionsreaktionen, Oberflächenkomplexierung, Mineralauflösung und –Ausfällung sowie Gasauflösung und Entmischung verfügbar | Modelle für Sorption, Säure/Basen- und Oxidationen/Reduktionsreaktionen, Oberflächenkomplexierung, Mineralauflösung und –Ausfällung sowie Gasauflösung und Entmischung verfügbar |
| | Pitzermodell verfügbar | Pitzermodell nicht verfügbar | Pitzermodell verfügbar | Pitzermodell (in einer speziellen Version) verfügbar |
| | Klüfte nicht richtig modellierbar | Klüfte können nur als poröse Medien modelliert werden, mit Porositätsänderungen, die nicht zu Permeabilitätsänderungen führen und keinen Bezug | Klüfte können nur als poröse Medien modelliert werden. Permeabilitätsänderungen werden berechnet, aber kein Bezug zu Klüftöffnungsweiten hergestellt | Ausfällungen auf Klüften können modelliert werden und führen zu Änderungen von Klüftöffnungsweiten, was eine bessere Beschreibung von Permeabilitätsänderungen ermöglicht |

| Prozess | Geochemist's Workbench /WAN 11/, /BET 13/ | Hydrogeochem /WAN 11/, /YEH 04/ | OpenGeoSys /KOL 14/ | Toughreact /XU 12/, /BER 13/, /WAN 11/ |
|-----------------------------|---|--|--|---|
| | | zu Klüftöffnungsweiten herstellen | | |
| | Druckabhängigkeit nicht modellierbar | Druckabhängigkeit nicht modellierbar | Druckabhängigkeit modellierbar über GEMS und PhreeqC | Druckabhängigkeit nur für Gasspezies modellierbar |
| | Kinetik nicht modellierbar | Kinetik modellierbar | Kinetik modellierbar | Kinetik modellierbar |
| Mechanische Prozesse | Nicht modellierbar | Nicht modellierbar | Modellierbar | Nicht modellierbar |
| Kommentare | Geochemist's Workbench ist ein sehr guter und sehr schneller chemischer Gleichgewichtscode, aber hat in Bezug auf reaktiven Stofftransport begrenzte Möglichkeiten (nur einfache 2D Modellierungen möglich). Druckabhängigkeiten nicht darstellbar. Dagegen ist der Code Nutzerfreundlich und besitzt ein gutes graphisches Interface | Hydrogeochem besitzt die meisten Funktionen, die für die Modellierung des reaktiven Stofftransports in geothermischen Reservoiren benötigt werden, aber Klüfte können nicht richtig modelliert werden, Druckabhängigkeit ebenfalls nicht möglich | OGS ist eine gute Wahl für die Modellierung geothermaler Prozesse. Nicht zufriedenstellend ist allerdings die Modellierung von Klüften (Änderungen von Klüftöffnungsweiten nicht möglich), auch fehlt ein Bedienungshandbuch. Dafür ist es sehr vielseitig und bietet eine große Auswahl von Kopplungen mit Chemie-Codes | Toughreact ist die beste Wahl für die Modellierung von Klüften, da Verstopfungen von Klüften und Änderungen von Öffnungsweiten berücksichtigt werden und der Einfluss auf die Permeabilität betrachtet wird. Druckabhängigkeiten allerdings können nicht betrachtet werden. |
| | Kein Open Source Code kann nicht angepasst werden | Kein Open Source Code, kann nicht angepasst werden | OGS ist ein Open Source Code, er kann modifiziert und erweitert werden und den Geothermie-Anforderungen angepasst werden | Source Code ist mit einer speziellen Lizenz erhältlich. Änderungen und Anpassungen an alle Geothermieanforderungen möglich |

4.4 Geothermie-Regionen Deutschlands – ein Vergleich

In Deutschland gibt es drei für die Gewinnung und Nutzung geothermischer Energie geeignete Regionen (Abb. 4.3):

- Norddeutsches Becken
- Oberrheingraben
- Süddeutsches Molassebecken

Die Reservoirs dieser drei Regionen weisen unterschiedliche Charakteristika auf, die in den folgenden Abschnitten kurz beschreiben werden.



Abb. 4.3 Geothermische Regionen in Deutschland (nach /GEO 14/)

4.4.1 Das Norddeutsche Becken

Das Norddeutsche Becken erstreckt sich von Südniedersachsen bis unter die Nord- und Ostsee. Es bildet den südlichen Teil eines großen Senkungsraumes, der im Westen in die Nordseesenke übergeht. Im Osten geht es in das Polnische Becken über. Es bildete sich durch einen über Jahrmillionen anhaltenden Absenkungsprozess, durch den sich immer wieder ausgedehnte Meeresbecken bilden konnten /GTV 14/.

4.4.1.1 Geologische Struktur

Die Ausbildung der Norddeutschen Beckens begann mit dem Kollaps der variskischen Gebirgskette (deren Reste die Basis des Beckens bilden) durch Riftprozesse am Ende des Karbons und Anfang des Perms. Die Entwicklung des Karbonbeckens wird der Flexur der Kruste als Folge der variszischen Orogenese zugeschrieben, vergleichbar der Genese des süddeutschen Molassebeckens, das der alpidischen Gebirgsbildung zugeordnet wird. Die Ursache des Permbeckens wird von den meisten Autoren in Riftprozessen (transtensives Pull-apart-Becken, /BAC 89/, /ZIE 88/ des Rotliegenden gesehen und mit einer Dehnung der Kruste verknüpft, die von magmatischen und vulkanischen Aktivitäten begleitet wurde.

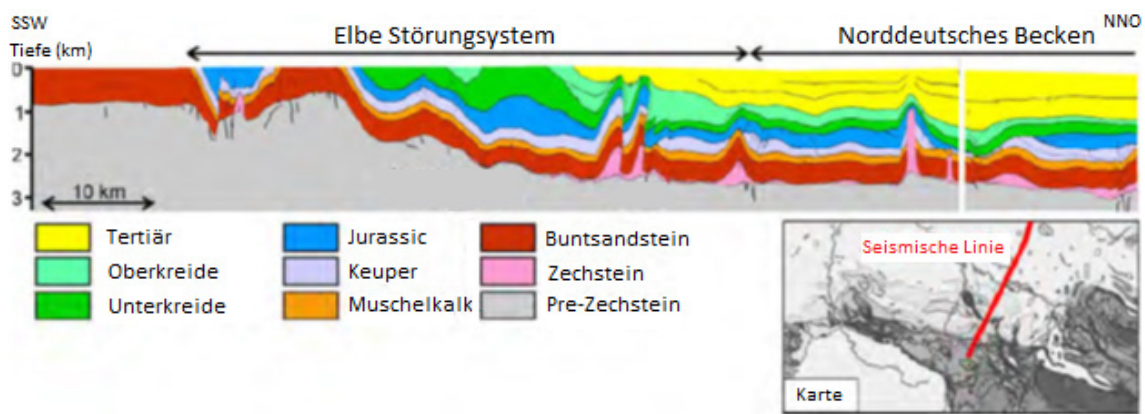


Abb. 4.4 Geologische Struktur des Norddeutschen Beckens /SIP 06/

Nach den Riftprozessen erfolgte im Becken eine lange thermische Subsidenzphase, die von den Anfängen des Perms bis in die Mitte der Trias reichte. In dieser Phase wurden im Rotliegend klastische Sedimente abgelagert. Infolge einer Paläo-Oberflächenabsenkung und einer Anhebung des Meeresspiegels wurde das Becken überschwemmt und es bildeten sich die Zechsteinsedimente mit Kalken, Dolomiten und Salzformationen aus. Nach der Eindunstung des Zechsteinmeeres bildeten sich im Buntsandstein kontinentale Sandsteine und nach einem erneuten Anstieg des Meeres-

spiegels die Kalke des Muschelkalks. Nach dieser Subsidenzphase folgte von Mitte der Trias bis ins Jura eine Phase der Dehnung. Während der Dehnungsphase hob sich die Paläo-Oberfläche, wodurch sich die fluvio-lakustrinen Keuper-Sedimente bildeten.

Die darüber liegenden Sedimente sind aus Sicht der geothermalen Energiegewinnung von weit geringerer Bedeutung, weil die dort herrschenden Temperaturen für die ökonomische Stromerzeugung zu niedrig sind.

Es muss jedoch angemerkt werden, dass die späteren halokinetischen Bewegungen der Zechsteinformationen für Fazieswechsel im Becken verantwortlich sind, die dazu führten, dass die verschiedenen Gesteinsformationen nicht immer in der gleichen Tiefe anzutreffen sind (s. Abb. 4.4).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass geothermale Reservoirs im Norddeutschen Becken hauptsächlich aus Sandsteinen, Tonsteinen und Karbonaten bestehen /HUR 02/. Die für die geothermale Energiegewinnung am häufigsten genutzten geologischen Formationen sind die Keuper-Sedimente, die Sandsteine des Rotliegend und des Buntsandsteins (poröse/geklüftete Gesteine) und die darunterliegenden Vulkanite (geklüftete Gesteine).

Tab. 4.4 Beispiele für Geothermieanlagen im Norddeutschen Becken mit ihren Reservoircharakteristika

| Geothermie-Anlage (Fließrate) | Ziel-Gestein | Permeabilität | Porosität | Tiefe |
|---|---|---|---|--------------|
| Neustadt-Glewe (11 - 35 L/s) /MEN 00/. | Contorta-Sandsteine (Oberer Keuper) (geklüftet/porös) | 5E-13 - 8E-13 m ² | 0,22 | 2.320 m |
| Gross-Schönebeck /BLÖ 08/. | Buntsandstein Sandsteine (geklüftet/porös) Vulkanite (geklüftet) | 1E-14 - 5E-14 m ² (Sandsteine) 1E-16 m ² (Vulkanite) | 0,03 - 0,15 (Sandsteine) 0,005 (Vulkanite) | 4.309 m |
| Groß Buchholz (Hannover) /WOR 13/, /ORZ 05/ | Buntsandstein Sandsteine (geklüftet/porös) | 10E-18 m ² mit ≈1km ² hochleitfähiges Kluftnetzwerk | 0,03 - 0,15 | 3.901 m |

Die Geothermieanlage Neustadt-Glewe unterscheidet sich von andern Anlagen dadurch, dass dort das Thermalwasser aus deutlich geringeren Tiefen, mit einer entsprechend relativ niedrigen Temperatur von 98°C gefördert wird. Wegen der geringen Effizienz ist es unwahrscheinlich, dass andere Geothermieanlagen für die Stromerzeugung

gung bei solchen Tiefen und Temperaturen gebaut werden. Die Erfahrungen aus Groß-Schönebeck und Groß Buchholz sind daher für künftige Anlagen deutlich relevanter.

4.4.1.2 Thermische Charakteristika

Das Norddeutsche Becken umfasst mit 1E5 km² die größte Fläche innerhalb der drei Geothermie-Regionen Deutschlands. Im Vergleich zum Oberrheintal-Graben und der Süddeutschen Molasse hat das Norddeutsche Becken jedoch mit 50 EJ das geringste geothermische Potenzial /QUI 12/.

Der Wärmefluss ist mit einem mittleren Wert von 70mW/m² nicht sehr hoch, kann jedoch lokal bis zu 110 mW/m² erreichen. Die Karte in Abb. 4.5 zeigt bis zum Jahr 2002 gemessene Werte des Wärmeflusses im Norddeutschen Becken /HUR 02/. Mit ca. 3°C/100 m ist es auch die Region mit dem niedrigsten thermischen Gradienten. Das heißt, dass die Förderbohrungen tiefer reichen müssen, um ausreichende Temperaturen zu erreichen.

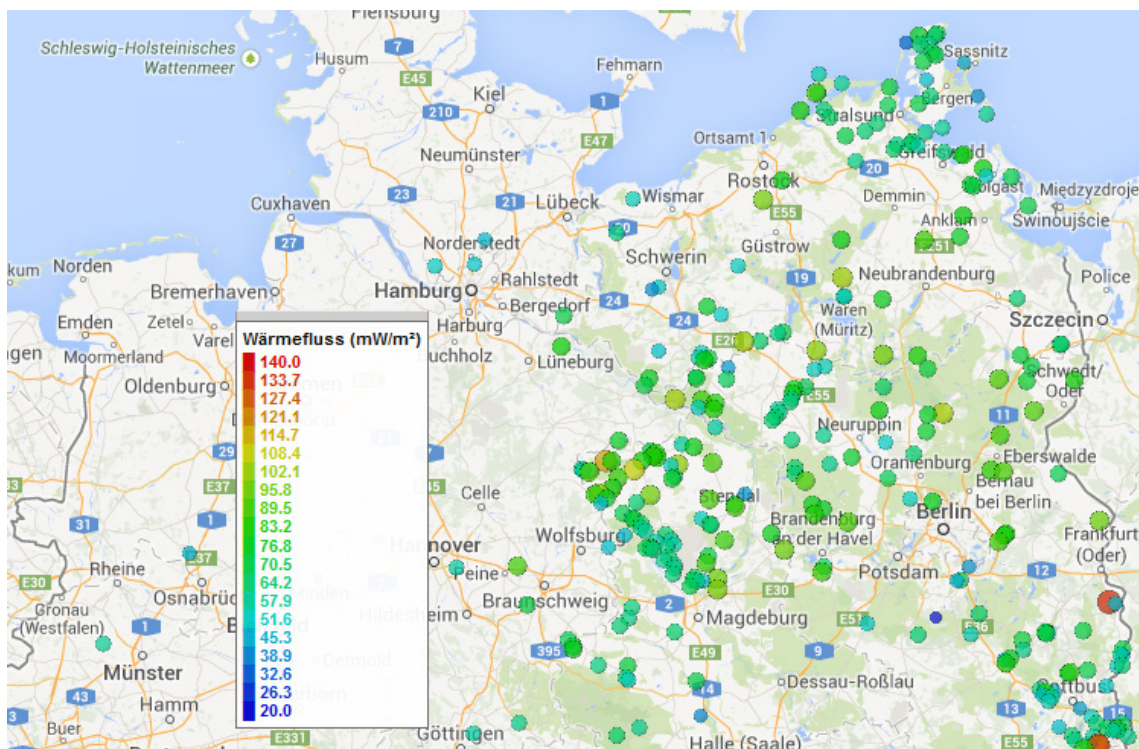


Abb. 4.5 Wärmefluss im Norddeutschen Becken /HUR 02/

In Abb. 4.6 sind Temperaturprofile an den Standorten Groß-Buchholz, Groß-Schönebeck und Neustadt-Glewe dargestellt. Daraus ist zu erkennen, dass die Tempe-

Temperaturgradienten über den ganzen Temperaturbereich ziemlich einheitlich sind. Knickpunkte der Kurven sind jedoch an den Grenzen einzelner Gesteinseinheiten zu erkennen, z. B. bei 2000 m (Hangendgrenze des Keupers) und bei 3.500 m (Hangendgrenze des Bundsandsteins). Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Permeabilitäten der Gesteine dort nicht hoch genug sind, um eine schnelle konvektive Bewegung des Wassers und somit einen Temperaturengleich zu ermöglichen. An den Knickpunkten tritt eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit (und somit des Gesteinstyps) auf. Dies bedeutet nicht, dass dort kein Wasseraustausch stattfindet, sondern nur, dass dieser zu gering ist, um den thermischen Gradienten signifikant zu beeinflussen.

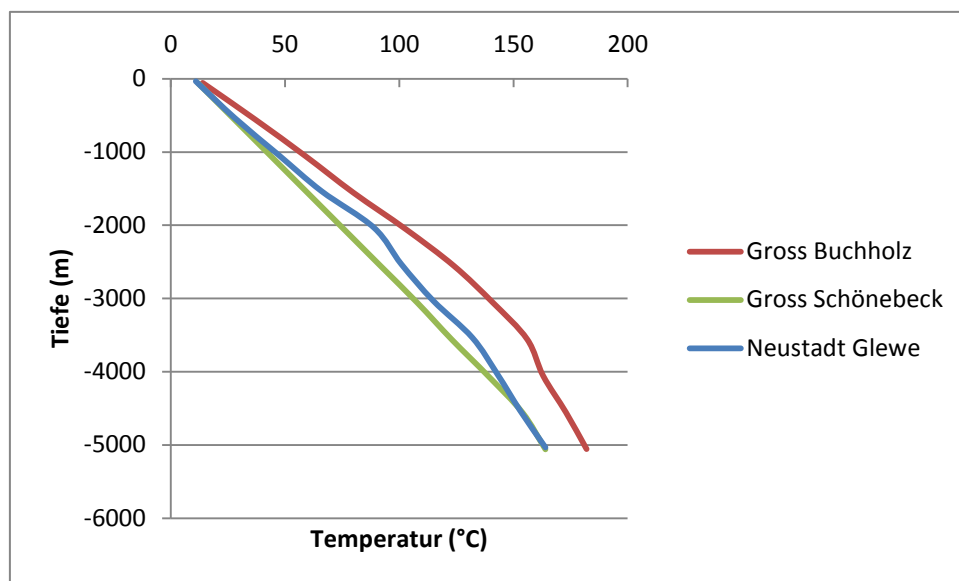


Abb. 4.6 Temperaturgradienten an drei Geothermie-Standorten im Norddeutschen Becken /GEO 14/

Die thermischen Eigenschaften verschiedener Gesteine aus dem Norddeutschen Becken sind in Tab. 4.5 dargestellt.

Tab. 4.5 Thermische Parameter unterschiedlicher Gesteinsarten an den Standorten von norddeutschen Geothermieanlagen

| Gesteinsart | Wärmeleitfähigkeit /FUC 12/ | Wärmekapazität (25°C) /ENG 14/ |
|--------------------|--|---|
| Sandsteine | 2,7 - 3,7 W/m K | 920 J/kg K |
| Siltstein | 1,6 - 3,2 W/m K | |
| Kalkstein | 2,2 - 2,6 W/m K | 908 J/kg K |
| Dolomit | 1,7 - 3,1 W/m K | 920 J/kg K |

Die Temperaturen des förderten Thermalwasser an den drei Standorten liegen bei:

- 169°C in Groß Buchholz
- 150°C in Groß-Schönebeck
- und 98°C in Neustadt-Glewe

4.4.1.3 Chemische Eigenschaften

Zu den wichtigsten chemischen Eigenschaften zählen Lösungszusammensetzung, gelöste Gase und Scale-Zusammensetzungen, die nachstehend beschrieben werden.

4.4.1.4 Thermalwässer und Lösungszusammensetzungen

Eine Typisierung der Thermalwässer kann in Formations-, hydrothermales, evaporitisches, magmatisches oder metamorphes Wasser erfolgen. Zudem ist eine genetische Klassifikation in juvenile, vadose, meteorische, Infiltrations- und basinale Wässer möglich.

Meteorische bzw. Infiltrationswässer wurden generell als Oberflächenwässer (Niederschlag, Meerwasser) gebildet und deszendieren in die Erdkruste. Basinale (konnate) Wässer sind dagegen unterirdische Wässer, welche mit dem Sediment versenkt wurden.

Während es sich bei den Wässern im Malm des Molassebeckens um Infiltrationswässer handelt und im Oberrheingraben sowohl basinale Tiefengrundwässer als auch In-

filtrationswässer vorkommen, sind die Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken überwiegend hochsalinare basinale Wässer /WOL 11/.

Im Norddeutschen Becken treten hochsalinare Wässer des Typs Na-Ca-Cl auf. Sie haben ein hohes Korrosionspotenzial und führen bei der Temperatur- und Druckerniedrigung während der Förderung zu starken Ausfällungen (Scale-Bildungen). Bei der Bildung dieser Wässer werden drei Phasen unterschieden/ TES 07/:

1. Bildung von primären Salzlösungen durch die fortschreitende Verdunstung des Meereswassers
2. Mischung von Oberflächenwässern mit den primären Lösungen
3. Auflösung von Steinsalz

Eine mittlere Zusammensetzung dieser Wässer in Teufen von 2.000 m und 3.000 m ist in Tab. 4.6 aufgeführt.

Tab. 4.6 Allgemeine Zusammensetzung von Wässern aus dem Norddeutschen Becken /WOL 08/

| Parameter | 2000 m | 3000 m |
|-------------------------------|---------|---------|
| pH | 5.6 | 6 |
| Eh (mV) | -100 | -130 |
| Salzgehalt (g/l) | 200 | 300 |
| Kationen (mg/l) | | |
| K | 750 | 1.000 |
| Na | 65.800 | 100.000 |
| Ca | 7.850 | 12.500 |
| Mg | 1.700 | 1.000 |
| Fe | 90 | 130 |
| As | 0,001 | 0,01 |
| Pb | 0,4 | 0,5 |
| Sr | 450 | 670 |
| Anionen (mg/l) | | |
| Cl | 125.000 | 185.000 |
| Br | 300 | 480 |
| I | 5 | 8 |
| F | 0,5 | 0,8 |
| SO ₄ ²⁻ | 450 | 650 |
| HCO ₃ ⁻ | 225 | 325 |
| Andere (mg/l) | | |
| SiO ₂ | 20 | 30 |
| CO ₂ | 300 | 150 |

Die ortsspezifischen Zusammensetzungen variieren naturgemäß von Anlage zu Anlage, wie die Beispiele in Tab. 4.7 zeigen.

Tab. 4.7 Beispiele von Lösungszusammensetzungen aus Neustadt-Glewe /SCH 07/ und Groß-Schönebeck /REG 13/ (n. a. = nicht angegeben)

| Parameter | Neustadt-Glewe (2.320 m) | Groß-Schönebeck (4.309 m) |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| TDS (g/l) | 215 | 268 |
| pH | 5,5 | 5,7 |
| Ba (mg/l) | 5,47 | 34 |
| BO ₂ (mg/l) | 187 | n. a. |
| Br (mg/l) | 400 | 1.400 |
| Ca (mg/l) | 8.330 | 53.990 |
| Cl (mg/l) | 128.600 | 167.300 |
| Fe (mg/l) | 71,4 | 100 |
| HCO ₃ (mg/l) | 153 | n. a. |
| K (mg/l) | 782 | 2.900 |
| Li (mg/l) | n. a. | 200 |
| Mg (mg/l) | 1.410 | 230 |
| Mn (mg/l) | 12,8 | 270 |
| Na (mg/l) | 74.000 | 38.420 |
| NH ₄ (mg/l) | n. a. | 74 |
| Pb (mg/l) | 0,526 | 200 |
| SiO ₂ (mg/l) | n. a. | 72 |
| SO ₄ (mg/l) | 647 | 140 |
| Sr (mg/l) | 421 | 2.500 |
| Zn (mg/l) | 3,29 | 72 |

Für Groß-Buchholz stehen bisher keine zuverlässigen Werte zur Verfügung /HES 13/, weil die einzige vorliegende Messung nach einer Stimulation, sechs Monate nach dem Verschluss der Bohrung erfolgte. Die tatsächliche Zusammensetzung des Tiefenwassers ist daraus nicht abzuleiten. Klar ist nur, dass die Probe Halit-gesättigt war und einen Gesamtsalzgehalt von 340 g/l aufwies, woraus auf einen Salzgehalt von bis zu 370 g/l im Reservoir geschlossen werden könnte. Der hohe Salzgehalt führte zu massiver Halitausfüllung und zur Verstopfung des Bohrlochs. Unbekannt ist, ob der hohe Halitgehalt der analysierten Wasserprobe aus dem Reservoir stammt oder beim Hydraulischen Fracken durch Halitauflösung im Gestein verursacht wurde. Sollte tatsäch-

lich der Salzgehalt des Wassers im Reservoir so hoch sein, könnte dies dazu führen, dass die Anlage nicht betrieben werden kann.

4.4.1.4.1 Gelöste Gase

Die Tiefenwässer des Norddeutschen Beckens führen hohe Gehalte an gelösten Gasen. Darum müssen die Drücke beim Betrieb der Geothermieanlagen ebenfalls hochgehalten werden, oft um 20 bar. Die Entgasung muss so weit wie möglich begrenzt werden, weil die entmischten Gase in die Atmosphäre freigesetzt werden müssten und weil Entgasung die Scalebildung befördert.

Eine mittlere Zusammensetzung der Gase in Wässern des Norddeutschen Beckens zeigt Tab. 4.8.

Tab. 4.8 Allgemeine Zusammensetzung der Gase in Wässern des Norddeutschen Beckens in unterschiedlichen Tiefen /WOL 08/

| Parameter | 2.000 m | 4.200 m |
|----------------------------|---------|---------|
| Verhältnis Gas/Flüssigkeit | 0,4 | 0,2 |
| CO ₂ (Vol. %) | 83 | 4 |
| CH ₄ (Vol. %) | 8 | 16 |
| N ₂ (Vol. %) | 9 | 80 |

Im Vergleich dazu sind in Tab. 4.9 Gaszusammensetzungen aus den Tiefenwässern von Neustadt-Glewe und Groß-Schönebeck aufgeführt.

Tab. 4.9 Gaszusammensetzungen aus den Tiefenwässern von Neustadt-Glewe /SCH 07/ und Groß-Schönebeck /REG 13/

| Parameter | Neustadt-Glewe 2.320 m | Groß-Schönebeck 4.309 m |
|--|---------------------------|----------------------------|
| Verhältnis Gas/Flüssigkeit | 0,1 | 1,0 |
| CO ₂ (Vol. %) | 73 | 1 |
| CH ₄ (Vol. %) | 15 | n. a. |
| He (Vol. %) | n. a. | 2 |
| H ₂ (Vol. %) | Spuren | 2 |
| N ₂ (Vol. %) | 10 | 82 |
| C ₂ H ₄ (Vol. %) | 0,7 | n. a. |

4.4.1.4.2 Zusammensetzungen der Scale

Mineralausfällungen oder Scale bilden sich in verschiedenen Bereichen von geothermischen Anlagen.

- Im Reservoir, in der Nähe des Förderbohrlochs, infolge der Druckentlastung durch das Pumpen
- In der Produktionsbohrung, durch den Abfall des hydrostatischen Drucks und der Temperatur bei der Förderung des Thermalwassers und infolge der Korrosion der Bohrlochverrohrung
- An der Oberfläche in der Anlage infolge von Temperaturenniedrigung und Korrosion
- Im Injektionsbohrloch durch die Einleitung übersättigter Lösungen, die in der Anlage wegen der kurzen Aufenthaltsdauer das geochemische Gleichgewicht nicht erreichen konnten, und durch Stahlkorrosion
- Im Reservoir, wo abgekühlte reinjizierte Wässer sich mit den heißen Wässern des Aquifers mischen

Von den vielen Orten, an denen Scalebildung stattfindet, sind nur die Scale in der Oberflächenanlage leicht zugänglich und können analysiert werden. Mit größerem Aufwand ist die Beprobung von Scale in den Bohrungen verbunden. Auf die Zusammensetzung von Scale, die im Reservoir gebildet werden, kann daher nur aus geochemischen Modellrechnungen geschlossen werden.

Im norddeutschen Becken sind die häufigsten Scale feste Lösungen von Barium- und Strontiumsulfaten, in denen Radium diadoch in das Kristallgitter eingebaut werden kann.

Blei ist ein wichtiges Element, obwohl es in den Lösungen nur in geringen Konzentrationen auftritt. In den Zerfallsreihen des Urans und des Thoriums treten auch einige radioaktive Isotope des Bleis auf. Blei wird als Bleiglanz (PbS), Laurionit PbCl(OH) oder als elementares Blei ausgeschieden. Elementares Blei taucht dort auf, wo Metallkorrosion stattfindet, d. h. an den Bohrlochverrohrungen, wo Eisen oxidiert wird. auch Anglesit (PbSO_4) gefunden.

Eisen tritt in den Scale ebenfalls auf, in Form von Sulfiden, Hydroxiden oder als Magnetit. Letztendlich wird zuweilen auch Kupfer in den Scale, vor allem in den Bohrlöchern, angetroffen, sowohl in elementarer Form als auch als Sulfid. Tab. 4.10 zeigt Scale, die in norddeutschen Geothermie-Anlagen angetroffen werden.

Tab. 4.10 Scale aus Anlagen im Norddeutschen Becken (Daten für Groß-Schönebeck aus /REG 13/ und /FEL 13/, für Neustadt-Glewe aus /WOL 11/ und für Groß-Buchholz aus /WOR 13/)

| | Neustadt-Glewe | Groß-Schönebeck | Groß Buchholz |
|-----------------------------------|---|------------------------|----------------------|
| Hauptbestandteile in Scales >10%) | Sulfate des Ba und Sr (Barit, Cölestin), Eisen- Hydroxyde, Eisensulfide | Kupfer, Barit | Halit |
| Nebenbestandteile (>1 - <10%) | Calcite/Aragonite, Bleisulfid (Bleiglanz) | Laurionit, Calcit | Nicht bekannt |
| Scale in Spuren (<1%) | Kupfersulfide, Kupfersulfat, Anglesit | Magnetit | Nicht bekannt |

Bisher existieren im Norddeutschen Becken nur wenige Anlagen, die sich zudem noch nicht im Dauerbetrieb befinden. Daher ist es nicht einfach, auf alle Scale zu schließen, die in Zukunft, während des Betriebs, noch auftreten könnten.

4.4.2 Der Oberrheingraben

4.4.2.1.1 Geologogische Struktur

Der kurze Abriss der geologischen Geschichte des Oberrheingrabens in diesem Kapitel lehnt sich an die Beschreibung in /CRDP 14/ an.

Bis zum Ende des Jura war die geologische Geschichte in der Region des heutigen Oberrheingrabens ähnlich wie im Norddeutschen Becken. Nach der Ablagerung der Keupersedimente in der Trias gab es im Jura mehrere marine Transgressionen, die zur Bildung von Kalksteinen und Mergeln führten. Gegen Ende des Jura bildete sich eine Paläo-Oberfläche aus, die sich bis Ende der Kreide erhielt und zu Erosion und zur Bildung von rund 1.000 m mächtigen Sedimenten führte.

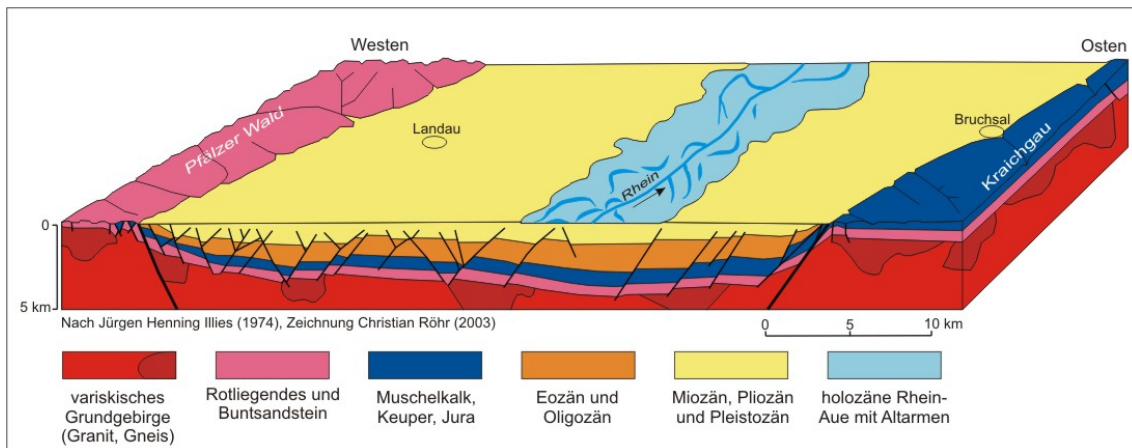


Abb. 4.7 Oberrheingraben – Geologisches Profil /ILL 14/

Riftprozesse zu Beginn des Känozoikums führten in zwei Episoden zur Bildung des Oberrheingrabens. Im mittleren Eozän begann die Bildung des Grabens mit einer Subsidenz, die ein Netzwerk von Frakturen schaffte und zu einem relativ starken Relief führte. Dieses Relief ist für die Bildung eines fluvialen Systems verantwortlich, welches die Mesozoische Bedeckung erodierte. Die Erosion setzte sich während des Oligozäns fort und führte zur Bildung von hauptsächlich kalkigen Konglomeraten im Graben.

Während des Oligozäns fand ein weiterer Riftprozess statt, welcher das Rift nach Norden hin und zum Mittelmeer öffnete und zu einer neuen Sedimentationsphase führte.

Zwischen Ende des Oligozäns und dem Beginn des Miozäns zog sich das Meer zurück und es begann eine vulkanische Episode, welche bspw. zur Bildung des Kaiserstuhls führte. Spätere geologische Ereignisse sind für die geothermale Energiegewinnung ohne Bedeutung.

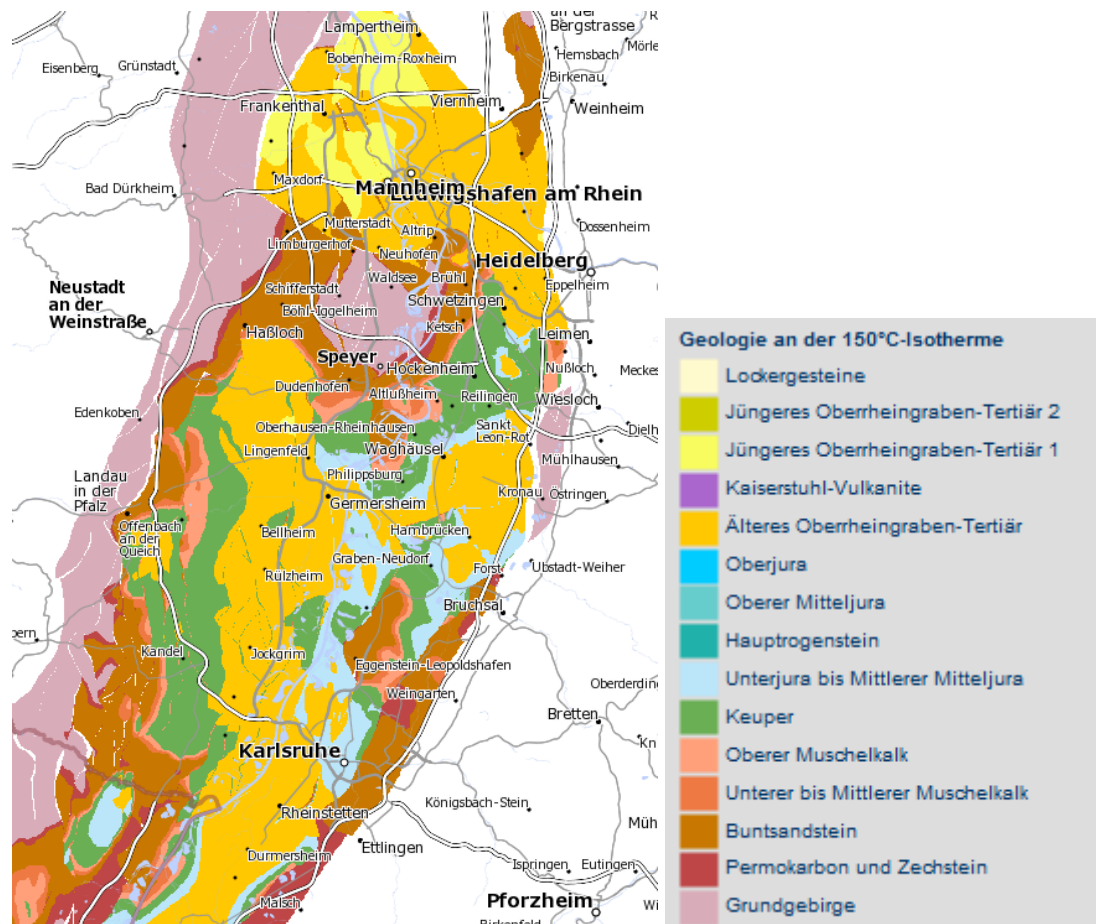


Abb. 4.8 Geologischer Schnitt der 150°C-Isotherme im Oberrheingraben
/MAT 13/

Aus Abb. 4.8 wird ersichtlich, dass die 150°C-Isotherme mehrere unterschiedliche geologische Formationen umfasst:

- Die kristalline Basis, die hauptsächlich aus Graniten und Gneisen besteht und eine sehr geringe Permeabilität aufweist, aber wegen der starken Zerklüftung trotzdem eine Wasserzirkulation zulässt.
- Die Sandsteine des Buntsandsteins weisen eine etwas höhere Porosität und Permeabilität auf als die kristallinen Gesteine. Infolge der Kombination von Porosität und Klüften ist auch in diesen Gesteinen eine Wasserzirkulation möglich
- Die Kalksteine und Mergel des Muschelkalk und Keuper sind ebenfalls geklüftete Aquifere mit geringer Porosität
- Der tertiäre ältere Oberrheingraben (Grabenfüllung) besteht aus konglomeratischen Gesteinen mit geringer Permeabilität ($5E-18 \text{ m}^2$ /BÄC 03/)

In Tab. 4.11 sind die Eigenschaften der Reservoirgesteine am Standort einiger Geothermianlagen im Oberrheingraben aufgelistet. Die Permeabilitätswerte für den Standort Bruchsal wurden aus hydraulischen Leitfähigkeiten abgeleitet, die von /HER 10/ und /EGG 10/ veröffentlicht sind. Dafür wurde eine Reservoirmächtigkeit von 500 m zugrunde gelegt. Die Werte für Landau stammen aus /BÄC 03/ und die für Soultz aus /SAU 06/ und /VOG 12/.

Tab. 4.11 Hydraulische Eigenschaften von Reservoirgesteinen an den Standorten einiger Geothermianlagen im Oberrheingraben

| Geothermische Anlage (Fließrate) | Gestein | Permeabilität | Porosität | Tiefe |
|----------------------------------|---|---|-------------|---------|
| Bruchsal (24 L/s) | Buntsandstein <i>geklüftet/porös</i> | GB1: 1,6E-14 m ² GB2: 1,2E-12 m ² 8,0E-13 m ² | 0,05 - 0,07 | 2.542 m |
| Landau (40 L/s) | Muschelkalk, Buntsandstein <i>geklüftet/porös</i> | 10E-16 m ² | 0,01 | 3.291 m |
| Soultz (35 L/s) | Kristallines Basement <i>geklüftet</i> | 5E-16 m ² (Durchschnitt) 1E-18 m ² (ungeklüfteter Granit) 1E-14 bis -12 m ² (Klüfte) | 0,05 | 5.000 m |

Die in der Tabelle aufgeführten Geothermianlagen sind die einzigen Anlagen, die im Oberrheingraben im Betrieb sind.

4.4.2.2 Thermische Charakteristika

Hinsichtlich ihres geothermischen Potenziales ist die Region des Oberrheingrabens aus zwei Gründen von Interesse:

1. Das Rheintal ist Teil eines geotektonischen Grabensystems mit einer verhältnismäßig gering-mächtigen kontinentalen Kruste von 20 - 25 km /GUT 95/ und einem daraus resultierenden erhöhten Wärmefluss von 100 mW/m² /RYB 07/, der örtlich auf 140 mW/m² /HUR 02/ ansteigen kann.
2. Tektonische Bruchstrukturen fördern die hydrothermale Konvektion in den Reservoiren /RYB 07/ und führen, wie am Standort Soultz, zu Temperaturana-

lien mit einem sehr hohen Temperaturgradienten auf den ersten Kilometern. Danach flacht der Temperaturgradient (vgl. Abb. 4.9) ab.

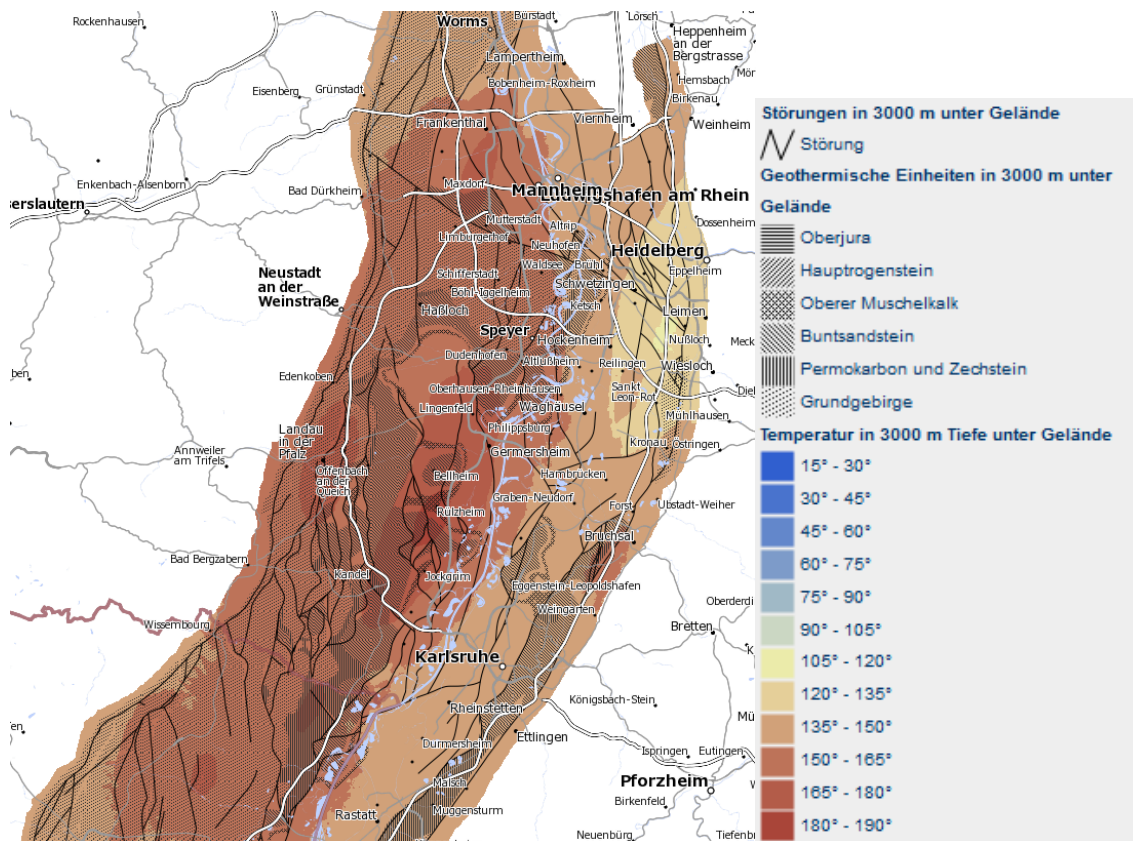


Abb. 4.9 Temperaturen in 3 000 m Tiefe unter der Geländeoberfläche im Bereich des Oberrheingrabens /WAT 13/

Obwohl mit 5.000 km² flächenmäßig „klein“, verfügt die Region des Oberrheingrabens mit 60 EJ² über ein sehr hohes förderbares geothermales Potenzial. Verglichen mit anderen Regionen weist der Oberrheingraben damit die höchste Energiedichte /QUI 12/ auf.

Der durchschnittliche Temperaturgradient im Oberrheingraben liegt bei 4°C / 100 m. Zum Vergleich: Der mittlere Temperaturgradient in Europa liegt bei 2,5°C / 100m. Weitere Beispiele für Temperaturgradienten im Oberrheingraben sind für die Standorte der Geothermiekraftwerke Landau, Bruchsal und Soultz in Abb. 4.11 geplottet.

² EJ; Exa Joule (1 Exajoule = 10¹⁸ J; 14 EJ = Primärenergieverbrauch Deutschlands 2008)

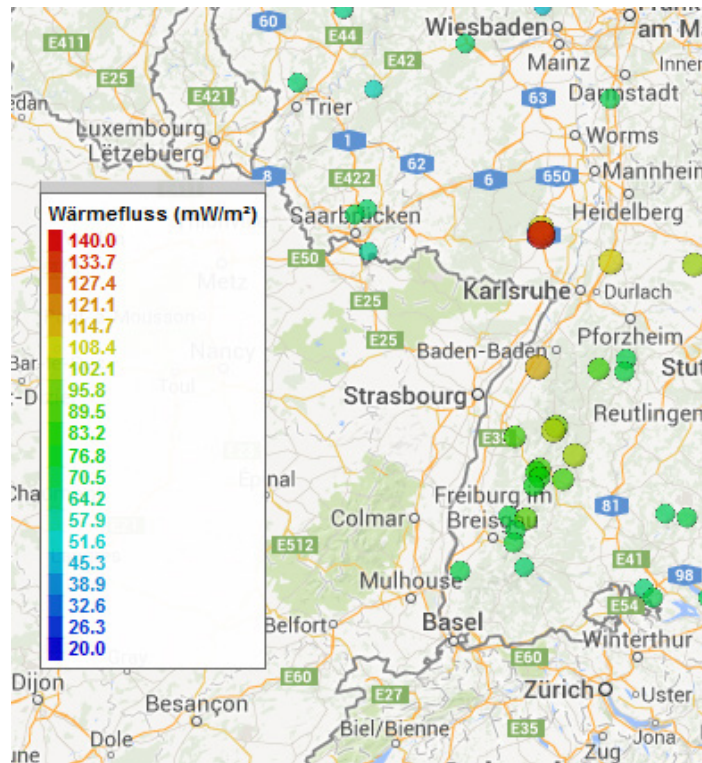


Abb. 4.10 Wärmefluss im Oberrheingraben in mW/m^2 – Daten aus: /HUR 02/, Bild erstellt mit gpsvisualizer.com, Karte erstellt mit google.maps

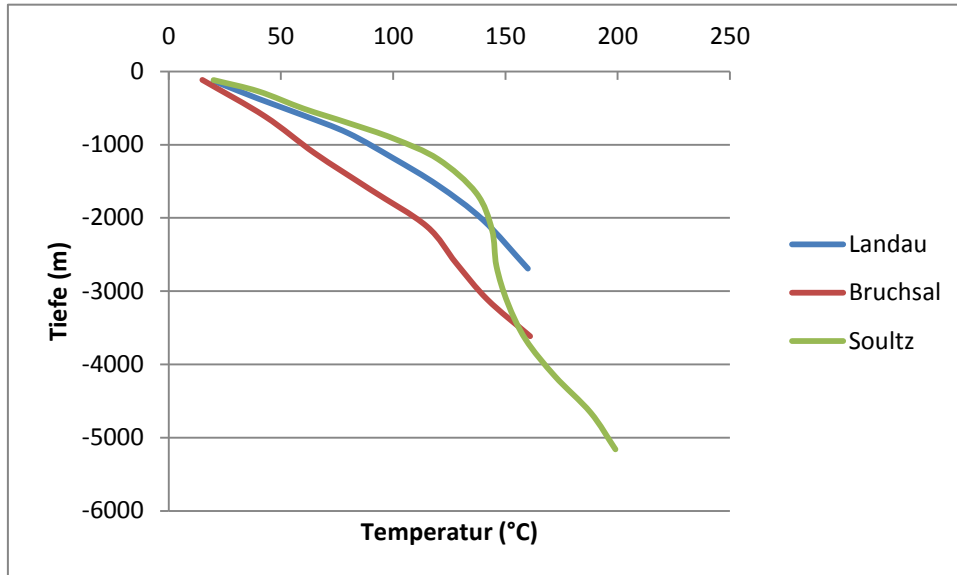


Abb. 4.11 Temperaturgradienten an drei verschiedenen Standorten im Oberrheingraben /GEO 14/

Tab. 4.12 Geothermische Parameter für verschiedene Gesteinstypen im Oberrheingraben (Daten aus /BÄC 03/ und aus der Webseite der /ENG 14/)

| Formation / Gesteinsart | Wärmeleitfähigkeit | Wärmekapazität bei 25°C |
|---------------------------|---------------------|-------------------------|
| | λ , [W/m K] | c , [J/kg K] |
| Grabenfüllung | 3 | 1.000 |
| Muschelkalk (Kalkstein) | 4 | 908 |
| Buntsandstein (Sandstein) | 4 | 920 |
| Basement(Kristallin) | 2 | 790 |

Nachfolgend sind die Wassertemperaturen an drei Geothermiestandorten zusammengestellt:

- Bruchsal 131°C
- Landau 160°C
- Soultz 169°C

4.4.2.3 Chemische Charakteristika

Zu den wichtigsten chemischen Eigenschaften zählen Lösungszusammensetzung, gelöste Gase und Scale-Zusammensetzungen, die nachstehend beschrieben werden.

4.4.2.3.1 Zusammensetzung der wässrigen Lösungen

Wie bei den salinaren Formationswässern im Norddeutschen Becken, handelt es sich bei den im Oberrheingraben auftretenden geothermalen Wässern um hoch salinare Na-Ca-Cl-Wässer mit hohen Gasanteilen, deren Inhaltsstoffe äußerst sensitiv auf Druck- und/oder Temperaturänderungen reagieren und zur Ablagerung von sogenannten „Scale“ in den Leitungssystemen und Korrosion von Komponenten der Geothermiekraftwerke führen können.

Nach /PAU 93/ gleichen sich die Wässer der verschiedenen Formationen hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung und Isotopenverteilung, was auf eine intensive Wasserzirkulation und Austausch zwischen den Formationen schließen lässt. Dies gilt auch für die Wässer, die aus so unterschiedlichen Formationen wie dem Kristallin des Basements oder dem Buntsandstein stammen.

Wie bei den Formationswässern des Norddeutschen Beckens führt /PAU 93/ die Zusammensetzung der Wässer im Oberrheingraben zurück auf:

- Bildung primärer salinärer Wässer infolge Verdunstung von Meereswasser
- Vermischung von primären Wässern und meteorischem Wasser
- Auflösung von Steinsalz

Eine Auflistung der mittleren Zusammensetzung von Wässern im Oberrheingraben aus zwei unterschiedlichen Teufenlagen /WOL 08/ ist in Tab. 4.13 aufgeführt.

Lokal kann jedoch die chemische Zusammensetzung der Formationswässer von den Mittelwerten abweichen. Tab.4.14 zeigt die Zusammensetzung der Wässer an den Standorten der Geothermiekraftwerke Soultz-sous-Forêts, Bruchsal und Landau.

Tab. 4.13 Allgemeine Zusammensetzung von Wässern im Oberrheingraben aus einer Teufe von 2000 m und 3000 m (nach /WOL 08/)

| Parameter | 2.000 m | 3.000 m |
|-------------------------------|---------|---------|
| pH | 5,8 | 5,5 |
| Redox Eh (mV) | 90 | 105 |
| Salinität (g/l) | 90 | 125 |
| Kationen (mg/l) | | |
| K | 3.000 | 5.000 |
| Na | 20.000 | 35.000 |
| Ca | 4.000 | 7.000 |
| Mg | 100 | 100 |
| Fe | 100 | 200 |
| As | 5 | 10 |
| Pb | 1 | 2 |
| Sr | 220 | 350 |
| Li | | |
| Mn | | |
| Ba | | |
| Anionen (mg/l) | | |
| Cl | 45.000 | 70.000 |
| Br | 100 | 200 |
| I | 1 | 2 |
| F | 5 | 12 |
| SO ₄ ²⁻ | 350 | 300 |
| HCO ₃ ⁻ | 250 | 450 |
| Sonstige (mg/l) | | |
| SiO ₂ | 75 | 150 |
| CO ₂ | 800 | 1.500 |

Tab.4.14 Chemische Zusammensetzung der Wässer an den Standorten von Geothermiekraftwerken im Oberrheingraben (n. a. = nicht angegeben)

| Parameter | Soultz-sous-Forêts /MUN 13/ | Bruchsal (/HER 10/ /EGG 10/) | Landau in der Pfalz /BAU 09/ |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| TDS (g/l) | 98 | 130 | 110 |
| pH | 4,9 | 5 | 5,15 |
| Na (mg/l) | 27.500 | 37.182 | 28.400 |
| K (mg/l) | 3.000 | 3.250 | 4.210 |
| Ca (mg/l) | 6.700 | 7.629 | 9.230 |
| Mg (mg/l) | 120 | 374 | 90,5 |
| Cl (mg/l) | 59.000 | 75.860 | 65.900 |
| SO ₄ (mg/l) | 190 | 478 | 133 |
| SiO ₂ (mg/l) | 250 | n. a. | n. a. |
| HCO ₃ (mg/l) | 90 | 5.200 | 1.270 |
| Sr (mg/l) | 430 | 390 | n. a. |
| Li (mg/l) | 150 | n. a. | n. a.- |
| Br (mg/l) | 250 | n. a. | 191 |
| NH ₄ (mg/l) | 21 | n. a. | 41 |
| Fe (mg/l) | 60 | n. a. | 23 |
| Mn (mg/l) | 15 | n. a. | 20,2 |
| Ba (mg/l) | 10 | n. a. | n. a. |

4.4.2.3.2 Gelöste Gase

Typisch für die Wässer im Untergrund des Oberrheingrabens sind die bemerkenswert hohen Gehalte an gelösten Gasen, von denen Kohlendioxid, CO₂ häufig die vorherrschende Gaskomponente darstellt.

Um die Entlösung von Gasen infolge Druckentlastung zu verringern und damit der Emission von CO₂ entgegenzuwirken, das bekanntermaßen zum sogenannten „Treibhauseffekt“ beiträgt, werden die Systeme der Geothermiekraftwerke unter hohem Druck betrieben. Dadurch soll auch vermieden werden, dass die Freisetzung von gelöstem Kohlendioxid zu Verschiebungen des pH-Wertes in den Wässern führt, was wiederum neue Ausfällungs- oder Auflösungseffekte in den Systemen der Kraftwerke hervorrufen kann.

Die allgemeine Zusammensetzung der Gasphase in den Wässern im Oberrheingraben ist in Tab.4.15 aufgeführt.

Tab.4.15 Mittlere Zusammensetzung von gelösten Gasen in Wässern des Oberrheingrabens aus einer Teufe von 2.000 m und 2.500 m nach /WOL 08/

| Parameter | 2000 m | 2500 m |
|----------------------------|--------|--------|
| Verhältnis Gas/Flüssigkeit | 2,0 | 0,2 |
| CO ₂ (Vol. %) | 92 | 55 |
| CH ₄ (Vol. %) | 4 | 15 |
| N ₂ (Vol. %) | 3 | 30 |

Tab.4.16 Beispiel für die Zusammensetzung von gelösten Gasen in Wässern des Oberrheingrabens am Standort der Geothermiekraftwerke

| Parameter | Soultz /SAN 08/ | Bruchsal /EGG 10/ | Landau /BAU 09/ |
|----------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Verhältnis Gas/Flüssigkeit | 1,04 | 1,6 | 1,0 |
| CO ₂ (Vol.-%) | 83,0 | 90 | 91,6 |
| CH ₄ (Vol.-%) | 2,46 | 1 | 2 |
| H ₂ (Vol.-%) | 0,4 | 0,008 | - |
| N ₂ (Vol.-%) | 11,6 | 8,9 | 6,4 |

4.4.2.3.3 Zusammensetzung von Scale

Vorliegende Informationen über die Zusammensetzung der „scale“ stammen aus der Geothermiegewinnung im Oberrheingraben und wurden, wie im Norddeutschen Becken, durch Untersuchung der Ablagerungen in den Kraftwerkssystemen und Bohrungen ermittelt. Auf die Zusammensetzung von Scale innerhalb des Reservoirs selbst kann nur durch Analogiebetrachtungen und Anwendung von geochemischen Rechen-codes geschlossen werden.

Obwohl die Zusammensetzung der Wässer im Oberrheingraben insgesamt gesehen relativ gleichförmig ausgebildet ist, so gibt es doch Variationen in den Anteilen der chemischen Komponenten. Diese Variationen können in den einzelnen Geothermiekraftwerken lokal zu markanten Unterschieden in der Zusammensetzung der Scale führen.

Zu den häufig in den Kraftwerken festgestellten Scale gehören:

- Calcite / Aragonite; Ablagerungen infolge der Entgasung von Kohlendioxid
- Sulfate; dominiert von Barium, Strontium, Radium diadoch in das Kristallgitter eingebaut.
- Blei- und / oder Eisensulfide

Tab.4.17 Beispiele für die Zusammensetzung von Scale, die an den Standorten der Geothermiekraftwerke im Oberrheingraben ermittelt wurden

| „Scales“ | Soultz | Bruchsal | Landau |
|---------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Hauptbestandteile (>10 Gew.%) | Baryt, Coelestin | Baryt, Kalzit /Aragonit | Kalzit / Aragonit |
| Nebenbestandteile (1<>10 Gew.%) | Galenit | Galenit, Eisensulfid | Baryt, Galenit,, Siderit, Eisen und Kupfersulfid, Eisenhydroxid |
| Spuren | Eisen-Antimon-Kupfer-Arsen Sulfide | Kupfersulfid, Arsenhaltige Minerale | Kupfer-, Arsen-, Antimon- und Silberminerale, Rhodochrosit |

4.4.3 Das Süddeutsche Molassebecken

Das nachfolgende Kapitel beschreibt die charakteristische geothermische Situation im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens.

4.4.3.1 Geologische Strukturen

Die einzige relevante geologische Formation im Molassebecken hinsichtlich geothermischer Energiegewinnung ist der Malm.

Wie der Oberrheingraben, ist das Molassebecken eine relativ junge geologische Struktur, die sich mit dem Ende der Kreidezeit vor ca. 70 Mio. Jahren ausgebildet hat und eng verknüpft ist mit dem Aufstieg der Alpen im Tertiär.

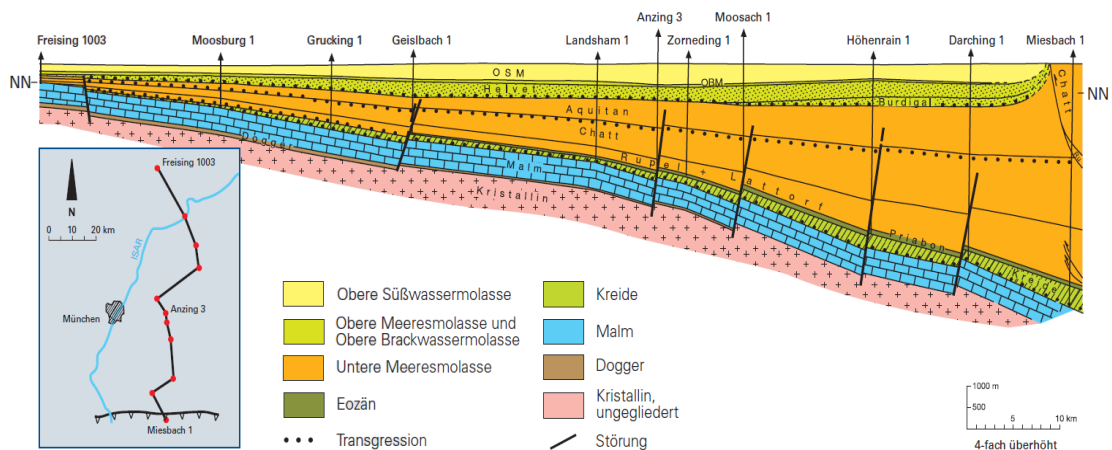


Abb. 4.12 Geologischer Nord-Süd-Schnitt im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens /ZEI 10/

Zur Zeit des Malm (Oberjura) vor ca. 150 Mio. Jahren gehörte die Region des heutigen Molassebeckens zum Flachmeergebiet der Tethys. Mit dem Zusammenstoß der afrikanischen Platte mit der Eurasischen Platte wurde das Tethys-Meer geschlossen und die eurasische Platte unter die afrikanische Platte geschoben, was wiederum zur Ausbildung einer Randsenke im Eozän vor ca. 40 Mio. Jahren führte, die sukzessive mit terrestrischen Sedimenten (Molasse) der aufsteigenden Alpen gefüllt wurde.

Die Akkumulation von Erosionsprodukten füllte allmählich die Senke auf und eine anschließende Hebungsphase führte zur Heraushebung aus dem Meer und zum Ende der Molassebildung.

Die Malm-Formation wurde vor der alpinen Orogenese als Flachmeerfazies gebildet, mit den für das Bildungsmilieu typischen karbonatischen Gesteinsarten, wie z. B. Kalkstein, Dolomit und Mergel.

Die regionale Verbreitung der Malm-Formation folgte in der Zeit der alpinen Orogenese der Abwärtsbewegung der Europäischen Platte und befindet sich heute am Alpenrand in einer Teufe von ca. 5.000 m, während sie weiter nördlich der Alpen an der Tagesoberfläche austreicht. Hier, oberflächennah im Norden des Molassebeckens, ist die Formation verkarstet. Von Norden nach Süden in Richtung Alpen, mit zunehmender Teufenlage, nimmt die Verkarstung ab. Im südlichen Bereich des Molassebeckens geht die Verkarstung ganz zurück und die Formationswässer zirkulieren bevorzugt auf Klüften. Für die Planung von Bohrungen bedeutet dies, dass die Bohrungen auf die vorhandenen Kluftsysteme ausgerichtet sein müssen, um das Reservoir zu erschließen.

Mit zunehmender Teufenlage der Malm-Formation nimmt die hydraulische Durchlässigkeit von Nord nach Süd ab (s. Abb. 4.13) und die nutzbare Porosität der ansonsten geklüfteten Formation liegt nach /ZEI 10/ bei 1 bis 2,5 %.

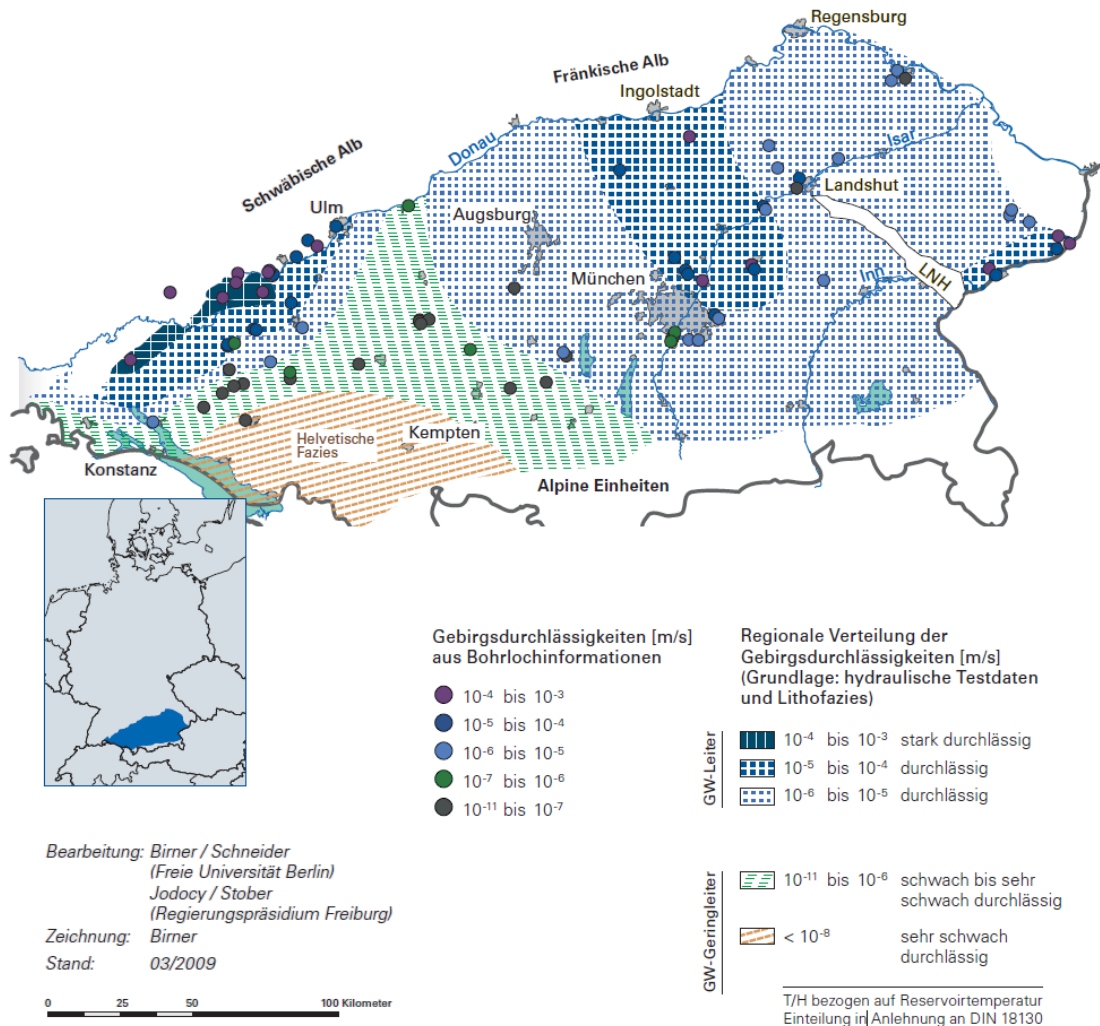


Abb. 4.13 Hydraulische Durchlässigkeiten der Malm-Formation in verschiedenen Bereichen des Süddeutschen Molassenbeckens /ZEI 10/

4.4.3.2 Thermische Charakteristika

Die Ausdehnung des Süddeutschen Molassebeckens umfasst nahezu die gesamte Breite von Süddeutschland. Mit 20.000 km² ist es das flächenmäßig zweitgrößte Gebiet hinsichtlich geothermaler Energiegewinnung in Deutschland. Auch wenn die Energie-

dichte niedriger als im Oberrheingraben ist, so verfügt das Molassebecken mit 88 EJ³ über ein hohes förderbares geothermales Potenzial. Der thermische Gradient ist meist größer als 3°C / 100m und kann lokal auf 4°C / 100m steigen.

Die Region mit relevanten Temperaturanomalien liegt in der näheren Umgebung von München, wo auch die meisten Geothermiekraftwerke anzutreffen sind. Die Anomalie ist das Resultat einer Konvektionszelle, wie sie in Abb. 4.14 dargestellt ist.

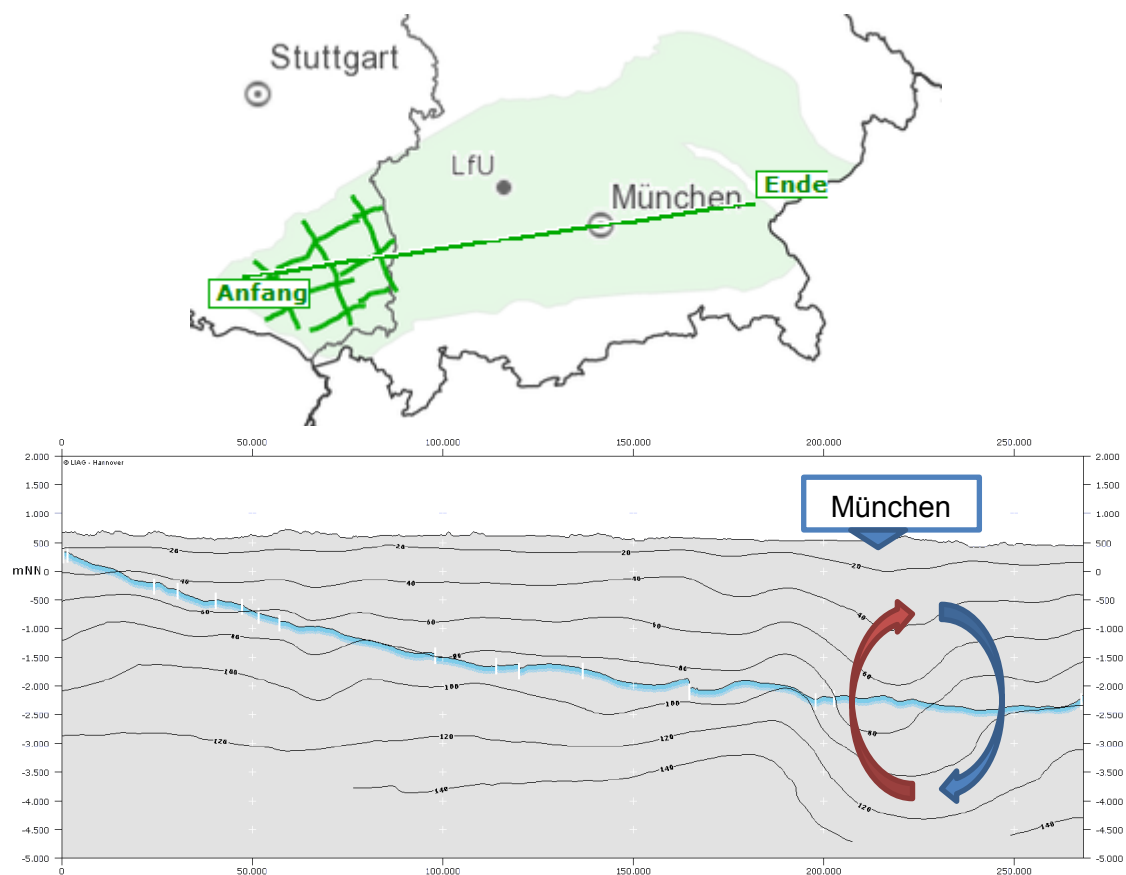


Abb. 4.14 Vertikalschnitt (WSW-ENE) durch das Süddeutsche Molassebecken. Die Isolinien gleicher Temperatur sind schwarz dargestellt. Die Grenze zum Hangenden der Malm-Formation ist mit einer hellblauen Linie markiert /GEO 14/

Der mittlere Wärmefluss im Molassebecken liegt bei 80 mW/m² und erreicht lokal Werte von 100-110 mW/m². Damit liegt er generell höher als im Norddeutschen Becken, ist aber niedriger als im Oberrheingraben (vgl. Abb. 4.15)

³ EJ; Exa Joule (1 Exajoule = 10¹⁸ J; 14 EJ = Primärenergieverbrauch Deutschlands 2008)

Die Angaben sind kohärent mit den Angaben zum förderbaren geothermalen Potenzial der beiden anderen Geothermieregionen Deutschlands.

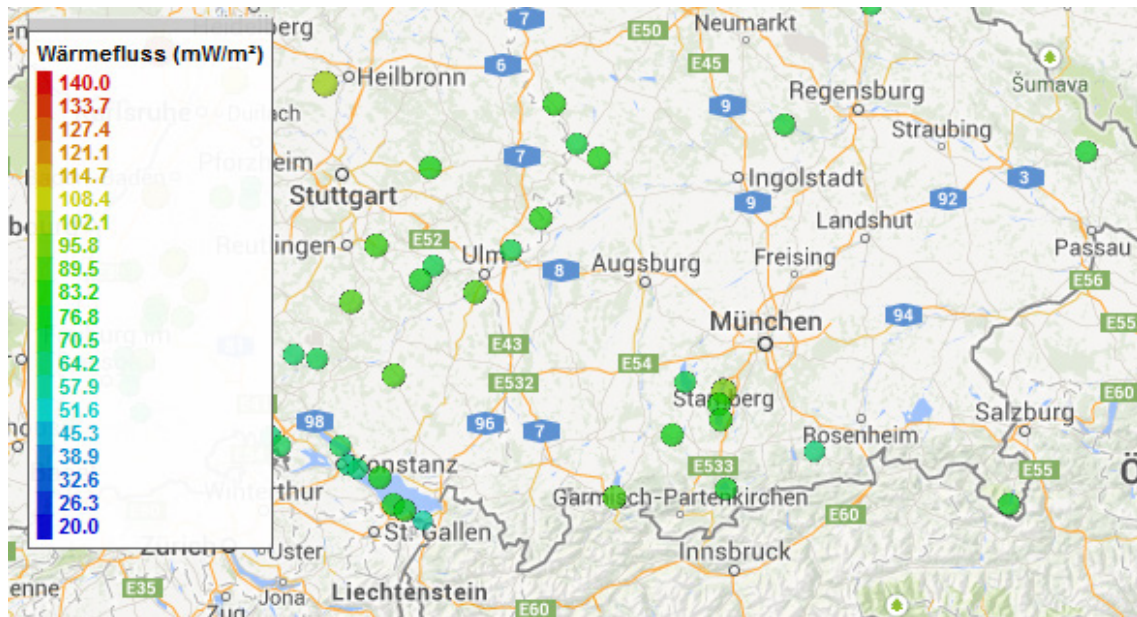


Abb. 4.15 Wärmefluss im Molassebecken, in mW/m². Daten entnommen aus /HUR 02/, Bild erstellt mit gpsvisualizer.com, Karte erstellt mit google.maps

Nach /HAR 08/ schwankt die thermische Leitfähigkeit der Malmkarbonate in einem engen Wertebereich von 2,1 bis 2,7 W/m.K und liegt im Mittel bei 2,39 W/m.K.

4.4.3.3 Chemische Charakteristika

Zu den wichtigsten chemischen Eigenschaften zählen Lösungszusammensetzung, gelöste Gase und Scale-Zusammensetzungen, die weiter unten beschrieben werden.

4.4.3.3.1 Zusammensetzung der wässrigen Lösungen

Das Molassebecken unterscheidet sich durch die geringe Salinität der Formationswässer erheblich von anderen geothermalen Regionen, da die Wässer der Molasse praktisch die Qualität von Trinkwasser aufweisen. So ist das Korrosionspotenzial der Wässer weit geringer als im Norddeutschen Becken oder im Oberrheingraben. Als Folge sind auch die Baukosten für Geothermiekraftwerke geringer, da zusätzliche konstruktive Maßnahmen wie die Vergütung von technischen Systemen, z. B. Speziallegierungen für Wärmetauscher, wegfällen.

Der Grund für die geringe Salinität der Formationswässer ist deren Herkunft (meteorisches Oberflächenwasser) verbunden mit der guten hydraulischen Durchlässigkeit der Malm-Formation selbst. Die Wässer der Molasse unterscheiden sich von den Wässern der anderen Regionen, abgesehen von der Salinität, auch durch ihr „junges“ Alter. Das Oberflächenwasser kann ungehindert in die im Norden der Molasse ausstreichende Malm-Formation infiltrieren und über die ausgeprägten hydraulischen Wegsamkeiten des Karstes und der Klustsysteme in Teufen eindringen, wo die Nutzung der Geothermie möglich ist /WOL 08/.

Die allgemeine Zusammensetzung von Wässern in der Malm-Formation ist in Tab.4.18 aufgeführt.

Tab.4.18 Zusammensetzung von Wässern in der Malm-Formation /WOL 08/

| Parameter | Malm-Formation |
|-------------------------------|----------------|
| pH-Wert | 6,7 |
| Eh-Wert (mV) | -250 |
| Salinität (g/l) | 0,7 |
| Kationen (mg/l) | |
| K | 20 |
| Na | 110 |
| Ca | 40 |
| Mg | 10 |
| Fe | 0,1 |
| As | 0,001 |
| Pb | |
| Sr | 0,7 |
| Anionen (mg/l) | |
| Cl | 130 |
| Br | 0,2 |
| I | 0,2 |
| F | 2 |
| SO ₄ ²⁻ | 20 |
| HCO ₃ ⁻ | 300 |
| Sonstige (mg/l) | |
| SiO ₂ | 90 |
| H ₂ S | 5 |
| CO ₂ | 25 |

Ein wesentliches Merkmal der Wässer ist der H₂S-Gehalt, der für das Sulfide Stress Cracking (SSC) verantwortlich ist.

Über die allgemeine chemische Zusammensetzung der geothermalen Wässer im Molassebecken hinaus liegen den Bearbeitern gegenwärtig keine spezifischen Angaben für einzelne Standorte mit Geothermiekraftwerken vor. Eine Ausnahme bildet der Standort Unterhaching/WOL 07/. Hier erreicht die Kohlensäure (HCO_3^-) eine Konzentration von 300 to 400 mg/l, während die Konzentration an Schwefelwasserstoff (H_2S) mit 2 mg/l vergleichsweise niedrig liegt. Der pH-Wert wird mit für den Standort gemessenen 8,8 angegeben.

4.4.3.3.2 Gelöste Gase

Der Gehalt an gelösten Gasen in den Formationswässern im Molassebecken ist mit einem Volumenanteil von 0,4 (Gas/Wasser) relativ hoch. Häufig auftretende Gaskomponenten sind Kohlendioxid, CO_2 und Methan, CH_4 . Entscheidend für die Ausfällung von Karbonaten in den Systemkomponenten der Kraftwerksanlagen und im Reservoir selbst ist in diesem Zusammenhang die Entgasung von Kohlendioxid. Damit ist Kohlendioxid CO_2 , neben der korrosiven Wirkung von Schwefelwasserstoff, H_2S , der zweitwichtigste Risikofaktor für Geothermieanlagen im Molassebecken.

Die allgemeine Zusammensetzung von im Formationswasser gelösten Gaskomponenten ist in Tab.4.19 aufgeführt.

Tab.4.19 Allgemeine Zusammensetzung von – im Formationswasser – gelösten Gaskomponenten in der Malm-Formation im Molassebecken nach /WOL 08/

| Parameter | Malm-Formation |
|----------------------------|----------------|
| Verhältnis Gas/Flüssigkeit | 0,4 |
| CO_2 (Vol. %) | 50 |
| CH_4 (Vol. %) | 38 |
| N_2 (Vol. %) | 12 |

Wie für die chemische Zusammensetzung der Formationswässer am Standort Unterhaching, liefert /WOL 07/ Angaben zu den gelösten Gasen. Das Verhältnis der Volumina von Gas zu Wasser schwankt hier zwischen 0,3 und 0,5. Methan ist mit 60 Vol% die dominierende Gaskomponente, gefolgt von Stickstoff mit 30 Vol%.

4.4.3.3 Zusammensetzung von Scale

Die geochemische Zusammensetzung der Scale wurde durch Untersuchung der Ablagerungen in den Kraftwerkssystemen und Bohrungen mit der Gewinnung von Erdwärme ermittelt. Auf „Scale“ innerhalb des Reservoirs wurde durch Analogiebetrachtungen und Anwendung von geochemischen Rechenodes geschlossen.

Aus der Untersuchung von Scale an verschiedenen Standorten im Molassebecken kann eine relativ gleichartige Zusammensetzung abgeleitet werden /WOL 11/. Häufig auftretende Minerale in den Scales sind Kalzit/Aragonit (gebildet mit der Entgasung von Kohlendioxid CO₂) und als zweithäufigste Vertreter die Minerale Eisensulfid und Eisenhydroxid.

Eine Übersicht über die Zusammensetzung von Scale, die in den Geothermiekraftwerken im Molassebecken festgestellt wurden, gibt Tab.4.20.

Tab.4.20 Beispiele für die Zusammensetzung von „scale“, wie sie für verschiedene Geothermiekraftwerke im Molassebecken ermittelt wurden /WOL 11/ – C/A = Calcite/Aragonite

| Bestandteile | Unterhaching | MB 1 | MB 2 | Altheim | Erding |
|----------------------|---|----------------------|----------------------|--------------|----------------------------------|
| Haupt- (>10 Gew.%) | C/A, Kupferglanz Cu ₂ S, Kupferkies CuFeS ₂ | C/A | C/A | C/A | C/A, Eisenhydroxid, Eisensulfide |
| Neben- (1<>10 Gew.%) | Magnetkies, Pyrit, Siderit, Eisenhydroxid | Pyrit, Eisenhydroxid | Eisensulfide (Pyrit) | Eisensulfide | |
| Spuren (<1 Gew.%) | Schwefel, Malachit | | | | |

4.5 Modellierung einzelner Aspekte der Tiefengeothermie

Im Laufe des GeoSys-Vorhabens wurde eine Reihe von Modellrechnungen zu relevanten geochemischen Prozessen der Tiefengeothermie in Deutschland durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden hier kurz dargestellt und diskutiert. Details zu den Rechnungen finden sich im Anhang.

Geochemische Prozesse – Gleichgewichtsmodellierung

Geochemische Gleichgewichtsmodellierungen wurden mit dem Code ChemApp /GTT 14/ durchgeführt, um die gemessene Zusammensetzung der Thermalwässer aus Neustadt-Glewe mit vorhandenen thermodynamischen Datenbasen nachzurechnen. Die Ergebnisse der Rechnungen korrespondieren teilweise zufriedenstellend mit den gemessenen Werten. Für eine Reihe von Elementen wurden jedoch Abweichungen von mehr als einer Größenordnung festgestellt. So hohe Abweichungen sind für quantitative Berechnungen, bei denen z. B. Volumen- und Porositäts-/Permeabilitätsänderungen im Reservoir oder die Menge der zu erwartender Scale interessieren, nicht tragbar. Die für diese Berechnungen erforderlichen thermodynamischen Daten lagen zudem in manchen Fällen außerhalb ihres Geltungsbereiches. Eine Druckabhängigkeit dieser Daten stand generell nicht zur Verfügung. Belastbare Modellrechnungen der Lösungszusammensetzungen bei Änderungen von Druck und Temperatur waren also nicht möglich.

Diese Ergebnisse machten deutlich, dass für die relevanten geochemischen Prozesse der Tiefengeothermie spezielle thermodynamische Daten erforderlich sind, die die Löslichkeiten in Wässern mit hohen Salzgehalten temperatur- und druckabhängig richtig beschreiben können. Zu Beginn der Vorhaben GeoSys und Geodat fehlten solche Daten weitgehend.

Benötigt werden temperatur- und druckabhängige Pitzer-Daten. Mit der in den 1970er Jahren entwickelten Pitzertheorie wurde es erstmal möglich, hochsalinare Lösungen richtig zu beschreiben. Seither sind weltweit Pitzerdaten entwickelt worden, die für die Beschreibung geochemischer Prozesse in hochsalinaren Lösungen Verwendung finden. Pitzerdaten liegen also für viele auch für die Geothermie relevante Elemente vor.

Mit dem vom BMWi geförderten Vorhaben GeoDat wurde 2011 mit der Entwicklung einer Datenbasis für die Belange der Tiefengeothermie begonnen. Ziel von GeoDat war die Bestimmung von Ionenwechselwirkungskoeffizienten (Pitzerdaten) für Sr, Ba und Pb in NaCl-Lösungen sowie die Bestimmung der polytherm/polybaren Löslichkeit ausgewählter Mineralphasen. Damit sollte ermöglicht werden, die polytherme Löslichkeit der wichtigsten Scale-bildenden Mineralphasen in Groß Schönebeck (GrSk) in hochsalinaren Lösungen zu modellieren.

4.5.1.1 Die neue GeoDat-Datenbasis

Mit der von GRS in GeoDat entwickelten Datenbasis ist es nun möglich, die Bildung wichtiger Scale-Minerale temperaturabhängig und druckabhängig zu beschreiben. Allerdings ist die Verwendbarkeit dieser Datenbasis aktuell auf einen einzigen geochemischen Code beschränkt (PhreeqC).

Es wurde eine Reihe von Modellrechnungen durchgeführt, die das Verhalten der Scale-Minerale Baryt (BaSO_4), Cölestin (SrSO_4), Radiumsulfat und Anhydrit (CaSO_4) beim Abkühlen der Reservoirlösungen bei der Förderung, in der Oberflächen-Anlage und bei der Reinjektion ins Reservoir und der Mischung kalter und heißer Lösungen beschreiben sollten. Diese Reaktionen sind für die Anlagen Groß-Schönebeck und Soultz-sous-Forêts von Bedeutung, wo hochsalinare Wässer auftreten und diese Minerale beobachtet wurden.

Die Modellierungsergebnisse zeigten, dass die Datenbasis vor allem hinsichtlich Cölestin und Anhydrit noch verbessert werden muss. Die Modellrechnungen lassen Anhydritausfällungen unter den Temperaturbedingungen der Oberflächenanlage und eine Erniedrigung der Cölestinlöslichkeit mit steigender Temperatur erwarten. Dies entspricht jedoch nicht den Beobachtungen. Weder in Soultz noch in Groß-Schönebeck wurde Anhydrit gefunden, dagegen konnten Cölestinausfällungen beobachtet werden. Diese offensichtlich fehlerhaften Modellierungsergebnisse sind darauf zurückzuführen, dass die mathematischen Funktionen, die zur Berechnung der chemischen Eigenschaften der Spezies verwendet wurden, nur bis 120°C gültig sind. Auch die verwendete Löslichkeitskonstante des Anhydrits ist für die in Groß-Schönebeck angetroffenen Temperaturen nicht gültig.

Die Modellrechnungen zeigten weiterhin, dass die Berechnung von Gleichgewichten ohne die Berücksichtigung von kinetischen Effekten zu großen Abweichungen von den beobachteten Ergebnissen führen kann. Auch wenn die Ergebnisse hinsichtlich der ausgefallenen Scale qualitativ richtig waren, war die Menge der Scale an Orten mit bekannter Temperatur oft deutlich höher als in der Realität. Kinetisch bedingte Übersättigungen können durch die Modellierung von Gleichgewichten nicht erfasst werden. Um hier genauere Modellierungsergebnisse zu erhalten, müssten experimentell durch die Erfassung von Lösungszusammensetzungen und Bildungsgeschwindigkeiten von Scale in laufenden Anlagen kinetische Faktoren abgeleitet werden.

Sehr positiv waren die Rechenergebnisse hinsichtlich der Modellierung des Radiums: Beim Vergleich der berechneten und gemessenen Mengen von Radiumsulfat, Cölestin und Baryt bei 60°C in Soultz stellte sich eine erstaunlich gute Übereinstimmung heraus. Dies Ergebnis ist umso erfreulicher, als es für Radium im interessierenden Temperatur-, Druck- und Salinitätsbereich der Lösungen nur wenige Löslichkeitsdaten gibt. Zudem sind thermodynamische Daten für Radium nur in ganz wenigen Datenbasen enthalten. GeoDat ist derzeit die einzige Datenbasis, die entsprechende Rechnungen für Radium für polytherm-polybare Bedingungen in hochsalinaren Lösungen erlaubt.

4.5.1.2 Stand der Modellierung geochemischer Prozesse

Im Kapitel "Möglichkeiten und Grenzen der Reservoirmodellierung" wurde bereits gezeigt, dass die Modellierung des reaktiven Stofftransports für die Belange der Tiefengeothermie noch eine Reihe von Herausforderungen bereithält. Die durchgeführten Modellrechnungen (s. Anhang und Abschlussbericht GeoDat), zeigen, welche Arbeiten noch erforderlich sind, um wichtige Prozesse in Geothermiesystemen richtig beschreiben zu können. Dazu gehören die Modellierung des Stofftransportes auf Klüften, die Vervollständigung der Druck- und Temperaturabhängigkeit relevanter thermodynamischer Daten, Quantifizierung der Korrosion und Scalebildung und damit einhergehende Entgasungsprozesse sowie last not least die Einbeziehung der Kinetik in die Modellrechnungen.

Viele (allerdings nicht alle) der interessierenden geochemisch-hydrologischen Fragestellungen könnten unter Verwendung publizierter Daten modelliert werden. Das Problem ist aber, dass die gängigen Codes dazu in der Regel nicht in der Lage sind. Mit dem Programm PHREEQC wurde nun ein Anfang gemacht. In der GRS liegt das Wissen um die relevanten offenen Fragestellungen sowohl zu den erforderlichen thermodynamischen Daten, zu den benötigten Softwarerweiterungen, vor allem aber auch zu den benötigten In-situ-Messdaten vor. Desgleichen liegt auch die Expertise vor, die in GeoSys und GeoDat identifizierten Lücken zu schließen.

Zu den vordringlich zu schließenden Lücken gehören folgende Aufgaben:

Erweiterung der thermodynamischen Datenbasis:

- Aufnahme weiterer wichtiger wässriger Spezies für die Beschreibung von Redoxprozessen, z. B. $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-$, $\text{Cu}^+/\text{Cu}^{2+}$ u. a.u. a.
- Beschreibung der Löslichkeiten von Sulfiden und Carbonaten
- Einbeziehung von pT-abhängigen Löslichkeitsdaten von Gasen, z. B. CH_4 , N_2 , CO_2 , H_2S , H_2 in hochsalinaren Lösungen

Programmerweiterungen:

- Erweiterung des Rechencodes OGS um ein Modell zur Beschreibung von Permeabilitätsänderungen bei Ausfällungen auf Klüften
- Erweiterung von OGS/Chemapp (oder PhreeqC) zur Beschreibung fester Lösungen; denkbar wäre auch eine Änderung der Kopplung zwischen OGS und GEM-Selektor.
- Implementierung von Modellen für nicht-ideale Lösungsprozesse von Gasen in hochsalinaren, wässrigen Lösungen

Modellrechnungen:

Zur Beantwortung der für die Praxis des Anlagenbetriebes wichtigen Fragestellungen sind 3D-Modellierungen des reaktiven Stofftransportes erforderlich. Dafür müssen die fehlenden kinetischen Daten ermittelt werden und die Ergebnisse der Modellrechnungen mit experimentellen Daten abgesichert werden.

Ermittlung von geochemischen Messdaten:

Zuverlässige Messdaten sind für die Absicherung von Modellierungsergebnissen eine unabdingbare Voraussetzung, die allerdings noch geschaffen werden muss. Erforderlich ist die Entwicklung und Anwendung neuer Technologien eines Monitorings von Geothermiekraftwerken zur Charakterisierung der in-situ Verhältnisse im Reservoir und in der technischen Anlage und zur Prognostizierung ihrer Änderungen. Erste Arbeiten in dieser Richtung wurden vom Forschungsverbund GRS, EnBW und Universität Göttingen mit dem vom BMWi geförderten Projekt ANEMONA „Anlagenmonitoring als Schlüsseltechnologie für den erfolgreichen Betrieb von Geothermiekraftwerken in Deutschland“ aufgenommen.

Aus Sicht der GRS scheint aus Zeit- und Kostengründen ein zweistufiges Vorgehen zielführend zu sein:

- Entwicklung von Probenentnahmetechniken und analytischen Methoden, die eine Interpretation übertägig aufgezeichneter Messwerte eines Betriebsmonitorings zur Bewertung von Vorgängen im Reservoirbereich ermöglichen sollen (Ziel von ANEMONA).
- In einem weiteren Schritt ist die Entwicklung von Probenentnahmesystemen sinnvoll, die es ermöglichen, Fluide aus den Bohrungen unter originalen Temperatur- und Druckbedingungen zu beproben und zu analysieren.

5 Anlagenbetrieb

Anlagen zur geothermischen Energieerzeugung werden in Deutschland sowohl zur Fernwärmebereitstellung als auch zur Stromerzeugung genutzt. In vielen Anlagen werden diese beiden Möglichkeiten kombiniert genutzt. Dabei kann die Priorität sowohl auf der Stromerzeugung als auch auf der Wärmebereitstellung liegen.

In den nachfolgenden Kapiteln wird der prinzipielle Aufbau von geothermischen Anlagen zur Stromerzeugung beschrieben, sowie auf die Kenngrößen der Anlagen, wesentliche Kraftwerkskomponenten, Betriebsmittel in der Anlage, Betriebserfahrung und seismische Ereignisse eingegangen.

5.1 Kraftwerkstechnologien

Eine geothermische Anlage besitzt unabhängig vom Verwendungszweck immer mindestens einen Thermalwasserkreislauf. Je nach weiterer Nutzungsart schließen sich an diesen Thermalwasserkreislauf ein Fernwärmenetz und/oder ein Sekundärkreislauf zur Stromerzeugung an. Dabei können das Fernwärmenetz und der Kreislauf zur Stromerzeugung sowohl in Reihe (Bsp. Landau) als auch parallel geschaltet sein (Bsp. Unterhaching). Es gibt auch Mischformen, die über eine entsprechende Vermaschung realisiert werden. Diese einzelnen Varianten werden je nach Verwendungszweck der Anlage ausgelegt, abhängig davon, ob die Anlagen wärme- oder stromgeführt betrieben werden soll.

Im Folgenden werden nur geothermische Kraftwerkstechnologien betrachtet, die in Deutschland derzeit installiert sind oder in absehbarer Zeit installiert werden. Diese in Deutschland genutzten Technologien umfassen Anlagen, die Strom mittels des „Organic Rankine Cycle“ (ORC) oder des Kalina-Prozesses erzeugen. Geothermische Kraftwerkstechnologien, die entweder noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium sind, oder in Deutschland auf Grund der physikalischen Eigenschaften der geothermischen Reservoirs nicht eingesetzt werden können, werden nicht näher betrachtet.

Zu diesen von der weiteren Betrachtung ausgeschlossenen Kraftwerkstechnologien zählen unter anderem die direkte Stromerzeugung aus der Wärme des Thermalwasserkreislaufes mittels thermoelektrischer Elemente und geothermische Kraftwerke, deren Turbine direkt mit Dampf aus den Bohrungen beaufschlagt wird.

Die direkte Stromerzeugung aus Wärme mit thermoelektrischen Elementen wird nach Kenntnis der GRS derzeit weltweit noch nicht genutzt. Eine grobe Abschätzung mit den in Deutschland vorliegenden Vorlauftemperaturen (bis 160°C) und Kenndaten von thermoelektrischen Elementen kommt zu dem Ergebnis, dass für 2 MW installierter Leistung etwa 1000 m² Wärmeübertragerfläche benötigt werden. Dies stellt kein prinzipielles Problem dar, erhöht allerdings den finanziellen Aufwand für diese Kraftwerkskomponente deutlich. Darüber hinaus müssen Wechselrichter installiert werden, um den erzeugten Gleichstrom ins Netz einspeisen zu können. Dem gegenüber steht der Entfall des Sekundärkreislaufes einschließlich Turbine und Generator. Aussagen zur Zuverlässigkeit von thermoelektrischen Elementen im Dauereinsatz können derzeit nicht getroffen werden.

Geothermische Kraftwerke, deren Turbinen direkt mit Dampf aus den Bohrungen beaufschlagt werden, sind in Deutschland nicht wirtschaftlich zu betreiben, da die Temperaturen der geothermischen Reservoirs (bis 160°C) in Deutschland zu niedrig sind.

5.1.1 Organic Rankine Cycle (ORC)

Der Organic Rankine Cycle (ORC) ist ein Kreisprozess zur Stromerzeugung, bei dem organische Medien als Arbeitsmittel verwendet werden.

Die Wahl des verwendeten Arbeitsmittels hängt stark von der zur Verfügung stehenden Temperatur des Reservoirs ab und ist daher von Anlage zu Anlage verschieden. Niedrige Siedetemperaturen des Arbeitsmediums sind für geothermische Anlagen in Deutschland von Vorteil, da das Thermalwasser je nach Reservoir nur Temperaturen von etwa 95°C bis 160°C aufweist. Details des ORC-Kreislaufs werden im Kapitel „Sekundärkreislauf“ ausgeführt.

5.1.2 Kalina

In einem Kalina-Kreisprozess wird ein Ammoniak-Wasser-Gemisch als Arbeitsmittel verwendet. Dies ermöglicht es, wie beim Organic Rankine Cycle, auch bei niedrigen Thermalwassertemperaturen Strom zu erzeugen. Mit einem Ammoniak-Wasser-Gemisch kann der Betriebspunkt flexibel an die vorhandenen Thermalwassertemperaturen angepasst werden [GTV 12]. Details des Kalina-Kreislaufs werden im Kapitel „Sekundärkreislauf“ ausgeführt.

5.1.3 Kreisläufe in Geothermieranlagen (primär / sekundär / tertiär)

Es können auf Grund der Vielzahl von realisierten Lösungen in deutschen Geothermieranlagen nur generische Kreisläufe beschrieben werden. Kreisläufe in bestimmten Anlagen können davon abweichen.

5.1.3.1 Thermalwasserkreislauf (Primärkreislauf)

Der Thermalwasserkreislauf reicht allgemein von der Förderung des Thermalwassers aus der Förderbohrung bis hin zur Injektionsbohrung. Ein Beispiel eines Thermalwasserkreislaufes ist in Abb. 5.1 dargestellt. Das Thermalwasser weist bei derzeit in Betrieb befindlichen deutschen Anlagen Temperaturen bis zu 160°C auf /GSO 12/.

Das Thermalwasser wird aus der Förderbohrung über eine Pumpe gefördert. Die derzeit in Betrieb befindlichen Geothermieranlagen in Deutschland erreichen Förderraten von bis zu 150 L/s /GSO 12/. Die Förderpumpen werden entweder als Tauchpumpe oder als Gestängepumpe realisiert.

Im oberirdischen Teil der Anlage befinden sich meist mehrere Filterstrecken. Der Filter hinter der Förderbohrung dient dem Schutz der oberirdischen Anlagenteile, indem grobe Partikel aus dem Thermalwasser entfernt werden. Dieser Filter wird als Grobfilter oder auch als Hochtemperaturfilter bezeichnet /BMU 11/

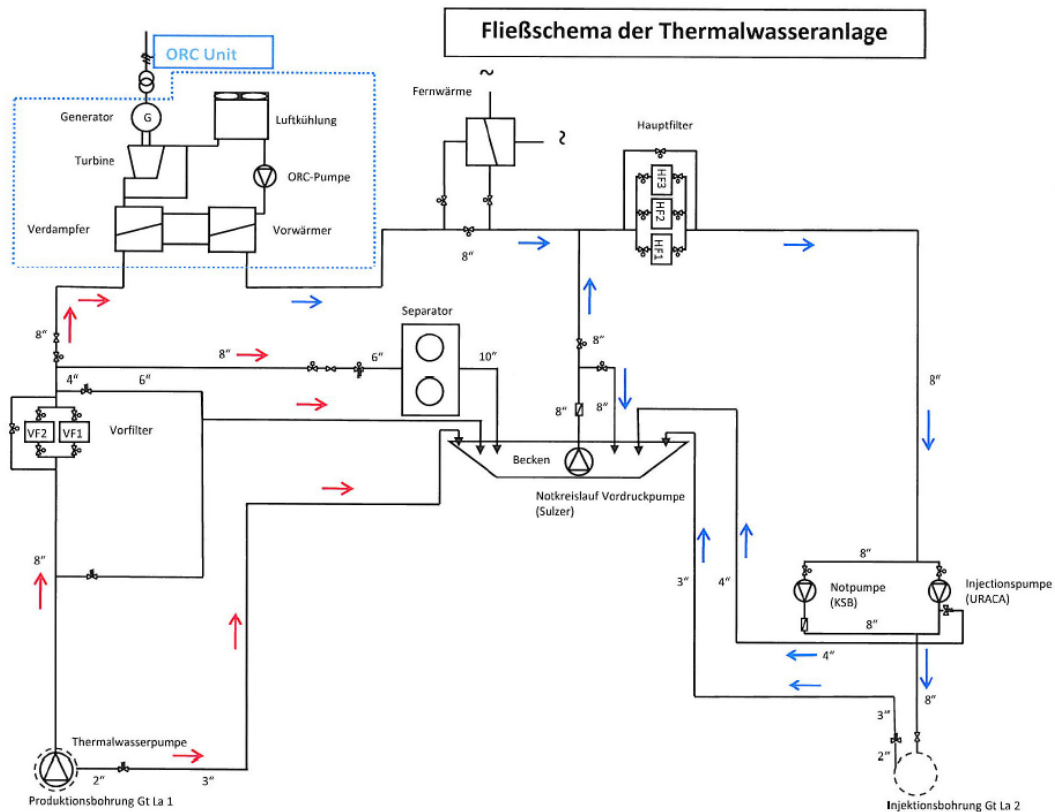


Abb. 5.1 Prinzipschaltbild des Thermalwasserkreislaufs /BAU 11/

Der Thermalwasserkreislauf verläuft von der Thermalwasserpumpe über die Vorfilter zu den Wärmeüberträgern für Verdampfung, Vorwärmung und Fernwärmeauskopplung. Danach wird das Wasser über die Hauptfilter und die Injektionspumpe wieder in die Injektionsbohrung verpresst. Bei Ausfall der Wärmesenke kann das Thermalwasser über den Separator und das Becken abgekühlt und entspannt werden

Das Thermalwasser wird anschließend durch Wärmeübertrager geführt, die die Wärme an sekundäre Kreisläufe entweder zur Stromproduktion oder zur Fernwärmebereitstellung übertragen /BMU 11/.

Nach dem Wärmeübertrager wird das Thermalwasser ein weiteres Mal über eine Filterstrecke geleitet, bevor es in die Injektionsbohrung gepumpt wird. Diese Feinfilter oder Niedertemperaturfilter vor der Injektionsbohrung werden eingesetzt, um feine Partikel abzuscheiden, damit der Eintrag von Verunreinigungen in die Injektionsbohrung vermieden wird /BMU 11/. Das Wasser wird anschließend in die Injektionsbohrung verbracht. Dies kann optional mithilfe einer Injektionspumpe geschehen. Je nach geologischen Eigenschaften des Reservoirs sowie den Betriebsvolumenströmen ist unter Umständen keine Pumpe mehr nötig /BMU 11/.

Der Thermalwasserkreislauf beinhaltet ein Sumpfsystem, auch Slopsystem genannt. In dem System soll Thermalwasser aufgefangen werden, welches bei Wartungsarbeiten sowie Reparaturen oder aufgrund von Undichtigkeiten bzw. Leckagen austreten kann. Mittels einer Pumpe kann dieses Wasser wieder in den Thermalwasserkreislauf zurück gefördert werden. Ein Ausgleichsbehälter kann dazu dienen, Volumenschwankungen auszugleichen und Verluste im Kreislauf zu kompensieren /GTV 12/.

Im Thermalwasserkreislauf sind in der Regel mehrere Bypässe installiert. Die Bypässe dienen dazu, bei Nicht-Verfügbarkeit von Anlagenkomponenten diese umfahren zu können. Daher gibt es auch Becken, in denen das Thermalwasser gesammelt werden kann. Aus diesen Becken kann das Thermalwasser wieder in den Kreislauf zurückgefördert werden. Eine weitere Komponente ist der Separator / Verdampfer. Dieser dient der Druckentspannung und der Rückkühlung des Thermalwassers unter 100°C, bevor es in die Becken eingeleitet wird. Dies ist z. B. nötig, wenn die Turbine synchronisiert wird oder beim Aufwärmen der Bohrung und der Pumpe. Der Dampf, welcher bei Kühlung und Entspannung entsteht, wird über Schornsteine abgeführt /BAU 11/, /KUH 12/. Der Separator dient zudem dazu, Partikel und schwere Mineralien abzuscheiden, bevor das Thermalwasser über einen Bypass in das Becken geleitet wird. Der Separator arbeitet wie ein Destillator /BAU 11/.

An den Thermalwasserkreislauf schließen sich je nach Art der Anlage Kreisläufe zur Stromerzeugung und/oder Fernwärmeübertragung an.

5.1.3.2 Sekundärkreislauf (Stromerzeugung/Fernwärme)

Sekundärkreisläufe in Geothermiekraftwerken dienen der Stromerzeugung und/oder der Fernwärmeauskopplung. Im Folgenden werden Kreisläufe des ORC- und Kalinatyps zur Stromerzeugung näher beschrieben.

5.1.3.2.1 Organic Rankine Cycle (ORC)

Der ORC-Prozess ist ein Kreisprozess mit organischen Arbeitsmitteln. Ein Beispiel eines Sekundärkreislaufes der ORC-Bauart ist in Abb. 5.2 dargestellt. Dabei wird das Arbeitsmittel zunächst mit der Speisepumpe auf Betriebsdruck gebracht. Das Arbeitsmittel wird dann über einen Vorwärmer geführt und anschließend im Hauptwärmeübertrager verdampft. Sowohl die Vorwärmung als auch die Verdampfung erfolgen mittels

des Thermalwassers über Wärmeübertrager. Mit dem entstandenen Dampf wird eine Turbine angetrieben. Nach der Entspannung des Dampfes durch die Turbine wird das Arbeitsmittel mithilfe eines Kühlsystems (Tertiärkreislauf) im Kondensator kondensiert. In manchen Anlagen wird mittels eines Rekuperators ein Teil der Restwärme vor dem Kondensator genutzt, um das Arbeitsmittel (nach der Pumpe, aber vor der Vorwärmung durch Thermalwasser) bereits etwas vorzuwärmen. Ebenso kann unter Umständen die Vorwärmung durch Thermalwasser entfallen, um mehr Wärme für die Fernwärmeauskopplung zu haben.

Darüber hinaus gibt es noch Anlagen mit einem zweiten ORC-Kreislauf. Hierbei wird mit Hilfe des etwas ausgekühlten Thermalwassers ein zweiter ORC-Kreislauf mit Wärme versorgt. Dieser zweite ORC-Kreislauf enthält dann in der Regel ein anderes Arbeitsmittel (Fluid mit niedrigerer Siedetemperatur) und eine eigene Turbine.

Die konkrete Realisierung der ORC-Anlage vor Ort hängt von vielen Faktoren wie vorhandener Thermalwassertemperatur, Nutzungsart (Strom- und/oder Fernwärmeerzeugung), erforderlichen Investitionskosten, etc. ab.

Die Überdruckabsicherung des ORC-Kreislaufes erfolgt durch Sicherheitsventile oder / und Berstscheiben. Abhängig vom eingesetzten Arbeitsmittel sind Gaswarnanlagen in den Anlagen installiert, um mögliche Leckagen im Kreislauf detektieren zu können /BAU 11/.

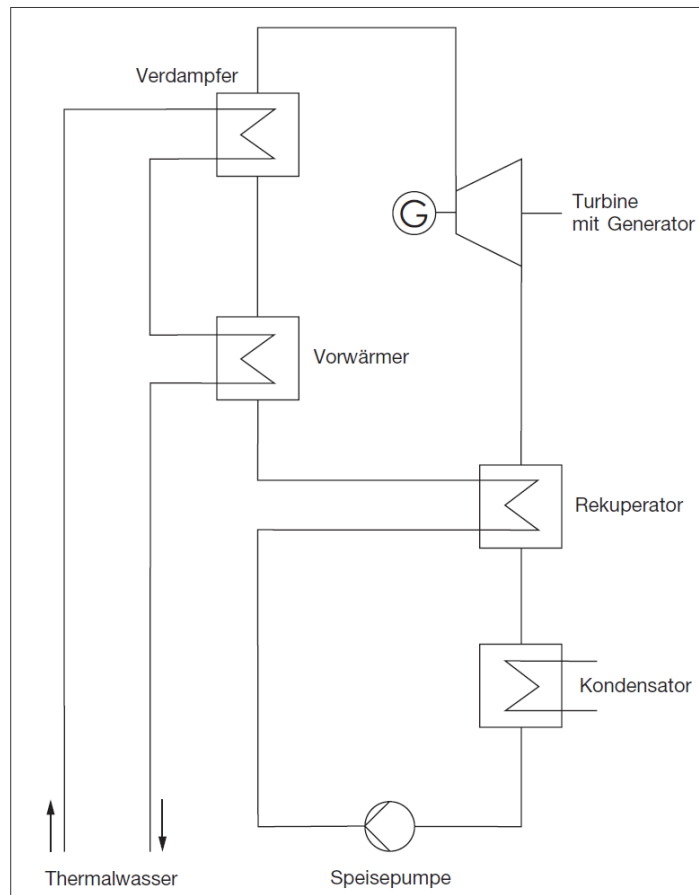


Abb. 5.2 Prinzipschaltbild eines ORC-Kreislauf /MÜN 05/ -

Der ORC-Kreislauf führt von der Speisepumpe über den Rekuperator und Vorwärmer zum Verdampfer. Der dort entstehende Dampf wird über die Turbine entspannt und gibt im Rekuperator Restwärme an den Kreislauf zurück. Im Kondensator wird das Medium kondensiert und anschließend der Speisepumpe wieder zugeführt.

5.1.3.2.2 Kalina-Kreislauf

Das Ammoniak-Wasser-Gemisch wird mittels einer Pumpe auf Betriebsdruck gebracht. Es wird dann über Niedertemperatur- (LT) und Hochtemperatur- (HT) Rekuperator geführt und dabei vorgewärmt. Nachfolgend wird das Arbeitsmittel in einem Wärmeübertrager mittels des Thermalwassers verdampft. Der Dampf besteht hauptsächlich aus Ammoniak und mitgerissenen ammoniakarmen Wassertröpfchen. Nach der Verdampfung wird ammoniakreicher Dampf von ammoniakarmer Lösung in einem Separator getrennt. Die ammoniakarme Lösung wird in den HT-Rekuperator geleitet, wo sie der Vorwärmung des Arbeitsmittels vor dem Verdampfer dient. Der ammoniakreiche Dampf treibt die Turbine an und wird dadurch entspannt. Danach werden beide Stoffströme in einem Mischer zusammengeführt und danach im Kondensator wieder ver-

flüssigt. Der Kondensator wird, wie auch bei ORC-Anlagen, mittels eines Kühlkreislaufs gekühlt und dient der Kondensation des Arbeitsmediums. Durch die Kondensation entsteht wieder die Grundlösung, die mit der Pumpe auf Betriebsdruck gebracht wird. Die Restwärme im Mischer kann auch im LT-Rekuperator zur Vorwärmung für das Arbeitsmittel dienen. Ein Beispiel für einen Sekundärkreislauf der Kalina-Bauart ist in Abb. 5.3 dargestellt.

Wie bei ORC-Anlagen erfolgt eine Druckabsicherung des Systems durch z. B. Sicherheitsventile. Bei Ammoniak führenden Leitungen wird das Ammoniak in wassergefüllte Abblasebehälter geleitet. Über einen Sprühkopf wird das Ammoniak in den Tank gesprüht und vom Wasser anschließend absorbiert /MLC 02/.

Der Vorteil beim Einsatz von Ammoniak ist, dass dieses geruchsintensiv ist und schon bei kleinen Leckagen vom Personal detektiert werden kann. Ammoniak ist gut in Wasser löslich. Bei Leckagen in drucklosen Behältern können diese durch Vereisung erkannt werden /RAT 12/. Zusätzlich können in der Anlage Ammoniak-Detektoren eingesetzt werden, die eine Erkennung von Leckagen möglich machen. Als sicherheitstechnisch gerichtete Maßnahme kann bei einem hohen Ammoniak-Gehalt die automatische Abschaltung der Anlage erfolgen /MLC 02/.

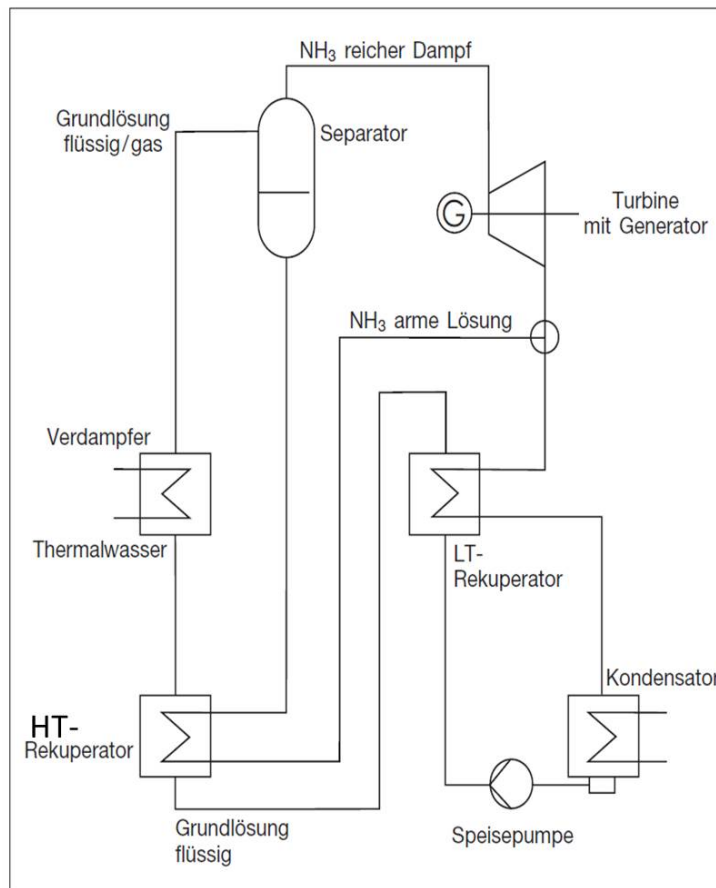


Abb. 5.3 Prinzipschaltbild eines Kalina-Kreislaufs /MÜN 05/

Das Arbeitsmedium wird über die Speisepumpe gefördert und passiert zur Vorwärmung zunächst den LT- und dann den HT-Rekuperator um im Verdampfer schließlich in ein Gemisch aus Flüssigkeit und Dampf verwandelt zu werden. Im Separator werden die Phasen getrennt. Der Dampf wird über die Turbine entspannt, die Flüssigkeit wird zur Vorwärmung im HT-Rekuperator genutzt. Nach Zusammenführung beider Zweige wird damit der LT-Rekuperator zur Vorwärmung genutzt und die Grundlösung im Kondensator kondensiert und anschließend der Speisepumpe wieder zugeführt.

5.1.3.2.3 Fernwärmeauskopplung

Geothermieranlagen können zur Fernwärmeauskopplung genutzt werden. Die Wärmeauskopplung kann parallel zur Stromerzeugung erfolgen oder ihr nachgelagert sein. Auch der Betrieb als reines Wärmekraftwerk ist realisierbar. Die Technik der Fernwärmeauskopplung unterscheidet sich nicht von anderen Fernwärmekraftwerken und wird im Folgenden nicht näher betrachtet.

5.1.3.3 Tertiärkreislauf

Als tertiärer Kreislauf schließt sich sowohl bei ORC- als auch Kalinaanlagen ein Kühlkreislauf an. Dieser ist in der Regel wassergefüllt und kühlt, wie oben beschrieben, den Kondensator (und ggf. andere Kraftwerkskomponenten). Als Wärmesenke können verschiedene Möglichkeiten wie Nasskühltürme, Luftkühlung oder Wärmeabgabe an Oberflächengewässer genutzt werden. Gegebenenfalls kann die im Kondensator abgeführte Wärme auch zur Vorwärmung eines Fernwärmenetzes genutzt werden.

5.1.3.4 Hilfssysteme

An die Komponenten des Primär- Sekundär- und Tertiärkreislaufes schließen ggf. Hilfssysteme wie elektrische Energieversorgung, Steuerungssysteme, Überwachungssysteme oder Schmiermittelsysteme an. Darüber hinaus gibt es z. B. Systeme wie Brandmeldeeinrichtungen, Brandbekämpfungssysteme oder Klimaanlage.

5.2 Kenngrößen einer Anlage

Kenngrößen der Anlagen umfassen Dinge wie den Flächenbedarf, die vorherrschenden Drücke, Temperaturen, Durchflussmengen, Brutto- und Nettostromerzeugung.

5.2.1 Flächenbedarf



Abb. 5.4 Geothermie Anlagen drei verschiedener Standorte

Linkes Bild: ORC-Anlage in Landau /GNT 10/. Rechts oben: HDR-Anlage in Soultz-sous-Forêts (Frankreich) /STO 11/. Rechts unten: Kalina Anlage in Unterhaching /WIK 10/

Das Institut für Energetik und Umwelt Leipzig gibt den Flächenbedarf der oberirdischen Anlage in einer Studie für das Umweltbundesamt mit $0,1 \text{ m}^2/\text{MWh}$ bis $0,4 \text{ m}^2/\text{MWh}$ an /IEU 07/. Hierbei wird nicht klar, auf welchen Zeitraum und auf welche Anlagenverfügbarkeit sich diese Angabe bezieht. Die angegebenen Quellen sind einerseits eine persönliche Kommunikation mit der Firma Siemens und andererseits /KAG 05/, die allerdings hierzu nach Kenntnis der GRS keine Angaben enthält. Unter der Annahme, dass von einer Anlagenverfügbarkeit von 7.500 Volllaststunden im Jahr ausgegangen wird und sich die obige Angabe auf ein Jahr bezieht, ergibt sich ein Flächenbedarf einer 10 MW-Anlage von 7.500 m^2 bis 30.000 m^2 . Erdwärme Bayern stellt in /EWB 14/ dar, dass ihre geplante 10MW-Anlage etwa $2 \text{ ha} = 20.000 \text{ m}^2$ Platzbedarf haben wird. Diese Angabe ist mit obigen Angaben unter den getroffenen Annahmen vergleichbar.

5.2.2 Druck in der Anlage, Durchfluss, Temperatur vor / hinter WT

Der Druck in der Anlage liegt primärseitig bei etwa 20 bar in den obertägigen Anlagenteilen. Direkt hinter der Förderpumpe (untertägig) weicht der Druck davon stark nach oben ab (abhängig von der Einbautiefe der Pumpe). Im Verlauf des Primärkreislaufes

sinkt der Druck durch den Strömungswiderstand der Rohrleitungen, Filter, Armaturen und Wärmetauscher. Der Durchfluss in den bestehenden Anlagen liegt im Bereich bis zu 150 Liter pro Sekunde und die Temperatur in der Förderbohrung bei bis zu 160°C. Diese Angaben sind stark anlagenabhängig, ebenso wie Angaben über Temperaturdifferenzen über die einzelnen Wärmetauscher. Generische Aussagen hierzu sind nicht möglich.

5.2.3 Elektrische Brutto- und Nettoleistung

Bei derzeit in Deutschland in Betrieb oder im Bau befindlichen Anlagen liegt die elektrische Bruttoleistung im Bereich bis zu 5 MW. Die Nettoleistung liegt wesentlich darunter, da vor allem die Förderpumpen bis zu 1,5 MW Leistungsaufnahme haben. Werden Reinjektionspumpen in der Anlage verwendet, so ergibt sich ein weiterer Verlust in der Nettoleistung. Bedeutende Verluste an der Nettoleistung ergeben sich zusätzlich noch aus den zur Kühlung des sekundärseitigen Kreislaufes nötigen Anlagenteilen (Luftkühlung, Wasserkühlung). Die benötigte elektrische Energie für Schaltanlagen und sonstige Verbraucher spielt eine eher untergeordnete Rolle.

5.3 Wesentliche Kraftwerkskomponenten

In den folgenden Abschnitten wird auf die wesentlichen Komponenten in Anlagen zur Stromerzeugung mittels tiefer Geothermie eingegangen. Einzelnen Anlagen können in ihrem Aufbau stark voneinander abweichen.

5.3.1 Förderpumpen

Im Folgenden werden die Förderpumpen im Thermalwasserkreislauf beschrieben. Derzeit werden zwei verschiedene Pumpentypen eingesetzt. Zum einen gibt es Gestängepumpen, auch LSP (Line Shaft Pump) genannt, und zum anderen sind Tauchpumpen im Einsatz, auch ESP (Electric Submersible Pump) genannt.

Bei der **Gestängepumpe (LSP)** befindet sich der Antriebsmotor über Tage. Dieser ist über eine Antriebswelle mit der sich im Bohrloch befindlichen Pumpeneinheit verbunden. Der Vorteil bei diesem Pumpentyp liegt darin, dass sich der Motor bei Umgebungstemperatur befindet. Zudem sind Wartungen oder auch mögliche Reparaturen an dem Pumpenmotor einfacher und kostengünstiger durchzuführen, da dieser leicht er-

reichbar ist. Nachteilig ist die lange Welle, die hohen mechanischen Belastungen ausgesetzt ist, was letztendlich zu einem Bruch der Welle führen kann.

Neben den Gestängepumpen werden auch **Tauchpumpen (ESP)** eingesetzt. Im Gegensatz zu den Gestängepumpen befindet sich bei der Tauchpumpe sowohl die Pumpeinheit als auch der elektrische Motor samt der Dichtungseinheit im Bohrloch. Über Kabel sind die Pumpen mit der oberirdischen Anlage verbunden /BAR 86/.

Durch den kompletten Einsatz im Bohrloch sind tiefere Einbauorte als bei Gestängepumpen möglich. Zudem besteht die Möglichkeit, Tauchpumpen auch bei abgelenkten Bohrlöchern einzusetzen, was bei Gestängepumpen aufgrund der langen Antriebswelle nicht realisiert werden kann.

Die Nachteile dieser Pumpenart liegen in den Betriebsbedingungen des Elektromotors. Im Bohrloch herrschen hohe Temperaturen, welche sich schädigend auf den Motor auswirken. Insbesondere die Isolierungen an den Wicklungen und an der Verkabelung sind hiervon betroffen. Nach der Arrhenius-Gleichung halbiert sich die Lebensdauer der Isolierung bei einem Anstieg der Betriebstemperatur des elektrischen Leiters um 10 K. Daher ist eine ausreichende Kühlung des Antriebsmotors wichtig. Eine Verbesserung der Lebensdauer von Isolierungen kann z. B. durch den Einsatz von Hochtemperaturrelastomeren erreicht werden /CAS 12/.

Im Allgemeinen sind beide Pumpenarten mehrstufig aufgebaut /BAR 86/. Die Schmierung der Pumpen kann z. B. durch das Thermalwasser selber oder durch vollentsalztes Brauchwasser (Deionat) erfolgen. Möglich sind auch andere Schmiermittel wie Öle etc. /KAT 03/

Ein Monitoring dient dem sicheren Betrieb der Pumpe und somit auch der Verfügbarkeit der Anlage. So wird zum einen die Temperatur in der Förderbohrung bzw. entlang der Pumpe überwacht. Dadurch können zum einen die Betriebsphasen der Anlage verfolgt werden. Zum anderen können so Änderungen im Betriebsverhalten der Pumpe detektiert werden. Dies kann zum einen dazu dienen, das Pumpenverhalten genauer zu überwachen. Zum anderen kann es Auskunft über möglichen Störungen der Pumpe liefern, so dass diese frühzeitig außer Betrieb genommen werden kann, um so weitere Schäden zu vermeiden. Die Temperatursensoren bestehen meist aus Glasfaserkabeln. Drucksensoren werden ebenfalls in den Bohrlöchern eingesetzt. Aufgrund der hohen

Temperaturen im Bohrloch müssen die Sensoren temperaturbeständig ausgelegt sein /EGG 11/, /GEI 12a/, /GUN 12/, /KAT 03/.

Ein Vorteil kann der Einsatz von Frequenzumrichtern im Bereich der Antriebsmotoren sein. Dadurch kann die Drehzahl der Pumpe variabel geregelt werden. Dies hat den Vorteil, dass die Anlage sicher angefahren werden kann, um das thermische Gleichgewicht aufrecht zu erhalten. Weitere Vorteile des Einsatzes von Frequenzumrichtern sind die Reduzierung des Eigenbedarfes und die Verringerung von mechanischer Abnutzung durch einen stabilen Betriebszustand der Pumpe /GUN 12/.

Bei der Auslegung der Pumpen muss auch beachtet werden, dass es aufgrund der hohen Temperaturen des Thermalwassers zur thermischen Expansion der Komponenten kommen kann. Das Motoröl und die weiteren eingesetzten Betriebsmittel expandieren ebenfalls aufgrund der Umgebungsbedingungen. Durch die Volumenänderungen bei den unterschiedlichen Temperaturen kommt es zu Schwankungen im Öldruck. Daher gibt es auch Expansionssysteme oder Ausgleichssysteme, welche die Volumenschwankungen der Betriebsmittel ausgleichen können /CAS 12/, /KAL 97/.

In der geothermischen Anlage Soultz sind mehrere Förderbohrungen niedergebracht worden. In den unterschiedlichen Bohrlöchern sind sowohl eine LSP als auch eine ESP zu Testzwecken verbaut worden. Dies ermöglicht den Vergleich der beiden Pumpentypen /BMU 12/, /KAT 03/.

5.3.2 Separatoren

In bestimmten Betriebszuständen, wie einer Wartung des Generators oder Reinigung der Wärmetauscher, steht die übliche Wärmesenke der geothermalen Anlage nicht zur Verfügung. Da gewisse Betriebsparameter auch über einen solchen Zeitraum hinweg konstant gehalten werden müssen, um z. B. thermische Schocks von Bauteilen durch wiederholtes Abkühlen und Aufheizen oder unerwünschte Schrumpfung und Ausdehnung von Dichtungen und Wandungen zu vermeiden, wird das Thermalwasser kontinuierlich gefördert. Als Ersatzwärmesenke dienen Vorhaltebecken, in denen das Thermalwasser auf die übliche Reinjektionstemperatur herabgekühlt wird. Vor der Einleitung in solche Becken wird es in einem Separator unter sichtbarer Dampfentwicklung entspannt. Dabei entweichen gelöste Gase (wie CO₂, CH₄, N₂, H₂S und auch mit dem Wasser gefördertes Radon) zusammen mit Wasserdampf in die Atmosphäre.

Infolge der Entspannung und Verdampfung kommt es im Bereich der Separatoren zu einer vermehrten Bildung von mineralischen Inkrustationen (Scale).

5.3.3 Filtereinheiten

Filter im Thermalwasserkreislauf dienen der Entfernung von Partikeln aus dem Thermalwasserstrom. In Geothermieanlagen sind üblicherweise zwei Filterstrecken im Einsatz. Der Grobfilter wird nach der Förderpumpe durchlaufen, der Feinfilter vor der Reinjektionspumpe (sofern eine eingesetzt wird). Die Filterstrecken sind üblicherweise redundant aufgebaut, so dass bei einem Filterwechsel die Anlage nicht abgefahren werden muss.

Die eingesetzten Filtertechnologien reichen von einfachen Metallmaschengittern über Filzfilter bis hin zu Sandbettfiltern. Die verwendeten Maschenweiten variieren stark von Anlage zu Anlage. Zur Optimierung werden häufig verschiedenste Filterarten und Maschenweiten getestet. Die Anlage in Neustadt-Glewe beispielsweise setzt Filzfilter ein. Der Grobfilter hat hierbei einen Maschenweite von 10 µm und der Feinfilter eine Maschenweite von 1 µm /DEG 09/. Die Anlage in Soultz setzt Filter mit Maschenweiten von 150 µm (Grobfilter) bzw. 50 µm (Feinfilter) ein /SOU 10/.

Die Reinigungen der Filter erfolgen üblicherweise dann, wenn der Differenzdruck über den Filter einen festgelegten Schwellenwert überschreitet

5.3.4 Wärmeübertrager

Die Wärmeübertrager können als Platten- oder als Rohrbündelwärmeübertrager ausgeführt sein. Plattenwärmeübertrager zeichnen sich durch einen hohen Wärmeübergangskoeffizienten und einen geringen Platzbedarf aus. Rohrbündelwärmeübertrager können hingegen bei hohen Drücken eingesetzt werden /BMU 11/. Aufgrund der korrosiven Eigenschaften des Thermalwassers und/oder des Arbeitsmittels Ammoniak bei Kalinaanlagen auf der Sekundärseite sind die Wärmeübertrager häufig aus Titan hergestellt /GTV 12/.

Rohrbündelwärmeübertrager bestehen aus einem Zylinder, in dem sich mehrere Rohre befinden. Dabei fließt das eine Medium innerhalb der Rohre, das andere Medium ver-

läuft außerhalb der Rohre im Zylinder. Die inneren Rohre können dabei entweder als U-Rohre oder auch als parallele durchgängige Rohre angeordnet sein /API 09a/.

Die Plattenwärmeübertrager bestehen aus einer Reihe von Platten. Auf den Platten sind Kanäle angeordnet, so dass sich auf den gegenüberliegenden Seiten der Platten immer das jeweils andere Medium befindet.

Ein Vorteil der Plattenwärmeübertrager ist, dass diese bei Bedarf einfach erweitert werden können, in dem mehr Platten installiert werden. Plattenwärmeübertrager haben im Gegensatz zu Rohrbündelwärmeübertragern einen höheren Wärmeübertragungskoeffizienten (etwa einen Faktor 3). Dies führt dazu, dass Plattenwärmeübertrager in der Regel kleiner und leichter sind, da eine geringere Fläche zur Wärmeübertragung benötigt wird. Ein Nachteil ist, dass über den Plattenwärmeübertrager ein höherer Druckverlust besteht. Zudem ist der maximal erreichbare Druck begrenzt. Rohrbündelwärmeübertrager können auch noch bei höheren Drücken betrieben werden /API 09a/, /BMU 11/.

5.3.5 Turbine und Generator

Turbinen und Generatoren in Anlagen zur geothermischen Energieerzeugung unterscheiden sich nicht wesentlich von ansonsten gebräuchlichen Turbinen und Generatoren. Die Turbinen müssen mittels geeigneter Werkstoffwahl an ihr Einsatzgebiet angepasst werden. Dies ist insbesondere bei Kalina-Anlagen erforderlich. Erhöhte Anforderungen an Generatoren ergeben sich nicht.

5.3.6 Kühlanlagen

Als Wärmesenke können verschiedene Möglichkeiten wie Nasskühltürme, Luftkühlung oder Wärmeabgabe an Oberflächengewässer genutzt werden. Gegebenenfalls kann die im Kondensator abgeführte Wärme auch zur Vorwärmung eines Fernwärmenetzes genutzt werden. Einzelne Räume der Anlagen sind ggf. an Klimaanlage angeschlossen, um gleichbleibende Bedingungen zu schaffen.

5.3.7 Reinjektionspumpen

Die Reinjektionspumpen verbringen das abgekühlte Thermalwasser wieder in die tiefen Gesteinsschichten, aus denen es gefördert wurde. Dazu wird das Wasser in die Injektionsbohrung gepumpt. Reinjektionspumpen sind nicht in allen Anlagen erforderlich. Dies hängt von den Eigenschaften des Injektionshorizontes ab /BMU 11/. Das durch Wärmeentzug abgekühlte, gegenüber dem Thermalwasser des Injektionshorizontes dichtere und damit schwerer Wasser kann gravitativ versenkt werden.

Für die Injektion können herkömmliche Pumpenkonstruktionen verwendet werden, da diese über Tage stehen können. Es gibt im Vergleich zu den Förderpumpen keine speziellen Anforderungen an Pumpenkühlung, Pumpengestänge oder Pumpenelektrik. Anforderungen hinsichtlich Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit bleiben erhalten.

5.3.8 Druckhaltung

Mit einer Druckhaltung wird vermieden, dass gelöste Gase ausperlen und ebenso dass es zu Ausfällungen kommt. Die Druckhaltung wird meist mit einem Inertgas, z. B. Stickstoff, durchgeführt. Zudem wird durch eine Druckhaltung das Eindringen von Sauerstoff und somit Oxidationsreaktionen vermieden /KAT 03/. Die Drücke in den Thermalwasserkreisläufen liegen in der Regel um die 20 bar /EGG 11/, /GFZ 99/, /KAL 97/.

5.4 Betriebsmittel

Betriebsmittel umfassen alle zum Betrieb der Anlage benötigten Mittel wie Schmieröle, Kältemittel, Inhibitoren und anderes. In den folgenden Kapiteln wird auf die in der Anlage verwendeten Betriebsmittel eingegangen.

5.4.1 Sekundärseitiges Betriebsmittel

Bei ORC-Anlagen sekundärseitig verwendete Betriebsmittel (Arbeitsmedien) sind u. a. Isopentan (Landau), n-Perfluorpentane (Neustadt-Glewe), Penta-Fluor-Propan (Sauerlach), 1,1,1,2-Tetrafluorethan (R134a) (Simbach-Braunau) /BAU 11/, /BRA 12/, /HIE 05/.

Das Gefährdungspotenzial ist abhängig vom verwendeten Arbeitsmedium und von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich. So ist Iso-Pentan beispielsweise hochentzündlich und umweltgefährlich /GES 13/. Im Gegensatz dazu gibt es bei dem Kältemittel R134a keine R-Sätze oder besondere Gefahrenstoffkennzeichnungen /DUP 07/. Während R134a in der Vergangenheit ein weit verbreitetes Kältemittel von KFZ-Klimaanlagen war, darf es seit 2011 aufgrund einer EU-Richtlinie wegen seines großen Treibhauspotenzials nicht mehr in Neuwagen verwendet werden.

Bei Kalina-Anlagen wird als Arbeitsmittel ein Ammoniak-Wasser-Gemisch genutzt. Ammoniak ist schwer entzündlich, giftig sowie umweltgefährlich /GES 13/, gleichzeitig ein in Kältemaschinen (u.a. Eissportanlagen) weit verbreitetes Arbeitsmittel.

5.4.2 Inhibitoren

Inhibitoren sind Zusatzstoffe, die in das Thermalwasser gegeben werden, um die Bildung von Scale und Ausfällungen zu reduzieren oder zu verhindern. Der Inhibitor wird an die jeweiligen physikalischen und chemischen Eigenschaften des Thermalwassers angepasst und ist daher für jede Anlage individuell zu bestimmen. Mögliche Inhibitoren sind Phosphonate, Polyphosphate oder Polycarboxylate /KAL 97/. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung eines Derivats der Phosphonsäure /BAU 11/.

Die Wirkungsweise der Inhibitoren beruht häufig auf einer Komplexierung der Scale-bildenden Kationen, was die Löslichkeit der Scale-Minerale erhöht. Inhibierend wirkt auch die Störung der Kristallgitterstrukturen, was zu einer Retardation des Kristallwachstums führt /SEI 11/, /SCH 12/.

Derzeit wird in verschiedenen Anlagen Forschung an Inhibitoren betrieben /EGG 11/, /GFZ 99/, wobei auch die Wechselwirkungen des Inhibitors mit dem Material der Anlagenkomponenten und insbesondere das Verhalten und die Auswirkung des Inhibitors im Reinjektionshorizont zu bewerten sind.

5.4.3 Weitere Betriebsmittel

Informationen über in deutschen Anlagen eingesetzte Betriebsmittel liegen nur in sehr begrenztem Umfang vor. Allgemein kann festgehalten werden, dass eine Vielzahl von

Erdölerzeugnissen zur Schmierung, Dichtung und Kühlung eingesetzt werden /BAU 11/. Die wichtigsten Anwendungsgebiete sind hierbei:

1. Schmierung der Pumpen allgemein,
2. Schmierung von Turbine und Generator,
3. Transformatorenöl,
4. Motorkühlung sowie
5. Dichtung der Turbine.

Als ein Beispiel kann das Ölsystem des Turbinen- und Generatorlagers der ORC-Anlage Landau genannt werden /BAU 11/. Das Gesamtvolumen beträgt ca. 240 Liter und besteht zur Hälfte aus 68 ISO Grade Öl für den Behälter des Lagerschmierölsystems und zur Hälfte aus Turbinenöl (32 R&O Öl) für den Schmierölbehälter der Gleitringdichtung.

Für die Schmierung von Pumpen können anstatt von Erdölerzeugnissen auch Bioschmierstoffe verwendet werden. Für die Dichtung und Schmierung im Bereich der Turbine und des Generators werden zum Teil auch gasförmige Stoffe, wie beispielsweise Stickstoff eingesetzt /MLC 02/.

Ein weiteres Betriebsmittel ist Frostschutzmittel, welches im Bereich der Förderpumpe oder auch als Schutz gegen Vereisung des Kühlturms verwendet wird. Im Bereich des Kühlturmes ist eine Zugabe von Bioziden zum Kühlwasser zur Abtötung vorhandener Keime oder Bakterien, beispielsweise Chlordioxid, sowie Korrosionsschutz möglich. Eine Zugabe von Schwefelsäure ist bei einem hohen Kalkgehalt im Kühlwasser üblich, um eine Verkalkung in den Rohrleitungen und im Wärmetauscher zu vermeiden /BAU 11/. Des Weiteren kommen für Klimaanlageanlagen innerhalb der Anlage verschiedene Kältemittel zum Einsatz.

5.5 Betriebserfahrungen

In den folgenden Kapiteln wird auf relevante Betriebserfahrung in den Anlagen eingegangen. Da dieser Bericht sich auf öffentlich zugängliche Unterlagen stützt ist die Betriebserfahrung nur vereinzelt zu recherchieren und nicht vollständig. Daher kann nur ein unvollständiges generisches Bild entworfen werden.

5.5.1 Korrosion und Abrasion

In den folgenden Kapiteln wird auf die Korrosions- und Abrasionsproblematik näher eingegangen. Während Korrosion fast in der gesamten Anlage ein Problem darstellen kann stellt Abrasion ausschließlich im Thermalwasserkreislauf ein Problem dar.

5.5.1.1 Korrosion und Abrasion im Thermalwasserkreislauf

Das Thermalwasser hat je nach geothermischem Reservoir unterschiedliche chemische Zusammensetzungen. Meist hat das Wasser korrosive Eigenschaften und ist oft hoch salinar. Infolge der Druck- und Temperaturveränderungen durch die energetische Nutzung des Thermalwassers können sich je nach Zusammensetzung des Thermalwassers verschiedenste Ablagerungen/Scale bilden, die sowohl die Korrosion fördern als auch abrasiv wirken können, wenn sie im Thermalwasserkreislauf befördert werden.

Daraus ergeben sich bei der Auswahl der Werkstoffe im Thermalwasserkreis hohe Anforderungen. Für geothermische Anlagen mit hochsalinaren Wärmeträgern (beispielsweise im Norddeutschen Becken) wird seitens des Bundesamtes für Materialforschung (BAM) die Verwendung von niedrig legierten oder rostfreien und säurebeständigen Stählen nicht empfohlen. Nickel- und Titan-Legierungen sind hingegen für diese Anwendungsbereiche gemäß BAM geeignet, führen aber zu deutlich höheren Kosten /ISE 12/. Neben dem Salzgehalt können weitere Wasserinhaltsstoffe wie Schwefelwasserstoffe (Molassebecken) oder ein hoher Chloridgehalt (Norddeutsches Becken und Oberrheingraben) zu Problemen im Betrieb führen. Die fluid- und standortspezifischen Faktoren sind bei der Werkstoffauswahl zu beachten. Hierbei wird meist zwischen der Beeinträchtigung des Betriebes und den hohen Anschaffungskosten abgewogen. Sogenannte Standardlösungen sind in Deutschland nicht vorhanden. In Groß-Schönebeck, aber auch weiteren Anlagen wie Soultz-sous-Forêts und Bruchsal erfolgen direkt in der Geothermieanlage in entsprechenden Bypässen Untersuchungen unter realen Betriebsbedingungen mit wechselndem Voll- und Teillastbetrieb. Dabei werden Bauteile und definierte Materialproben auf ihre Korrosionsbeständigkeit getestet sowie verschiedene Verfahren des Korrosionsschutzes erprobt. Die Untersuchungen umfassen u. a. einfache, sowie hochfeste C-Stähle, Nickelbasis- und Titanlegierungen sowie weitere Stähle /MIL 12/.

Darüber hinaus gibt es verschiedene Möglichkeiten, um im Thermalwassersystem die Bildung von Korrosion oder das Auftreten von Abrasion zu vermeiden oder die Auswirkungen zumindest zu vermindern. Besondere Bedeutung kommt dem oben erwähnte Einsatz einer Druckhaltung dar, die für konstante thermodynamische Bedingungen im System sorgt. Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Inhibitoren im Thermalwasser dar.

Derzeitige Forschung:

Im Bereich Korrosions- und Abrasionsschutz wurden und werden zahlreiche Forschungsprojekte in Deutschland durchgeführt. Dazu gehören /BMU 12/ z. B.:

- Forschungsvorhaben zu einer Nanodiamant-Schutzschicht, bei der zudem eine spezifische Online-Sensorik die Bildung von Korrosion und Scales überwachen soll.
- Zudem werden in einem anderen Vorhaben die Einflussfaktoren auf das Scaling erforscht und dabei der Einsatz von Inhibitoren und technischen Maßnahmen zur Verhinderung von Scaling betrachtet.
- Im Rahmen eines anderen Forschungsvorhabens werden in einer Teststrecke verschiedene Materialien/Werkstoffe auf ihre Korrosionsbeständigkeit untersucht. Im Ergebnis soll ein fluidspezifischer Materialeinsatzkatalog Empfehlungen für eine zuverlässige wartungsarme Anlagenkomponente geben.
- Ein weiteres Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit mikrobiologisch induzierter Korrosion. Das Prozessverständnis soll in diesem Zusammenhang soweit verbessert werden, dass Handlungsempfehlungen zur Vermeidung bzw. Verminderung von mikrobiell verursachten Betriebsstörungen entwickelt werden können.

5.5.1.1.1 Korrosion und Abrasion im Bereich der Förderpumpen

Ein allgemeines Problem beim Einsatz der Förderpumpen ist, dass es durch die Eigenschaften des Thermalwassers zur Korrosion und/oder Abrasion kommen kann. Da die Thermalwässer teilweise hochsalinar sind, haben sie eine korrosive Wirkung und es kann zudem zur Scale-Bildung kommen. Bei Scalebildung können diese Partikel in den Bereich der Pumpe eingetragen werden und dort abrasiv wirken. Durch diesen Mechanismus können wesentliche Bauteile der Pumpe, wie z. B. das Laufrad, beschädigt

werden. Weitere anfällige Bestandteile sind Lager sowie Dichtungen der Pumpen /KAT 03/. Eine unzureichende Schmierung der Lager kann ebenfalls zur Abrasion und auch zu Vibrationen führen, die die Funktion der Lager einschränken /CAS 12/. Um dem entgegenzuwirken, ist die Auswahl der Werkstoffe im Bereich der Pumpe besonders wichtig.

Im Bereich der Lager wurde zunächst Bronze als Lagermaterial getestet /KAT 03/. In einigen Anlagen wurde auch wieder Abstand von Bronzelagern genommen, da es zu Schäden an den Bronzelagern kam und Lager aus Wolframcarbid eingesetzt /CAS 12/, /GEI 12a/. Wolframcarbid zeichnet sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit und einen sehr hohen Härtegrad aus /GFZ 99/, /LOB 12/. Eine weitere Möglichkeit, das Lagermetall widerstandsfähiger zu machen, ist der Einsatz einer Borbeschichtung /KAT 03/, die den Vorteil hat, dass ein hoher Härtegrad erreicht werden kann, wobei eine gute Resistenz gegen Abrasion erzielt wird. Zudem ist die Borbeschichtung auch bei hohen Temperaturen noch stabil /BOR 12/.

Entwicklungsbedarf:

Im Allgemeinen müssen die Komponenten temperaturbeständig ausgelegt werden. Dies gilt hauptsächlich für die eingesetzte Steuerungs- und Leistungselektronik, da diese stark auf Temperaturänderungen reagiert wie z. B. die Kabelisolierung.

Weiteren Optimierungsbedarf gibt es auch für die eingesetzten Werkstoffe im Bereich der Pumpe, wie z. B. Dichtungen. Die Werkstoffe spielen aufgrund der Umgebungsbedingungen bei der Auslegung der Pumpe eine entscheidende Rolle. Die eingesetzten Werkstoffe müssen korrosionsbeständig sein und resistent gegen den Eintrag von Ablagerungen bzw. Scalings.

Derzeitige Forschung:

Die Förderpumpe der Anlage ist essentiell für die Verfügbarkeit der Anlage. Daher gibt es derzeit eine Reihe von Forschungsprogrammen, die sich mit der Entwicklung optimierter Förderpumpen beschäftigen. Im Einzelnen wird Forschung zu den eingesetzten Materialien und Werkstoffen, den elektrischen Komponenten wie Frequenzumrichtern, Motorisolationen oder Kabeln sowie den Untertage-Sensoren betrieben. Dabei wird neben der Korrosionsbeständigkeit auch ein besonderes Augenmerk auf die Temperaturbeständigkeit gelegt. Dies soll der Zuverlässigkeit und der Effizienzsteigerung dieser

Komponente dienen und somit die Verfügbarkeit der Anlage gesteigert werden /BMU 12/.

5.5.1.1.2 Korrosion und Abrasion im Bereich der Wärmeübertrager

Aufgrund der Zusammensetzung des Thermalwassers und aufgrund von Ausfällungen oder Scaling können sich Partikel im Medium befinden, welche sich nachteilig auf die Funktionsfähigkeit des Wärmeübertragers auswirken können. Zum einen können die Partikel abrasiv wirken. Zum anderen können sich die Partikel in den Wärmeübertragern festsetzen und die Wärmeübertragung mindern und somit auch den Wirkungsgrad der geothermischen Anlage verringern /API 09a/, HIE 05/. Dies gilt im Besonderen für Plattenwärmeübertrager, da diese nur eine geringe Spaltbreite aufweisen und zudem der Druckverlust über den Wärmetauscher und damit die Neigung zur Scale-Bildung größer ist.

Auf der Thermalwasserseite bietet sich in der Regel Titan als geeigneter Werkstoff an, da Titan ein korrosionsbeständiger Werkstoff ist. Im Bereich der Arbeitsmittel können bei ORC-Anlagen Edelstähle eingesetzt werden /API 09a/. Bei Kalina-Anlagen kommen sekundärseitig Anforderungen durch die Verwendung von Ammoniak hinzu, so dass hier hoch legierte Stähle oder Titan verwendet werden müssen /GTV 12/.

Aufgrund von Scaling, Korrosion oder sonstigen Ablagerungen sollten die Wärmeübertrager regelmäßig gereinigt werden. Dabei kann zwischen einer mechanischen und einer chemischen Reinigung unterschieden werden. Die Art der Reinigung hängt von der Art des Wärmeübertragers und auch von der Zusammensetzung der Medien und damit auch der Zusammensetzung der Ablagerungen ab. In der Geothermieanlage Unterhaching werden z. B. die Wärmeübertrager mehrfach pro Jahr mit Säure behandelt /EGG 10/. Die Reinigung der Plattenwärmeübertrager ist einfach, da diese auseinandergebaut und die Platten einzeln gesäubert werden können /GTV 12/. Die semi-geschweißten Plattenwärmeübertrager können nur teilweise auseinandergebaut und gereinigt werden. Daher bietet sich für den geschweißten Bereich eine chemische Reinigung an. Die Rohrbündelwärmeübertrager können in der Regel von beiden Seiten geöffnet werden, so dass eine mechanische Reinigung des Zylinders und der einzelnen Rohre leicht möglich ist. Die Reinigung der Geradrohrwärmeübertrager ist im Vergleich mit den U-Rohr-Wärmeübertragern durch die Geometrie einfacher.

In deutschen Geothermiekraftwerken werden sowohl Platten- wie auch Rohrbündelwärmetauscher eingesetzt /API 09a/, /BRA 12/, /GEI 12b/.

5.5.1.2 Korrosion und mechanische Belastung im Sekundärkreislauf

Abhängig vom verwendeten Arbeitsmittel kann Korrosion auch ein Problem im Sekundärkreislauf sein.

Hier ist vor allem das Wasser-Ammoniak-Gemisch in Kalina-Kreisläufen zu erwähnen, das aufgrund der chemischen Eigenschaften des Ammoniaks auf die Baugruppen der Kalina-Anlagen korrodierend wirkt. Dies hat zur Folge, dass alle Bauteile der Kalina-Anlagen aus hoch legierten Stählen oder Materialien wie Titan bestehen müssen. Insbesondere müssen selbst Bauteile, die nicht mit dem Arbeitsmedium direkt in Kontakt stehen, auch aus hochveredelten Materialien hergestellt werden (Spannungsreihe) /GTV 12/.

Ein weiterer zu beachtender Aspekt ist die Notwendigkeit, Apparate zur Trennung bzw. Mischung der Medien in den Kreisprozess zu integrieren, was zu einer erheblichen Steigerung der Komplexität und zur Störung der thermodynamischen Stabilität beiträgt. Durch die Komplexität des Kreisprozesses ist es nicht zu verhindern, dass in breiten Lastbereichen Nassdampf mit hohem Wasseranteil durch die Turbine geführt wird, was zu hohem hydromechanischen Verschleiß an dem Turbinenlaufrad führen kann. Hier können nur Materialien mit hoher Verschleißfestigkeit gegen mechanische und chemische Angriffe genutzt werden wie bspw. Titan oder höchst legierte Edelstähle /GTV 12/.

Korrosion und mechanische Belastungen stellen bei ORC-Anlagen in der Regel kein Problem dar /GTV 12/.

5.5.1.3 Korrosion im Tertiärkreislauf

Abhängig von der Art der Kühlung des Kondensators (und ggf. anderer Komponenten des Kraftwerks) ergeben sich auch Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit dieser Anlagenteile. Diese weichen nicht wesentlich von den Anforderungen an konventionelle Kraftwerke ab. Betriebserfahrungen hierzu liegen bezogen auf geothermische

Kraftwerke nicht vor. Die Zugabe von Bioziden und Mitteln zum Korrosionsschutz im Bereich des Kühlturmes /BAU 11/ sprechen für dort auftretende Probleme.

5.5.2 Mechanische Belastungen

Die bisherigen Betriebserfahrungen zeigen, dass es im Bereich der Welle bei den LSP häufig zu Problemen kam. Zum einen kann sich die Welle durch eine schlechte Schmierung verkanten und brechen /KAT 03/. Dies kann beim kompletten Verlust der Schmierung, aber auch schon durch eine schlechte Qualität des Schmiermittels geschehen.

Die Fahrweise der Pumpe kann sich negativ auf ihre Lebensdauer auswirken. Aufgrund einer hohen Rotationsgeschwindigkeit der Pumpe können möglicherweise Vibrationen entstehen, die zu Schäden an den einzelnen Komponenten führen können. Um diesem Phänomen entgegen zu wirken, kann die Stufenzahl der Pumpe erhöht werden, um die Rotationsgeschwindigkeit und damit auch die Vibrationen zu reduzieren /BMU 12/, /KAT 03/.

5.5.3 Thermische und sonstige Belastungen

Thermische Belastungen spielen im Wesentlichen an zwei Stellen im Thermalwasserkreislauf eine große Rolle: Einerseits bei den ESP und andererseits bei den Dichtungen in den Plattenwärmetauschern.

Die thermischen Belastungen der Elektrik und Elektronik bei den ESP treten auf, da diese durch den Einbau im Bohrloch nicht gut gekühlt werden können. Hierbei sind insbesondere Kabelisolierungen stark anfällig /CAS 12/. Bei LSP treten diese Probleme nicht auf.

Aus der Betriebserfahrung heraus hat sich gezeigt, dass die Dichtungen einen weiteren Schwachpunkt bei der Nutzung von Plattenwärmeübertragern darstellen. Bei einem Verlust der Dichtfähigkeit kann es zu Leckagen von Thermalwasser oder den Arbeitsmitteln in die Anlage kommen. Die Auswahl der passenden Dichtungen muss an die Temperaturverhältnisse und Zusammensetzungen der einzelnen Medien auch insbesondere des Thermalwassers angepasst werden. Bei der Auslegung des Wärmeübertragers muss auch beachtet werden, dass bei Stillständen oder sonstigen Änderungen

im Temperatur- und Druckverlauf in der Anlage es zu Veränderungen im Medium, wie z. B. zu Entmischungen, kommen kann. Es können sich z. B. auf der Thermalwasserseite Ölablagerungen bilden, welche die Dichtungen angreifen.

Eine Lösung für die Dichtungsproblematik könnten semigeschweißte Wärmeübertrager sein /API 09a/, HIE 05/, da diese über weniger Dichtflächen verfügen.

5.5.4 Verringerung des Wirkungsgrades der Wärmetauscher

Durch Bildung von Scale in den Wärmetauschern verschlechtert sich der Wärmeübergang zwischen Thermalwasser und Arbeitsmedium, so dass es zu allmählichen Wirkungsgradverlusten kommt. Regelmäßige Wartung und Reinigung der Wärmetauscher ist daher erforderlich. Maßnahmen zur Verhinderung oder Verringerung der Scalebildung (beispielsweise der Einsatz von Inhibitoren) werden ergriffen und sind uneingeschränkt hilfreich.

5.5.5 Sonstige Fehlerursachen

Ein weiterer Fehlermechanismus betrifft den Bereich der Elektronik. So kam es schon zu Pumpenausfällen aufgrund von Kurzschlüssen. Weitere Probleme gab es bei Ausfällen der Bohrlochensoren /GEI 12a/. Grundsätzlich sind auch Ausfälle von sonstigen elektrischen Komponenten zu betrachten.

5.5.6 Scaling

Kritische Anlagenteile in Bohrungen oder Leitungen wie Untertagesicherheitsventile, Stützen für Druckaufnehmer usw. können durch die Ablagerung von anorganischen und organischen Scale in ihrer Funktionalität erheblich beeinträchtigt werden. Es wird daher intensiv an Verfahren geforscht, die diese Belagsbildung vermindern können. Neben dem Einsatz von Scale- Inhibitoren zählen dazu auch die Verfahren zur Beschichtung oder Modifizierung der Werkstoffoberflächen. Aus Untersuchungen ist bekannt, dass der Einsatz mikrostrukturierter Oberflächen maßgeblich die Reibungs-, Strömungs- und Anhaftungseigenschaften beeinflusst (Lotus-Effekt).

5.5.6.1 Prozesse, die zur Scale-Bildung führen

Das Auftreten mineralischer schwer bis unlöslicher Ablagerungen wird durch Veränderungen physikalischer (Temperatur, Druck) wie auch chemischer Parameter (Elementzusammensetzung, Aziditäts- und Redox-Gleichgewichten (Schlüsselparameter ph und Eh) kontrolliert. Das Überschreiten des Löslichkeitsproduktes der Scale Verbindungen in den hochsalinaren Thermalwässern ist für deren Bildung ein wesentlicher Faktor. Zusätzlich wirken Materialeigenschaften der eingesetzten Bauteile einflussnehmend auf die Art der Ablagerungen.

Ablagerungen wie Kalzium- oder Eisenkarbonate sowie Eisensulfide oder Oxide können unter Einsatz von Säuren rückgelöst werden. Sulfatische Scale sind überwiegend schwer löslich können aber in säurelösliche Formen überführt werden.

Die zu betrachtenden Ablagerungen an den Wänden der durchströmen Betriebsmittel unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher hydrogeologischer und geochemischer Bedingungen in der jeweiligen Lagerstätte oder generell der Zusammensetzung des Stoffstromes.

Die Abkühlung der Thermalwässer führt zur Überschreitung des Löslichkeitsproduktes und zur Ausfällung. Druckentlastung führt zur Entgasung und damit zur Veränderung des CO₂-Gleichgewichtes, was eine Fällung, insbesondere karbonatischer Scale, zur Folge haben kann.

Der Transport der Thermalwässer in der Anlage kann ebenfalls zu Scalebildungen führen, z.B. in Rohrknieen, wo infolge der Scherung der Flüssigkeit Ausfällungen auftreten. Zudem können Materialwechsel elektrochemische Prozesse induzieren, die ebenfalls zu Ablagerungen führen, z. B. elementares Blei. Des Weiteren können auch mikrobielle Aktivitäten lokal Eh- und pH-Veränderungen und zu Ausfällungen führen.

Die negativen Begleiterscheinungen derartiger Inkrustierungen sind das Zusetzen und damit die Querschnittsverringering der durchströmen Betriebsmittel sowie (insbesondere wirksam im Wärmetauscher) die Verminderung des Wärmeübertrages an das Arbeitsmittel. Diesem Umstand wird vielfach durch Zugabe entsprechender Stein- schutzmittel (Inhibitoren) begegnet. Damit einhergehen kann eine verzögerte oder verlagerte Ausfällung der Rückstände.

5.5.6.2 Prognostizierbarkeit der Scale-Bildung

Die Scalebildung in Anlagen der Tiefengeothermie wird, wie im vorhergehenden Kapitel gezeigt, von Prozessen kontrolliert, die an die spezifischen Bedingungen der Anlage geknüpft sind. Einige dieser Prozesse lassen sich mittels der geochemischen Gleichgewichtsmodellierung beschreiben. Solche Modellierungen eröffnen Einsichten in die zu erwartenden Scales, soweit die verwendete Datenbasis dafür geeignet ist. Weitere Ausführungen zu diesem Thema finden sich in den Kapiteln 4.3.3, 4.3.5, 4.5.2.

5.5.6.3 Natürliche Radioaktivität in Ablagerungen

Einige Thermalsolen der deutschen Geothermalprovinzen sind neben einer hohen Gesamtmineralisation und hohen Gehalten gelöster Gase durch eine erhöhte Aktivitätskonzentration natürlicher Radionuklide charakterisiert. Infolge genannter Druck- und Temperaturänderungen im Verlauf der Förderung und energetischen Nutzung kommt es zur Fällung von Mineralien und teils beträchtlichen Anreicherungen natürlicher Radionuklide in den Scale. Solche als NORM (Naturally Occuring Radioactive Materials) bezeichnete Rückstände, die sich in einer ganzen Reihe von Industrien finden lassen, können unerwartet hohe Konzentrationen von Radionukliden aufweisen. Kennzeichnend für NORM ist, dass diese Stoffe im Sinne des Strahlenschutzes im Regelwerk Beachtung finden.

Die Gemeinsamkeit aller Typen von Scale in Anlagen der Tiefengeothermie besteht in der Abwesenheit der Ausgangsnuklide der Uran-Radium-Reihe (U-238, U-234, Th-230) und der Thorium-Reihe (Th-232). Bei Sulfat-, Carbonat-, Fluorid- und Silikat-Scales werden primär die Isotope Ra-226 und Ra-228 angereichert, die sich chemisch analog der Erdalkalien Barium oder Strontium verhalten (diadocher Einbau in das Baryt-Gitter), während bei den Blei-Scales das Pb-210 als Substitut mit identischen chemischen Eigenschaften dominiert.

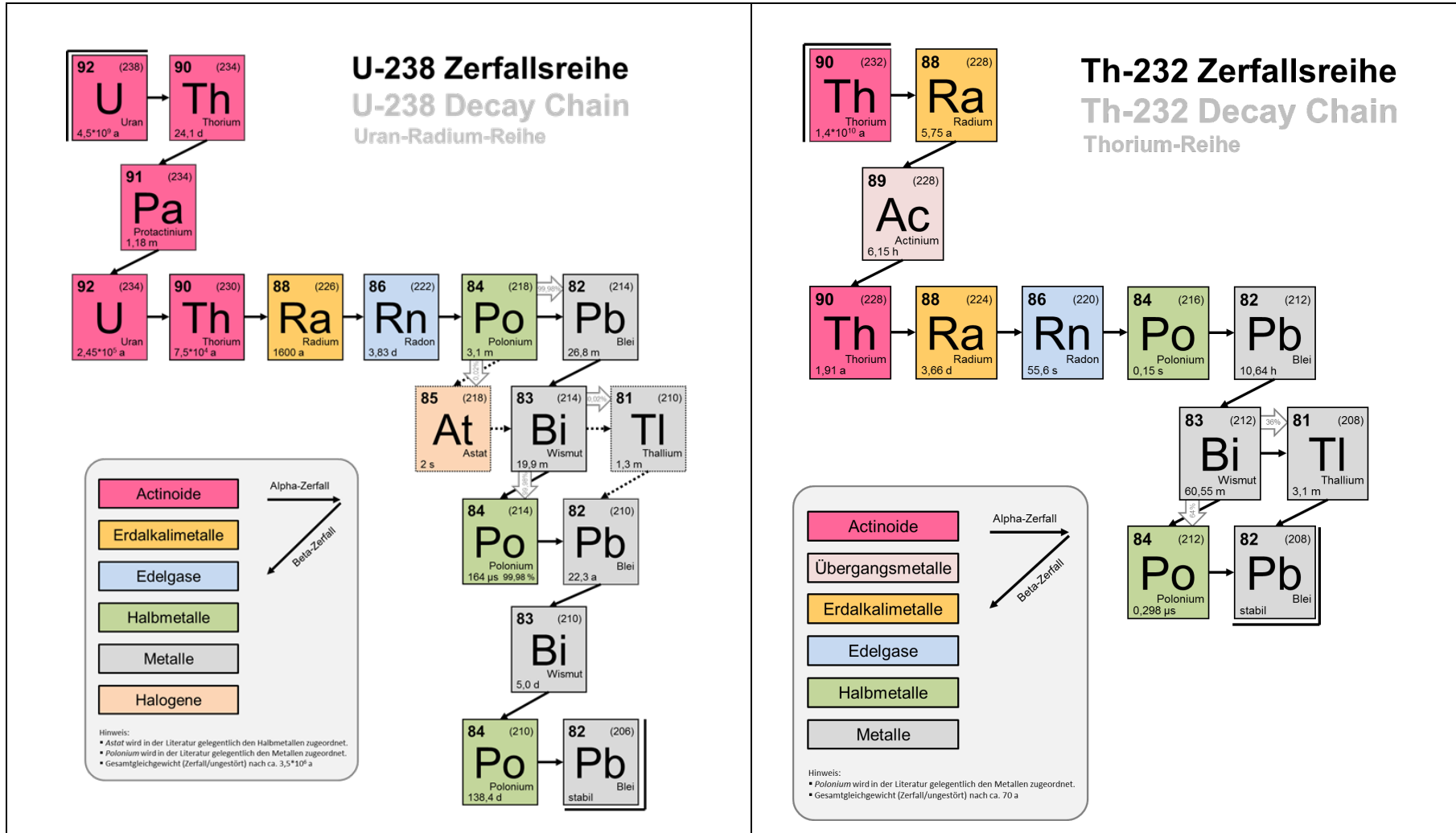


Abb. 5.5 Natürliche Zerfallsreihen U-238 und Th-232

In der Natur existieren die drei primordialen Zerfallsreihen des Uran-238, des Uran-235 und des Thorium-232. Von einem radioaktiven Gleichgewicht innerhalb der Zerfallsreihe spricht man, wenn alle Radionuklide mit den gleichen Aktivitäten vorliegen. Das radioaktive Gleichgewicht kann aus verschiedenen Gründen gestört sein. So können in der U-238-Zerfallsreihe die Folgeprodukte des gasförmigen Rn-222, welches sich als einziges gasförmiges Radionuklid der Zerfallsreihe vergleichsweise einfach vom Ort der Entstehung weg bewegen kann, an anderen Orten nachwachsen als die Vorläuferradionuklide. Aufgrund unterschiedlicher chemischer Löslichkeiten können auch Radiumisotope, die sich vom Lösungsverhalten wesentlich vom Verhalten des Ausgangsnuklids des U-238 unterscheiden, selektiv aus der Zerfallsreihen ausscheren und somit beträchtliche Ungleichgewichte der Zerfallsreihen hervorgerufen werden.

In einigen wenigen Anlagen der Tiefengeothermie führen inwandige Ablagerungen zu erhöhten Dosisleistungen im Bereich des übertägigen Betriebsteils und zum Anfall von radioaktiven Rückständen, die einer geordneten Beseitigung oder Verwertung zugeführt werden müssen. Der Umgang mit derartigen Rückständen wird zum Schutz der Beschäftigten und der Bevölkerung vor erhöhten Strahlenexpositionen durch natürliche radioaktive Stoffe in Deutschland seit Juli 2001 als Ergebnis der Umsetzung der EURATOM-Richtlinie 96/29 über die Grundnormen für den Strahlenschutz im Teil 3 der Strahlenschutzverordnung geregelt. Durch die Kombination aus der eigenverantwortlichen Überwachung der Industriebranche und den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung ist der Strahlenschutz bezüglich NORM in der Geothermie in Deutschland heute bereits geregelt. Entsorgungsoptionen wurden erfolgreich genutzt. Bis auf wenige Ausnahmen können Rückstände aus der Überwachung und damit dem Geltungsbereich der Strahlenschutzverordnung entlassen werden.

5.5.7 Umgang mit Abwässern und Lagerstättenwasser

Aus Gründen der Druckhaltung wird vermieden, den geschlossenen Kreislauf der Anlage zu öffnen, so dass ein Anfall von Lagerstättenwasser an der Oberfläche möglichst unterbleibt. Wartungsarbeiten an der Anlage können im Anfall von geringen Mengen an Lagerstättenwasser resultieren. Signifikante Mengen an Lagerstättenwasser fallen beim Betrieb der Separatoren an, wenn die Wärmesenke des Wärmetauschers noch nicht zur Verfügung steht. Das anfallende Wasser wird in Auffangbecken geleitet und nach Abkühlung über die Reinjektionsbohrung in die Lagerstätte zurück gefördert. Über

Evaporation können gewisse Volumina des Lagerstättenwassers eingeeengt werden. Ein Wasseraufkommen von größer $1 \text{ m}^3 / \text{d}$ kann jedoch nicht mehr ohne gezielte Reinjektion gehandhabt werden (Pers. Kommunikation Anlage Soultz-sous-Forêts).

Unter Beachtung der wasser-, strahlenschutz- und abfallrechtlichen Voraussetzungen (siehe hierzu insbesondere Kapitel 6.2.12) können Abwässer wie Spülwässer, die bei der Reinigung von Anlagenteilen anfallen, u. U. auch über die Kanalisation an die kommunale Abwasserbehandlungsanlage abgegeben werden.

5.5.8 Störungen und Folgen

Wie in jeder technischen Anlage kann es auch in einer geothermischen Anlage zu Ausfällen von Anlagenkomponenten kommen. Diese können sowohl den Thermalwasserkreislauf als auch den Sekundär- oder Tertiärkreislauf betreffen. Darüber hinaus können Störungen oder Ausfälle in allen Hilfssystemen auftreten. Weitere Ereignisse können im Zusammenhang mit den Ausfällen von einzelnen Anlagenkomponenten betrachtet werden. Die Auswirkungen einzelner Störungen können ohne detaillierte Anlagenkenntnisse nur generisch beschrieben werden. Sie können von Anlage zu Anlage unterschiedlich bedeutsam hinsichtlich der Gefährdung der Umwelt sein.

5.5.8.1 Ausfall der Förderpumpe

Bei Ausfall der Förderpumpe wird die Anlage abgeschaltet. Besondere Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht zu erwarten. Insbesondere werden weder Thermalwasser noch Betriebsmittel (es sei denn, es kommt zu einem Leck in der Schmiermittelversorgung) freigesetzt.

5.5.8.2 Ausfall der Wärmeübertrager

Ein Ausfall der Wärmeübertrager führt in der Regel zur Abschaltung der Anlage. Bei kurzfristigen Ausfällen kann die Wärme des Thermalwassers auch über die Separatoren abgeführt werden. Besondere Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht zu erwarten. Bei Betrieb der Separatoren kommt es zur Dampfbildung und Emission von Stoffen, u. a. auch von NORM (Radon und anderer Radionuklide), die zulässige Ableitungen nicht überschreiten. Bei Leckagen am Wärmeübertrager werden Thermalwasser

und die darin enthaltenen NORM auf das Anlagengelände freigesetzt und durch die Versiegelung des Anlagengeländes aufgefangen.

Leckagen der Wärmeübertrager, die einen Übertritt des Thermalwassers in den Sekundärkreislauf zu Folge haben, resultieren in komplexen Schadensbildern mit weitreichenden wirtschaftlichen Folgen.

5.5.8.3 Ausfall der Reinjektionspumpe

Bei Vorhandensein redundanter Reinjektionspumpen kann bei Ausfall einer Reinjektionspumpe auf die Reserve umgeschaltet werden. Ansonsten führt der längerfristige Ausfall einer Reinjektionspumpe zur Abschaltung der Anlage. Bei kurzfristigen Ausfällen einer Reinjektionspumpe kann das abgekühlte Thermalwasser im Becken aufgefangen werden. Besondere Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht zu erwarten.

5.5.8.4 Ausfall der Filterstrecken

Fällt eine Filterstrecke aus, kann bei redundantem Aufbau auf den Reservestrang umgeschaltet werden, ansonsten führt der Ausfall einer Filterstrecke zur Abschaltung der Anlage. Besondere Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht zu erwarten.

5.5.8.5 Stromversorgungsausfall

Ausfälle in der Stromversorgung sind zu betrachten /SCH 99/. Dabei kann z. B. das Fremdnetz durch externe Ereignisse nicht vorhanden sein. Die Anlage verliert bei fehlender Anbindung der Förderpumpen an das Fremdnetz die Wärmequelle. Weitere Auswirkungen eines Ausfalls der Fremdnetzanbindung, insbesondere im Hinblick auf die Druckentlastung des Sekundärkreislaufes lassen sich auf Grund der unterschiedlichen Anlagenkonzepte nicht generisch ableiten.

Interne Ereignisse wie z. B. der Ausfall einzelner Schaltschränke sind möglich. Abhängig von der betroffenen Komponente kann dies unterschiedliche Auswirkungen haben, führt jedoch schlimmstenfalls zur Abschaltung der Anlage. Bei Ausfällen von Hilfssystemen, wie dem Schmiermittelsystem, kann es zu Schäden an Komponenten kommen.

Des Weiteren können auch Probleme am Generator Grund für eine Abschaltung der Anlage sein. Weitere Auswirkungen sind nicht zu erwarten. Nach Behebung der Probleme kann die Anlage wieder in Betrieb genommen werden.

5.5.8.6 Leckagen

5.5.8.6.1 Leckagen im Thermalkreislauf

Leckagen können im Allgemeinen aufgrund von Undichtigkeiten an Dichtungen, wie z. B. in den Wärmeübertragern, oder an den Armaturen entstehen. Aufgrund der Eigenschaften des Thermalwassers kann es zu Ablagerungen oder auch Korrosion kommen. Die Korrosion kann zu Leckagen an den Rohrleitungen führen.

Gegenmaßnahmen sind neben einer geeigneten Werkstoffauswahl (korrosions- und abrasionsfest) regelmäßige Wartung und Instandhaltung der betroffenen Komponenten. Das austretende Thermalwasser wird aufgrund der Anlagenversiegelung aufgefangen. Besondere Auswirkungen auf die Umwelt sind nicht zu erwarten.

5.5.8.6.2 Leckagen im Sekundärkreislauf

Diese Leckagen können in verschiedenen Größen auftreten. Einzelne Leckquerschnitte sind nicht vorhersagbar. Des Weiteren kann es auch durch Überdruckversagen einzelner Komponenten zu größeren Lecks im Sekundärkreislauf kommen. Abhängig vom Arbeitsmittel können Lecks eine Gefährdung von Personal und Umwelt darstellen. Um diesem entgegenzuwirken, werden auf den Anlagen Detektoren eingesetzt, die eine Freisetzung von kritischen Stoffen anzeigen können. Dem Problem des Überdruckversagens wird in den Anlagen mit Sicherheitsventilen oder Berstscheiben begegnet /BAU 11/. Diese Maßnahmen setzen eine geeignete Werkstoffauswahl und regelmäßige Wartung und Instandhaltung voraus.

5.5.8.7 Brand

Ein Brand in der Anlage kann zur Freisetzung von Brandgasen, Schadstoffen, Betriebsmitteln und Ruß führen. Typische Brandherde sind z. B. Schaltschränke, sonstige elektrische Einrichtungen, Transformatoren, Generator und heißgelaufene Lager.

Brandlasten in den Anlagen sind z. B. Isoliermaterialien, Schmiermittel (Öl), Strukturmaterialien aus Kunststoff und ggf. brennbare Arbeitsmedien (Iso-Pentan). Je nach betroffenem Anlagenteil sind die Auswirkungen unterschiedlich schwerwiegend.

5.5.8.8 Ausfall sekundärseitiger Komponenten

Abhängig davon welche Komponente betroffen ist und ob diese ggf. redundant verfügbar ist, kommt es zu verschiedenen Szenarien. Diese reichen von keinerlei Ausfällen der Anlage bei redundanten Komponenten oder bei nicht unmittelbar wichtigen Komponenten wie beispielsweise Thermometern bis zu längerfristigen Ausfällen bei wichtigen und nicht redundant verfügbaren Komponenten mit größeren Schäden.

Rückwirkungen auf den Primärkreis sind bei Ausfall des Sekundärkreislaufes, dass das Thermalwasser über die alternative Wärmesenke (Separator) entspannt und abgekühlt wird. Es wird dann aus dem Becken gefördert und über die Reinjektionsbohrung wieder reinjiziert. Bei längerfristigem Ausfall des Sekundärkreislaufes wird die Anlage abgefahren.

Bei Versagen von Anlagenteilen kann es zur Freisetzungen von Arbeitsmedium oder Betriebsmitteln wie Öl kommen. Mögliche Auswirkungen auf die Umgebung hängen von der freigesetzten Substanz und der freigesetzten Menge ab. Flüssigkeiten werden durch die Versiegelung des Anlagengeländes aufgefangen. Bei Betrieb des Separators kommt es zur sichtbaren Emission wasserdampfgesättigter Volumina mit Anteilen der Thermalwasserbestandteile.

5.5.8.9 Ausfall von tertiärseitigen Komponenten

Abhängig davon welche Komponente betroffen ist und ob diese ggf. redundant verfügbar ist, kommt es zu verschiedenen Szenarien. Diese reichen von keinerlei Ausfällen der Anlage bei redundanten Komponenten oder bei nicht unmittelbar wichtigen Komponenten wie beispielsweise Thermometern bis zu längerfristigen Ausfällen bei wichtigen und nicht redundant verfügbaren Komponenten mit größeren Schäden.

Durch Ausfall des tertiären Kreislaufes wird der Sekundärkreislauf nicht mehr gekühlt und dieser muss abgeschaltet werden. Dieser mittelbare Ausfall des Sekundärkreislaufes führt zu Rückwirkungen auf den Primärkreis. Das Thermalwasser wird über die

alternative Wärmesenke (Separator) entspannt und abgekühlt. Es wird dann aus dem Becken gefördert und über die Reinjektionsbohrung wieder reinjiziert. Bei längerfristigem Ausfall des Sekundärkreislaufes wird die Anlage abgefahren.

Bei Versagen von Anlagenteilen kann es zur Freisetzung von Betriebsmitteln wie Öl kommen. Mögliche Auswirkungen auf die Umgebung hängen von der freigesetzten Substanz und der freigesetzten Menge ab. Flüssigkeiten werden durch die Versiegelung des Anlagengeländes aufgefangen.

5.5.8.10 Ausfall von Hilfssystemen

Abhängig vom Hilfssystem führen Ausfälle zu kleineren Störungen oder zur Abschaltung der Anlage. Bei Leckagen an Hilfssystemen mit Betriebsmitteln wie Öl oder anderem kann es zur Freisetzung dieser Betriebsmittel kommen. Mögliche Folgen sind wie bei dem Ausfall tertiärseitiger Komponenten beschrieben zu erwarten.

5.5.8.11 Menschliche Fehlhandlungen

Die Auswirkungen einzelner menschlicher Fehlhandlungen auf die Anlagen reichen von kleineren Störungen bis zum Ausfall der Anlage. Fehlhandlungen können beispielsweise zu Bränden oder dem nicht auslegungsgemäßen Verhalten von Komponenten führen. Die Auswirkungen einzelner menschlicher Fehlhandlungen auf die Umgebung der Anlage können im Rahmen dieses Berichts nicht generisch beschrieben werden, da diese zu vielfältigen Folgen führen können.

Grundsätzlich sind bei den menschlichen Fehlhandlungen unterschiedliche Möglichkeiten zu betrachten. So kann es zu menschlichen Fehlhandlungen bei Instandhaltung, Wartung, Reparatur und Betrieb kommen. Wird die Anlage (teilweise) automatisch gefahren, so kann es zudem zu Fehlprogrammierungen in der Steuerungssoftware kommen.

5.6 Seismische Ereignisse bei Erkundung und Betrieb

5.6.1 Aufgabenstellung

Die Erschließung geothermischer Lagerstätten und der spätere Betrieb geothermischer Energiegewinnungsanlagen können seismische Ereignisse im Zielhorizont (d. h. der geologischen Formation und der Tiefe, aus der die geothermische Energie gewonnen werden soll) auslösen, die sich bis an die Erdoberfläche fortsetzen. In den meisten Fällen werden diese Mikrobeben nicht an der Erdoberfläche gespürt. Im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten treten jedoch auch immer wieder spürbare Beben auf. Diese schwachen Beben stellen zwar keine unmittelbare, signifikante Gefahr für die Bevölkerung dar, führen jedoch zu einer deutlichen Abnahme der gesellschaftlichen Akzeptanz von Geothermie-Projekten.

Nachfolgend wird deshalb der gegenwärtige Kenntnisstand bezüglich seismischer Ereignisse im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten in Deutschland und dem benachbarten Ausland (Schweiz, Frankreich) überblicksmäßig dargestellt. Diese Aufgabe basiert auf einer Sichtung vorhandener Literatur unter Berücksichtigung bisheriger Forschungsprojekte sowie praktischer Erfahrungen und umfasst neben einer allgemeinen Einführung in die seismische Problematik die Identifizierung von Mechanismen, die zu Beben geführt haben, deren eventuelle Abhängigkeit von unterschiedlichen Lagerstättentypen und angewandten Techniken sowie ggf. verfügbare präventive Maßnahmen. Da diese Aufgabe nicht - wie ursprünglich vorgesehen - an ein auf die spezifischen Fragestellungen ausgerichtetes Hochschulinstitut vergeben wurde, bleiben Bewertungen auf ein Maß beschränkt, das aus den recherchierten Dokumenten selbst und einem Erfahrungsaustausch mit Experten ableitbar ist.

5.6.2 Vorbemerkung

Die nachfolgenden Darstellungen basieren auf einer Auswertung vorhandener Literatur, die vielfältige Forschungs-Arbeiten und praktische Erfahrungen an unterschiedlichen Institutionen und Lokationen dokumentiert. Eigene praktische FuE-Arbeiten seitens der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH zu diesem Thema sind bislang nicht erfolgt. Dort, wo es angebracht erschien, sind deshalb sachbezogene Ausführungen aus den recherchierten Dokumenten (Texte und Abbildungen) teilweise auch direkt übernommen. Um die Lesbarkeit des Textes nicht zu stark einzu-

schränken, ist in diesem Zusammenhang oft nicht jeder Einzelsatz oder Satzbestandteil unmittelbar zitiert. Es wird deshalb i. d. R. zu Beginn eines jeden (Unter-) Kapitels besonders darauf verwiesen, auf welchen Quellen die nachfolgenden Ausführungen dieses (Unter-) Kapitels ganz wesentlich beruhen. Besonderer Dank gilt darüber hinaus Herrn Dr. U. Wegler und Frau M. Vasterling von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover sowie Herrn Dr. S. Baisch von der Firma Q-con GmbH in Bad Bergzabern, die unbürokratisch vielfältige Informationen zum Thema zur Verfügung gestellt haben.

5.6.3 Natürliche Seismizität

Wesentliche Quellen: /GRÜ 04/, /BGR 13/

Die Thematik „Seismizität“ erfordert zunächst eine Differenzierung zwischen natürlicher Seismizität und induzierter Seismizität. Das Auftreten natürlicher Seismizität stellt in diesem Zusammenhang im Wesentlichen eine Folge der weltumspannenden Kontinentaldrift und der Plattentektonik dar und ist somit Bestandteil unserer natürlichen Umwelt. In der Bundesrepublik Deutschland ist eine Gefährdung durch natürliche Erdbeben zwar relativ gering, aber keinesfalls vernachlässigbar (z. B. /GRÜ 04/). Die überwiegende Mehrzahl der Erdbebenherde konzentriert sich in Deutschland auf drei Schwächezonen in der Erdkruste (siehe Abb. 5.6):

- das Rheingebiet,
- die Schwäbische Alb sowie
- Ostthüringen und Westsachsen mit dem Vogtländischen Schwarmbebengebiet.

Die dortigen Erdbeben ereignen sich hauptsächlich in einem Teufenbereich zwischen fünf und zwanzig Kilometern (mit Schwerpunkt der seismischen Energiefreisetzung in ca. 10 km Teufe). In historischer Zeit wurde die Intensität⁴ VIII bisher nicht überschrit-

⁴ Die makroseismische Intensität I stellt eine Klassifizierung der Stärke der Bodenerschütterungen auf der Grundlage beobachteter Effekte in einem begrenzten Gebiet wie einer Ortschaft dar /GRÜ 04/. Als Einschätzungsgrundlage dienen die Effekte der Bodenerschütterungen auf Menschen, Objekte in Häusern sowie das Ausmaß an Gebäudeschäden. Intensitäten sind ein robustes Maß zur Stärkeklassifizierung, unterteilt in 12 detailliert definierte Intensitätsgrade zwischen I (= nicht gefühlt) bis XII (= vollständig verwüstend). Demgegenüber ist die Magnitude M ein von /RIC 35/ eingeführtes instrumentelles Maß zur Stärkebestimmung von Beben. Die Magnitude wird aus dem Logarithmus des maximalen Ausschlages von Seismographen unter Berücksichtigung der Entfernung zum Erdbebenherd

ten. In den o. g. Hauptbebengebieten Deutschlands gehören dennoch Erdbeben - neben Überschwemmungen und Stürmen - zu den bedeutendsten Verursachern von Elementarschäden.

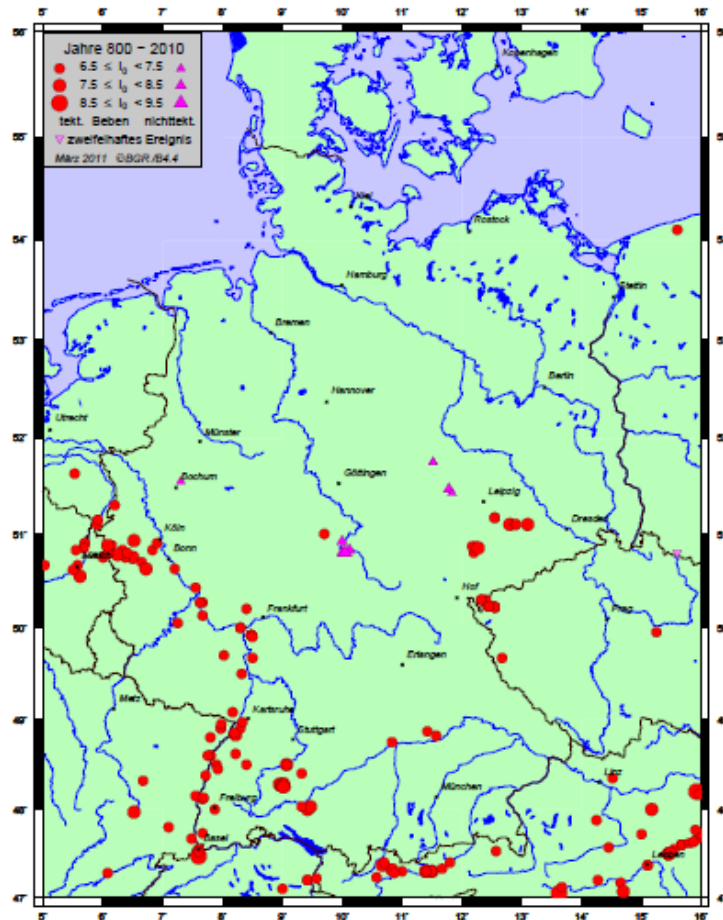


Abb. 5.6 Karte der Epizentren der in den Jahren 800 bis 2010 aufgetretenen Schadenbeben in der Bundesrepublik Deutschland und angrenzenden Gebieten. Dargestellt ist die Intensität im Epizentrum, abgekürzt mit I_0 /BGR 13/

bestimmt. So entspricht die Magnitude 4 einem Beben, welches in 100 km Entfernung mit einem maximal 2800-fach vergrößernden Wood-Anderson-Seismographen aufgezeichnet, einen maximalen Ausschlag auf dem Seismogramm von 1 cm ergibt. Diese Originaldefinition von /RIC 35/ ist heutzutage für Lokalbeben in Form der Lokalbebenmagnitude M_L in Gebrauch /GRÜ 04/.

5.6.4 Induzierte Seismizität

5.6.4.1 Ausgangspunkt der öffentlichen Diskussion

Wesentliche Quellen: /BAI 09/

Im Zusammenhang mit der hydraulischen Stimulation eines geothermischen Reservoirs trat am 08.12.2006 in Basel, Schweiz ein induziertes Beben der Magnitude M_L 3,4 auf, das an der Erdoberfläche deutlich zu spüren gewesen ist und zu einer (vorläufigen) Stilllegung des Projektes geführt hat. Auch von zahlreichen anderen Geothermie-Standorten ist das Auftreten induzierter Seismizität bekannt. Das jüngste Beispiel hierfür im Rahmen der Vorhabens-Laufzeit stellt ein Geothermie-Projekt in St. Gallen, Schweiz (Abb. 5.7) dar. Nach einem Erdbeben der Stärke 3,6 ist im Juli 2013 dieses Geothermie-Projekt nahe dem Bodensee zunächst gestoppt worden. Nach Abschluss von Produktionstests im Oktober 2013 wurde das Bohrloch konserviert; bis Mitte 2014 sollen die technische Machbarkeit, aber auch finanzielle, politische, rechtliche und behördliche Rahmenbedingungen geklärt werden.

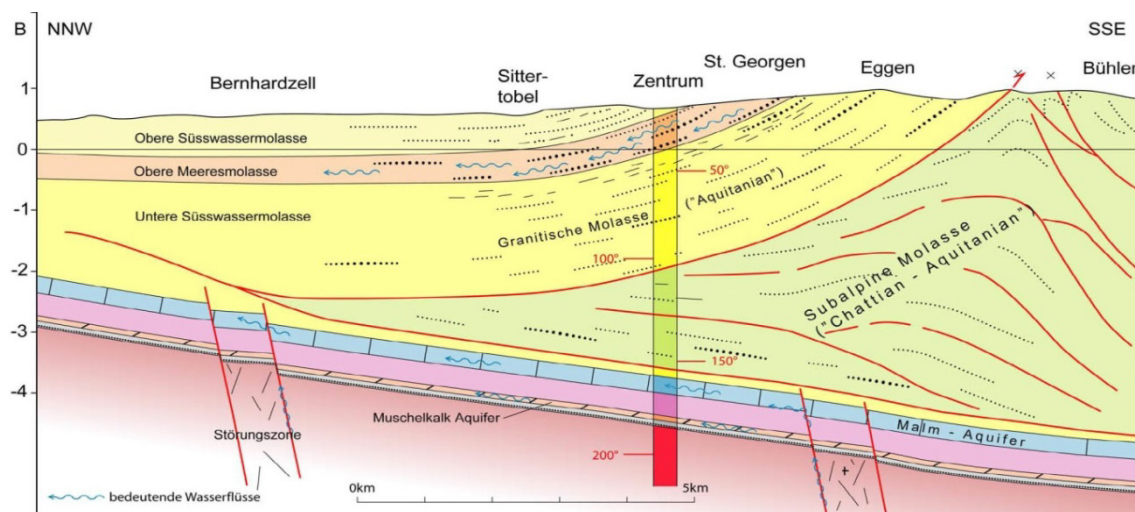


Abb. 5.7 Übersicht über das Geothermie-Projekt St. Gallen; Quelle: <http://ksbg.educanet2.ch/algeografie11/images/000000290170.jpg>

Häufig stellt induzierte Seismizität allerdings ein - von Betreiberseite - gewünschtes Phänomen dar. Dieser Umstand ist dadurch begründet, dass insbesondere bei petrothermalen Geothermie-Projekten die für einen wirtschaftlichen Anlagenbetrieb erforderlichen Wasserdurchlässigkeiten und Wärmeaustauschflächen im Reservoir erst künstlich geschaffen werden müssen. Bei dieser so genannten hydraulischen Stimula-

tion wird eine große Anzahl von Mikroerdbeben gezielt erzeugt, da die damit verbundenen Deformationsprozesse zu einer Erhöhung der Wasserleitfähigkeit im Reservoir führen.

In der überwiegenden Mehrzahl sind diese Mikroerdbeben äußerst schwach und können nur mit empfindlichen Messinstrumenten nachgewiesen werden. Vereinzelt sind in der Vergangenheit aber immer wieder auch spürbare Ereignisse induziert worden (siehe Tab. 5.1), die besonders in der Öffentlichkeit zu Verunsicherungen und Befürchtungen Anlass gegeben hat (siehe insb. /BAI 09/). Eine zusammenfassende Übersicht von Ereignissen ist beispielsweise auch in /SCH 12b/ gegeben.

Tab. 5.1 Die stärksten Erdbebenmagnituden, die in petrothermalen Projekten bis heute beobachtet wurden (Angaben aus /BAI 09a/, /BAI 09b/)

| Projekt | Hydraulische Maßnahme | M _{max} |
|---------------------------------|-----------------------|------------------|
| Soultz-sous-Forêts (Frankreich) | Stimulation GPK4 | 2,3* |
| Soultz-sous-Forêts (Frankreich) | Stimulation GPK2 | 2,4* |
| Cooper Basin (Australien) | Re-Stimulation H#1 | 2,9* |
| Soultz-sous-Forêts (Frankreich) | Stimulation GPK3 | 2,9* |
| Basel (Schweiz) | Stimulation BS | 3,4* |
| Cooper Basin (Australien) | Stimulation H#1 | 3,7 |

* Magnitudenwerte mit Stern kennzeichnen Ereignisse, die erst nach Beendigung einer hydraulischen Stimulation stattgefunden haben

Induzierte Seismizität wird im Rahmen petrothormaler⁵ Geothermie-Projekte von Betreiberseite auch gezielt als Indikator dafür verwendet, wie weit im Rahmen einer hydraulischen Stimulation der Prozess einer „Durchlässigkeitsverbesserung“ im tiefen Untergrund reicht. Mit Hilfe einer räumlichen Darstellung der induzierten Bebenherde ist also eine räumliche Kartierung des künstlich geschaffenen Wärmetauschers möglich. Beim Ausbau und dem Betrieb eines rein hydrothermalen Systems spielt nach /BAI 09/ induzierte Seismizität in der Regel keine solche Rolle, wird entweder als ,notwendiges

⁵ Bei hydrothermalen Systemen wird heißes Wasser über eine Bohrung aus einem tiefen Aquifer(Grundwasserleiter) gefördert, über einen Wärmetauscher die Wärme entzogen und das abgekühlte Wasser über eine andere Bohrung wieder re-injiziert (Bohrlochdublette); bei petrothermalen Systemen wird Wasser durch heiße (trockene), hydraulisch gering durchlässige geologische Formationen zirkuliert (sog. Hot Dry Rock (HDR) - Verfahren) /FOR 13/.

Übel' aufgefasst oder angenommen, dass der Betrieb hydrothermaler Systeme selbst keine Seismizität auslöst (siehe Abb. 5.8). Aus physikalischer Sicht ist diese Annahme jedoch falsch. Auslösender Faktor für induzierte Seismizität ist letztlich immer eine Erhöhung des Flüssigkeitsdrucks auf bestehenden Klüfflächen in einem Reservoir. Je nach Beschaffenheit des Wärmetauschers kann eine solche Druckerhöhung auch während des Zirkulationsbetriebs in hydrothermalen Systemen auftreten und zu induzierter Seismizität führen.

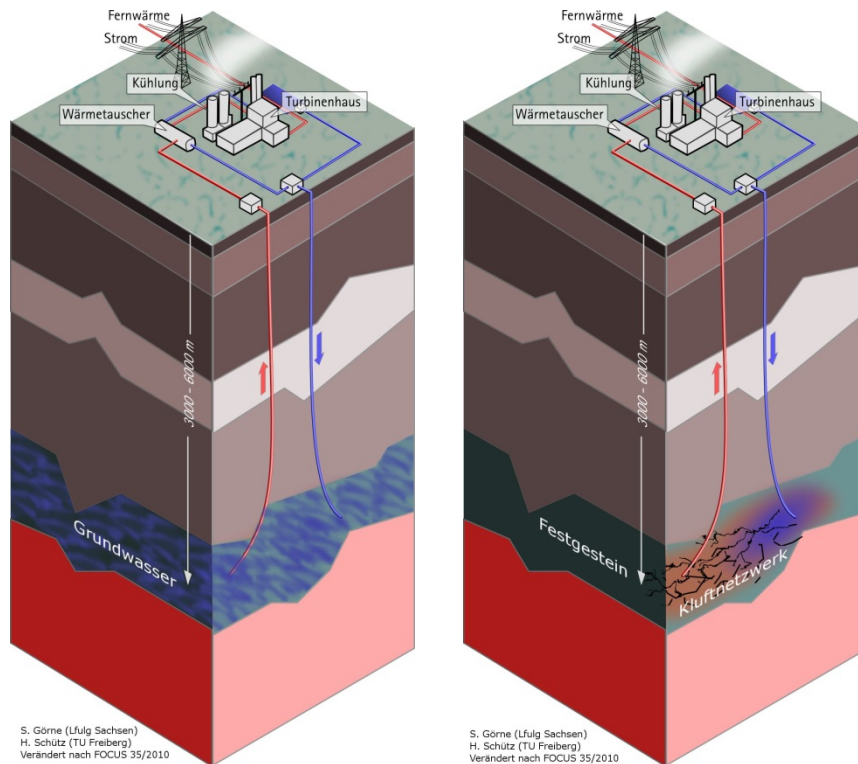


Abb. 5.8 Prinzipskizze hydrothermaler (links) und petrothermaler Energiegewinnung im Rahmen von Geothermie-Projekten (aus /FOR 13/)

5.6.4.2 Grundlagen

Wesentliche Quellen: /BAI 09/, /GTV 10/

Alle größeren anthropogen verursachten Eingriffe in den geologischen Untergrund verändern das natürlich existierende Spannungsfeld und haben so das Potenzial, seismische Ereignisse auszulösen. Solche Eingriffe mit resultierenden seismischen Ereignissen umfassen nach /GTV 10/ z. B. Staudämme, Bergbauaktivitäten, Tunnel, Öl-/Gasproduktion, Untergrundspeicher (Gas, Druckluft), Flüssigkeitsverpressungen, Mineralwasserbrunnen und auch die hydraulische Stimulation von Öl-/Gaslagerstätten.

Das Phänomen der induzierten Seismizität im Zusammenhang mit Flüssigkeitsinjektionen wird bereits seit den 1960er Jahren in der Literatur diskutiert. Obwohl auch chemische und thermische Prozesse als auslösende Mechanismen in Betracht gezogen wurden, besteht heute Konsens, dass die injektionsinduzierte Seismizität im allgemeinen über eine Erhöhung des Flüssigkeitsdrucks auf existierenden Klufflächen beschrieben werden kann. Dieser Prozess ist schematisch in Abb. 5.9 dargestellt (/BAI 09/).

Die im Zuge von Geothermie-Projekten auftretende Induzierte Seismizität ist dabei auf dieselben physikalischen Ursachen wie bei anderen Fluidinjektionen (siehe dazu auch /GUP 92/) zurückzuführen. Der Hauptmechanismus besteht darin, dass ein zusätzlich aufgebrachter Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert, in deren Folge dann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung auftreten kann. Beim Betrieb geothermischer Anlagen können darüber hinaus auch thermo-mechanische Effekte eine Rolle spielen. Auch diese können Reibungskräfte reduzieren, sind aber meist auf sehr kleine Gesteinsvolumen beschränkt.

Über seismische Effekte bei geothermischen Projekten wurde bereits weltweit berichtet. Nach /GTV 10/ traten aber bislang an keiner Lokation zerstörerische Beben auf, welche die Tragstruktur von Gebäuden beeinträchtigt, die Infrastruktur geschädigt oder sogar eine Gefahr für Menschen dargestellt hätten. Kleinere Schäden sind aber durchaus aufgetreten, wie z. B. in Basel oder Landau, auf die weiter unten noch detaillierter eingegangen wird. Spürbare Erdbeben durch tiefe Geothermie traten nach /WEG 11/ in Deutschland und angrenzenden Gebieten bislang in Basel (/HÄR 08/, /BAI 09a/), Soultz-sous-Forêt (/BAI 08/, /DOR 09/), Landau /EXP 10/, Insheim und Unterhaching auf. An den Standorten KTB (/ZOB 97/, /BAI 02/), Bad Urach (/STA 03/, /BAI 03/), Groß-Schönebeck /KWI 10/ und Horstberg (/ORZ 04/, /ORZ 05/) wurden ebenfalls Mikro-Erdbeben mit Seismometern nachgewiesen, die jedoch zu keinen spürbaren Erschütterungen geführt haben /WEG 11/. Eine Übersicht ist auch in /SCH 12b/ gegeben.

5.6.4.3 Mechanismus fluid-induzierter Seismizität

Wesentliche Quellen: /WEG 11/, /MAJ 12/, /COM 13/

Das erste in der Literatur beschriebene Fallbeispiel fluid-induzierter Seismizität stammt aus den USA, wo in den 1960er Jahren in der Umgebung von Denver (Colorado) flüs-

siger Abfall in tiefen Bohrlöchern verpresst wurde /HEA 68/. Bereits seit dieser Zeit ist bekannt, dass Änderungen im Druck des Porenwassers Erdbeben auslösen können. Auch das größte Erdbeben, das nach derzeitigem Wissensstand durch das Verpressen flüssiger Abfälle in den tiefen Untergrund anthropogen verursacht wurde, fand in der Nähe von Denver statt (9.8.1967) und hatte eine Magnitude von ca. $M = 5,5$. Bei dieser Verpressmaßnahme wurden insgesamt 620 Mio. Liter Flüssigkeit verpresst, wobei die mittlere Verpressrate 8 L/s und der maximale Bohrlochkopfdruck 72 bar betragen /NIC 90/. Neben gezielten Flüssigkeitsinjektionen in den Untergrund kann insbesondere auch das Auffüllen von Wasserreservoirien hinter großen Staudämmen Porendruckänderungen im Untergrund bewirken und damit induzierte Seismizität verursachen. Das größte allgemein anerkannte, durch einen Staudamm bzw. Stausee induzierte Erdbeben trat am 10.12.1967 in der Nähe des Koyna-Reservoir in Indien auf (/NAR 68/, /GUP 69/). Bei derartigen Wasserreservoir-Projekten treten zusätzlich zu einer Porendruckänderung auch Spannungsänderungen durch Auflastvariationen auf /WEG 11/.

Bei Tiefengeothermie-Projekten wird grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Phasen unterschieden:

- Phase der sog. hydraulischen Stimulationen und
- Dauerbetrieb des geothermischen Kraftwerks (Zirkulation).

Wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes nicht ausreicht, um ein geothermisches Kraftwerk zu betreiben, wird Wasser unter hohem Druck in ein Bohrloch verpresst. Dieser Vorgang wird als „hydraulische Stimulation“ oder als „Wasser-Frac-Verfahren“ bezeichnet. Durch dieses Verfahren werden neue Risse im Untergrund erzeugt oder bestehende aufgeweitet. Diese Rissbildungen, die in vielen Fällen erforderlich sind, um ein unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausreichend großes geothermisches Reservoir zu erzeugen, entsprechen aus geophysikalischer Sicht kleinen Erdbeben.

Während des Dauerbetriebs eines geothermischen Kraftwerks wird im Allgemeinen aus einem Bohrloch heißes Wasser entnommen. Nach dessen Nutzung zur Energiegewinnung oder zum Heizen wird das abgekühlte Wasser in einem zweiten Bohrloch anschließend wieder in den Untergrund verbracht. Auch durch diese Zirkulation können Erdbeben verursacht werden. Das Gestein der Erdkruste ist nach derzeitigem Wissensstand auf Grund tektonischer Kräfte fast überall auf der Welt gespannt. Übersteigt

die Scherspannung im Untergrund einen kritischen Wert τ_{crit} , kommt es zu einem Scherbruch, der unabhängig von der Größe der Bruchfläche als „Erdbeben“ bezeichnet wird. Diese kritische Scherspannung wird auch als Scherfestigkeit bezeichnet. Hierbei treten Brüche insbesondere an bereits vorhandenen Schwächezonen der Erdkruste auf. Nach dem Mohr-Coulomb-Bruchkriterium kann die kritische Scherspannung τ_{crit} , bei der es zu Erdbeben kommt, durch folgende Gleichung abgeschätzt werden:

$$\tau_{crit} = \mu(\sigma_n - P_f) + \tau_{crit}^0.$$

Hierbei sind μ der Reibungskoeffizient, σ_n die Normalspannung, die senkrecht auf der potenziellen Bruchfläche liegt, P_f der Druck des Porenwassers und τ_{crit}^0 die kritische Scherspannung bei einer Normalspannung von 0, die auch als Kohäsion bezeichnet wird, von Bedeutung. Das Mohr-Coulomb-Bruchkriterium besagt, dass eine Spannung, die senkrecht auf der möglichen Bruchfläche liegt, dem möglichen Bruchprozess durch verstärkte Reibung entgegenwirkt. Je höher die Normalspannung σ_n ist, desto höher muss die kritische Scherspannung τ_{crit} sein, damit es zum Scherbruch entlang einer Schwächezone kommt. Der Porenwasserdruck P_f wirkt dieser Normalspannung σ_n entgegen. Durch eine Erhöhung des Porendrucks wird die Reibung herabgesetzt und die kritische Scherspannung τ_{crit} sinkt (Abb. 5.9). Wenn die tektonische Spannung im Gestein nun schon vorher nahe der Scherfestigkeit lag, kann dieses Herabsetzen dazu führen, dass die Scherspannung im Untergrund die Scherfestigkeit überschreitet und somit ein Erdbeben ausgelöst wird. Bei diesem Vorgang werden bereits im Untergrund vorhandene tektonische Spannungen abgebaut. Die Erdbebentätigkeit hängt somit entscheidend von den hydraulischen Parametern im Gesteinskörper ab, die durch den geothermischen Kraftwerksbetrieb beeinflusst werden können. Darüber hinaus können auch die Abkühlung des Gesteins sowie chemische Vorgänge im Rahmen der geothermischen Nutzung die Scherfestigkeit verringern.

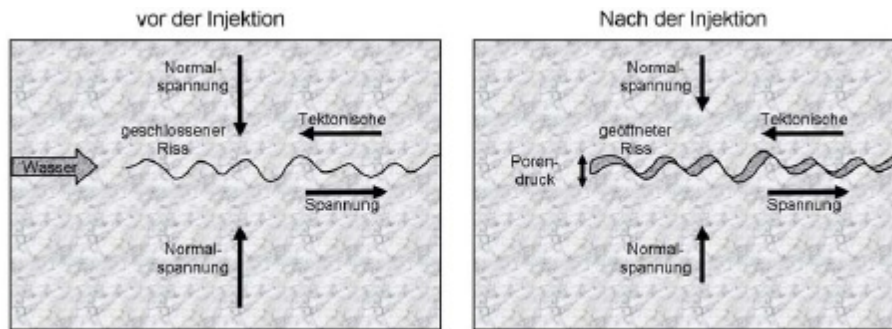


Abb. 5.9 Prinzipskizze zur Wirkung einer Fluidverpressung

Vor der Injektion (links) herrscht geringer Porendruck und eine hohe Reibung wirkt der tektonischen Spannung entgegen; nach der Injektion (rechts) ist die Reibung durch den erhöhten Porendruck herabgesetzt (aus /WEG 11/)

/MAJ 12/ beschreibt den Mechanismus fluid-induzierter Seismizität so, dass im Falle von EGS (enhanced geothermal systems, d. h. stimulierte geothermische Systeme) Fluidinjektionen eingesetzt werden, um die Gesteinspermeabilität und damit die Wärmegewinnung aus dem Gestein zu verbessern. Während des Prozesses der Schaffung eines unterirdischen Wärmetauschers durch Injektion oder die anschließende Fluid-Zirkulation im System, kann sich das Stress-Muster im Gestein ändern, was in seismischen Ereignissen resultieren kann.

Nach /COM 13/ scheint Induzierte Seismizität im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten sowohl mit Nettoflüssigkeitsbilanz-Aspekten als auch Temperaturänderungen im Untergrund zusammenzuhängen (s. o.). Unterschiedliche Arten der Erschließung geothermischer Ressourcen scheinen dabei auch ein unterschiedliches Potenzial für die Entstehung gefühlter seismischer Ereignisse aufzuweisen. Auch Temperaturänderungen als Begleiterscheinung der Erschließung geothermischer Ressourcen haben induzierte und gespürte Seismizität verursacht.

5.6.4.4 Nachwirkung durch langsame Porendruckausbreitung

Wesentliche Quellen: /WEG 11/

Das im Rahmen von Injektionsmaßnahmen in den Untergrund verpresste Wasser breitet sich im Untergrund unter Umständen nur langsam entlang existierender Porenräume und Klüftzonen aus (z. B. durch einen Diffusionsprozess, /TAL 85/, /SHA 02/). In einem solchen Fall stellen sich nach einer Änderung der Parameter einer hydraulischen

schen Stimulation oder der hydraulischen Parameter eines Geothermiekraftwerks im Zirkulationsbetrieb die neuen Spannungsverhältnisse im Untergrund auch erst langsam ein. Durch derartige Parameteränderungen hervorgerufene seismische Ereignisse können folglich auch mit einer Verzögerung gegenüber der Stimulations- oder Zirkulationsmaßnahme auftreten. Die bereits erwähnte Fluidverpressung in Denver wurde z. B. im Februar 1966 aufgrund der aufgetretenen Erdbeben gestoppt, aber noch im Folgejahr wurden drei Erdbeben mit einer Magnitude > 5 registriert (im April, August und November 1967). Erst danach nahm die Seismizität in der betreffenden Region ab /NIC 90/. Die Beobachtung, dass größere Ereignisse auch in der sog. „Shut-in-Periode“ einer hydraulischen Stimulation auftreten können, wurde im Rahmen von Geothermie-Projekten erstmals in Soultz-sous-Forêts deutlich. Spürbare Ereignisse traten dort bei hydraulischen Stimulationen der Bohrung GPK2 (einen Tag nach einer abschließenden Testinjektion) und der Bohrung GPK3 wenige Tage nach der Einschlussphase auf /DOR 09/. Im Rahmen des „Deep-Heat-Mining-Projektes“ in Basel wurde die hydraulische Stimulation am 08.12.2006 wegen zu hoher Erdbebenaktivität gestoppt. Dennoch traten am 06.01.2007, am 16.01.2007 und am 02.02.2007 jeweils noch ein Erdbeben mit einer Magnitude größer als 3 auf (BAI 09a/, /BAI 09b/). Eine derartige zeitliche Verzögerung zwischen der Beendigung der Fluidverpressung und dem Ende der Erdbebenaktivität steht im Gegensatz zu den Erfahrungen im Kohlebergbau, wo die nicht durch Fluide sondern durch Auflaständerung induzierte Seismizität bei einem Förderstopp noch am selben Tag zurückgeht /BIS 10/. Die Verzögerungszeit hängt unter anderem von der Permeabilität des Untergrundes ab und kann nach bisherigen Erfahrungen /WEG 11/ zwischen einigen Tagen bis zu Monaten, im Extrembeispiel Denver sogar fast zwei Jahren, dauern. Unerwünscht hohe Seismizität lässt sich daher zwar durch Reduktion der Fluidflussrate und des Fluiddruckes verringern, die möglicherweise langsame Fluidausbreitung im Untergrund kann jedoch zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen der Änderung der hydraulischen Parameter einer Geothermieanlage und der daraus folgenden Änderung der Erdbebenaktivität führen. Nach neuesten Forschungsergebnissen lässt sich das Abklingen der Seismizität nach dem Shut-In durch die Omori-Relation approximieren (LAN 09a/, /LAN 09b/), welche die Abklingrate der Nachbeben nach tektonischen Erdbeben beschreibt (<http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/o/omoris-gesetz.html>).

5.6.4.5 Risikobewertung

Zur Risikobewertung des möglichen Auftretens seismischer Ereignisse im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten gibt es unterschiedliche Einschätzungen, deren wichtigste nachfolgend in ihren Kernaussagen wiedergegeben sind.

5.6.4.5.1 Risikobewertung nach /GTV 12/

Nach /GTV 12/ wird ein kontrollierter Betrieb einer Geothermie-Anlage durch eine messtechnische Überwachung in Kombination mit einem Reaktionsschema in allen Betriebsphasen (Erstellung bis Rückbau) sichergestellt. Schadensereignisse werden unter diesen Randbedingungen statistisch sicher und selbst fühlbare Ereignisse mit großer Wahrscheinlichkeit vermieden.

Eine ausführliche Darstellung der induzierten Seismizität im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten findet sich im Positionspapier des „GtV-Bundesverbandes Geothermie e.V.“ /GTV 10/.

Alle größeren Eingriffe in den Untergrund haben danach eine Änderung des lokalen Spannungsfeldes zur Folge und somit das Potenzial, seismische Ereignisse auszulösen. Seismische Ereignisse wurden (und werden) daher nicht nur in Zusammenhang mit Geothermie-Projekten berichtet sondern auch mit:

1. Errichtung von Staudämmen
2. Bergbauarbeiten
3. Bau von Verkehrstunneln
4. Ausgrabungen
5. Öl-/Gasförderung
6. Bau von Unterspeichern (Gas, Druckluft)
7. Flüssigkeitsverpressungen
8. Niederbringung von Mineralwasserbrunnen
9. Hydraulischer Stimulation von Öl-/Gaslagerstätten

Induzierte Seismizität bei geothermisch bedingten Stimulationsmaßnahmen hat den gleichen physikalischen Grund wie andere Fluidinjektionen. Der Hauptmechanismus ist, dass der zusätzlich aufgebrachte Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert. Folge kann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung sein. Dabei werden generell natürliche Scherspannungen, welche auf den Störungsflächen wirken, reduziert. Darüber hinaus können auch thermo-elastische Effekte die Reibungskräfte auf Störungsflächen reduzieren. Diese Effekte sind meist auf sehr kleine Gesteinsvolumina begrenzt.

Über seismische Effekte bei geothermischen Projekten wurde weltweit berichtet /MAJ 11/. Nach /GTV 12/ wurden noch nirgendwo Beben registriert, welche die Tragstruktur von Gebäuden beeinträchtigt, die Infrastruktur geschädigt oder gar eine Gefahr für Menschen dargestellt hätten. Kleinere Schäden wurden in der Praxis ohne nähere Ermittlung der Verursachungszusammenhänge auf dem Kulanzweg reguliert oder es wurde eine einvernehmliche Schadensabwicklung angestrebt. Das Einwirken induzierter Seismizität auf den Menschen bzw. auf Gebäude wird durch DIN 4150 /DIN 01/ geregelt.

Jeder Stimulationsmaßnahme sollten eine strukturgeologische Charakterisierung des Untergrundes und eine detaillierte Spannungsfeldanalyse vorangestellt sein. Alle Schritte einer Stimulation sollten messtechnisch durch ein seismisches Monitoring begleitet werden. Die Messungen werden kontinuierlich statistisch und bezüglich ihrer räumlichen Verteilung ausgewertet. Auch deterministische Abschätzungen können einfließen. Das Ergebnis der einer Stimulationsmaßnahme vorausgehenden Betrachtungen ist ein Überwachungskonzept der natürlichen und induzierten Seismizität inklusive eines Reaktionsschemas. Überwachung und Reaktionsschema gewährleisten gemeinsam einen kontrollierten Betrieb der Anlage.

5.6.4.5.2 Umgang mit dem seismischen Risiko nach /BAI 09/

Im Vorfeld eines geothermischen Projektes ist die Frage nach dem seismischen Risiko nach /BAI 09/ häufig nicht abschließend zu klären. Erst die Reaktion des geothermischen Systems auf eine hydraulische Druckbeaufschlagung zeigt, inwieweit induzierte Seismizität unter den lokalen Bedingungen auftritt. Daher sollte ein seismisches Beobachtungs-System Bestandteil eines jeden geothermischen Projektes sein. Da die

Stärke der induzierten Seismizität entsprechend der räumlichen Ausdehnung des hydraulischen Überdrucks nur langsam zunimmt, lassen sich Beobachtungen in einer frühen Projektphase verwenden, um ein eventuell vorhandenes seismisches Risiko rechtzeitig zu erkennen. Gleichzeitig können mit diesen Informationen numerische Modelle kalibriert werden, mit denen sich die Stärke der induzierten Seismizität für den weiteren Projektbetrieb über Szenario-Modellierungen simulieren lässt. Dazu ist es unerlässlich, neben der seismischen und hydraulischen Beobachtung auch ein physikalisches Reservoir-Modell zu entwickeln. /BAI 09/

Ein wesentlicher Aspekt bei der Behandlung des seismischen Risikos ist das Phänomen der Post-Injektions-Seismizität, d. h. der seismischen Aktivität, die auch nach Abschalten aller Pumpen auftritt (s. o.). Häufig treten gerade in dieser Phase die stärksten induzierten Beben auf (vergleiche die mit Sternchen versehenen Magnitudenwerte in Tab. 5.1). Ursache dafür ist die anhaltende Ausbreitung des Fluidrucks im Randbereich des Reservoirs /BAI 06b/. Dieser Effekt lässt sich mit einfachen Modellen numerisch simulieren (Abb. 5.10) und muss bei der Festlegung von Abbruchkriterien unbedingt berücksichtigt werden.

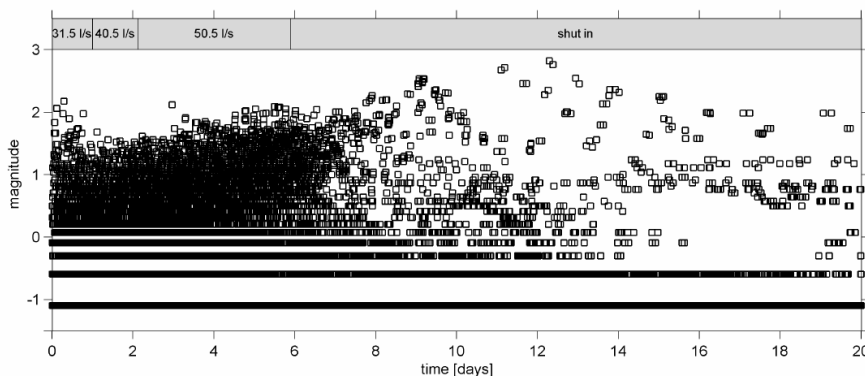


Abb. 5.10 Magnituden-Zeit-Verteilung modellierter Seismizität

Injektionsraten sind im oberen Teil angegeben. Die stärksten Beben treten nach der Stimulation in der Einschlussphase auf (etwa 6 Tage nach Beginn des Shut-In) (aus /BAI 09b/)

Nach /BAI 09/ lässt sich das Auftreten induzierter Seismizität in geothermischen Systemen mit wenigen physikalischen Grundgleichungen hinreichend beschreiben. Das räumlich-zeitliche Verhalten und die Stärke der induzierten Seismizität folgen einfachen Gesetzmäßigkeiten, wobei die Stärke der Reservoir-Seismizität entsprechend der räumlichen Ausdehnung des hydraulischen Überdrucks nur langsam zunimmt. Durch projektbegleitende seismische und hydraulische Überwachung kann frühzeitig reagiert

werden, wenn die Seismizität in ihrer Stärke einen kritischen Wert zu erreichen droht. Zusammen mit konzeptionellen Reservoir-Modellen ist die zeitnahe seismische Überwachung geothermischer Systeme der Schlüssel für den verantwortungsbewussten Umgang mit dem seismischen Risiko.

5.6.4.5.3 Schlussfolgerungen nach /GRÜ 13/

/GRÜ 13/ gibt einen umfassenden Überblick über alle Ursachen von Seismizität im westlichen Mitteleuropa und die dabei beobachteten Fakten. Unterschieden werden von ihm sieben Typen (Ursachen) induzierter seismischer Ereignisse (siehe Abb. 5.11):

1. Geothermie-bezogene Seismizität,
2. Induzierte Ereignisse in den Bereichen Bergbau und Gewinnung von Kohle,
3. Induzierte Ereignisse in den Bereichen Bergbau und Gewinnung von Steinsalz und Kali,
4. Induzierte Ereignisse in den Bereichen Bergbau und Gewinnung von Kohlenwasserstoffen,
5. Induzierte Ereignisse in den Bereichen Bergbau und Gewinnung von Erzen,
6. Induzierte Seismizität im Zusammenhang mit Stauseen,
7. Induzierte Seismizität im Zusammenhang mit schweren Regenfällen in Karstgebieten.

Anhand von Häufigkeiten des Auftretens von Ereignissen innerhalb bestimmter Größenklassen, also einer Frequenz-Magnituden-Verteilung, wird quantitativ zwischen den induzierten Seismizitäts-Typen 1 - 5 und tektonischen Erdbeben verglichen (siehe Abb. 5.12). Durch (6.) und (7.) verursachte induzierte Seismizität wird in /GRÜ 13/ auch betrachtet, aber nur qualitativ bewertet. Die menschliche Angst vor Erdbeben wird darauf zurückgeführt, dass diese ihr bevorstehendes Auftreten nicht signalisieren, diese nicht vorhergesagt werden können und tektonische Beben das Potenzial haben, schwere Schäden zu verursachen. Im Falle von induzierten seismischen Ereignissen können diese aber gut lokalisiert und ihre Dauer mit hoher Wahrscheinlichkeit auf menschliche Aktivitäten beschränkt werden.

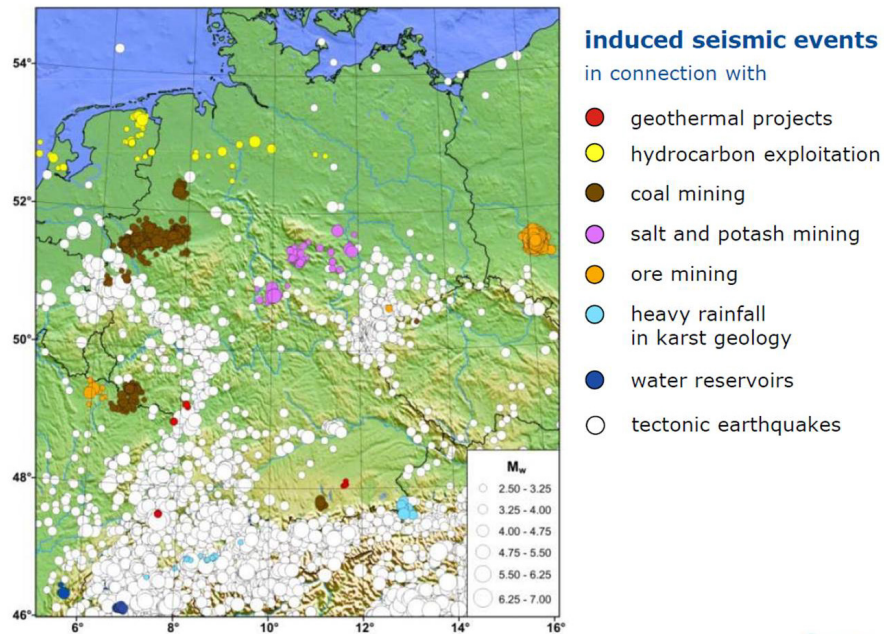


Abb. 5.11 Induzierte seismische Ereignisse im Zusammenhang mit unterschiedlichen Maßnahmen (farbige Punkte; zum Vergleich tektonische Erdbeben: weiße Punkte) (aus /GRÜ 13/)

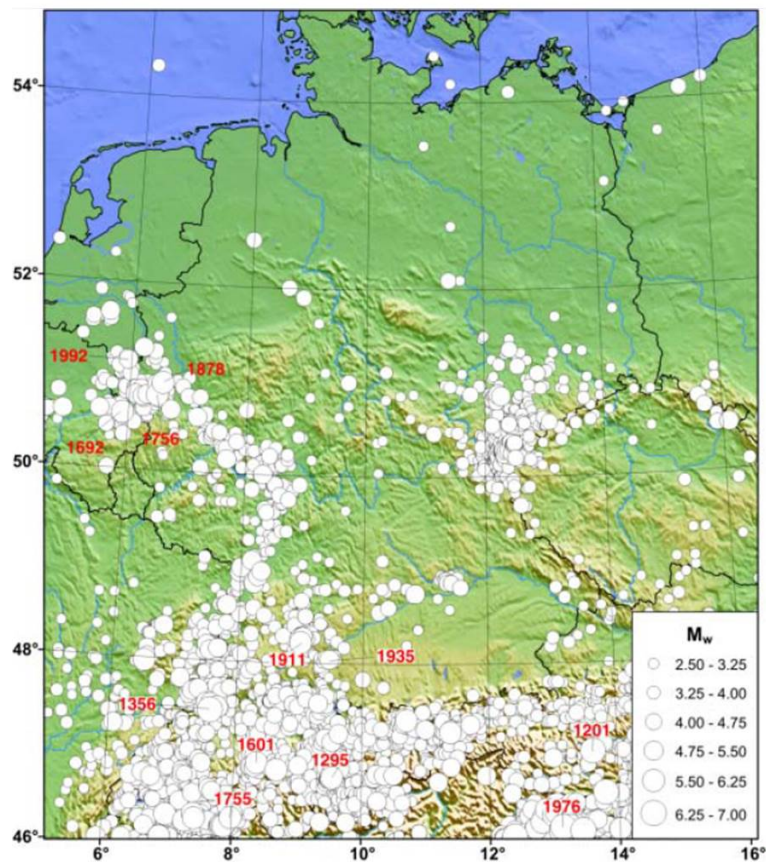


Abb. 5.12 Natürliche tektonische Erdbeben in Deutschland und benachbarten Ländern in den Jahren 1000 – 2011 (aus /GRÜ 13/)

Aus dem Vergleich der verschiedenen Seismizitätstypen lassen sich nach /GRÜ 13/ folgende Schlussfolgerungen in Hinblick auf das Auftreten seismischer Ereignisse an Geothermie-Standorten ziehen:

1. Induzierte Seismizität an Geothermie-Standorten stellt nur eine von verschiedenen Ursachen beobachteter induzierter bzw. getriggert Seismizität in einem Untersuchungsgebiet dar.
2. Die maximal beobachtete Magnitude induzierter Seismizität an Geothermie-Standorten ist die niedrigste aller Arten induzierter Seismizität (im Untersuchungsgebiet).
3. Induzierte Seismizität an Standorten von Geothermie-Projekten erzeugt eine gut begrenzte Frequenz-Magnituden-Beziehung mit einem hohen b-Wert von 1,94 im Vergleich zu anderen Seismizitäts-Arten von (z. B. $b = 1,16$ für natürliche tektonische Beben), d. h. eine relativ große Anzahl kleiner Ereignisse an Geothermie-Standorten muss auftreten, um das Auftreten größerer zu ermöglichen.
4. Die Rate des beobachteten Auftretens relevanter Magnituden⁶ ($M_w > 2,5$) an Geothermie-Standorten ist die niedrigste von allen Arten induzierter Ereignisse, d. h. sie ist ein bis zwei Größenordnungen geringer als bei tektonischen Erdbeben und z. B. zwei bis drei Größenordnungen niedriger als bei induzierten seismischen Ereignissen im Legnica / Glogau Kupferbergbaugebiet (Abb. 5.13).
5. Die maximal beobachteten makroseismischen Intensitäten an Geothermie-Standorten waren nur mäßig, mit einigen wenigen Fällen schwächster nicht-struktureller Schäden und ohne strukturelle Schäden (Abb. 5.14).
6. Im Vergleich zu der Intensitäts-basierten probabilistischen seismischen Gefährdungskarte, welche die Grundlage für die aktuelle nationale deutsche Bauordnung bildet, belaufen sich die Unterschiede in den Intensitäten zwischen denen, die maximal an Geothermie-Standorten beobachtet wurden und denen der seismischen Zonierung in der Bauordnung auf 2,5 Intensitäts-Grade.

⁶ „harmonisierte Moment Magnituden“ angegeben als M_w

Die öffentliche Besorgnis über das Auftreten wahrnehmbarer induzierter Seismizität an Geothermie-Standorten ist deshalb nach /GRÜ 13/ zwar einerseits verständlich, sie sollte allerdings nicht isoliert gesehen werden, sondern in Relation zu allen anderen Arten von Seismizität gesetzt werden, die in einer Region auftreten.

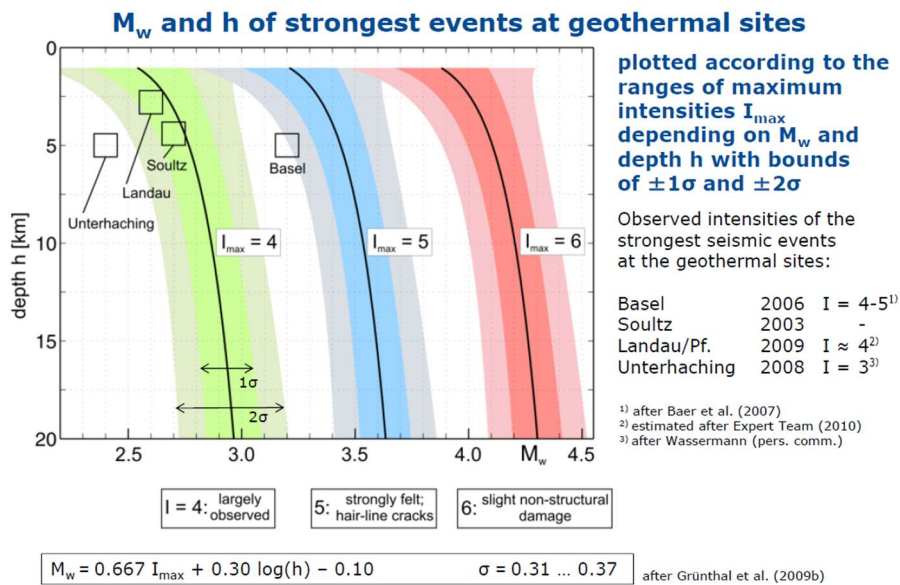


Abb. 5.13 M_w und h der stärksten Ereignisse an Geothermie-Standorten (aus /GRÜ 13/)

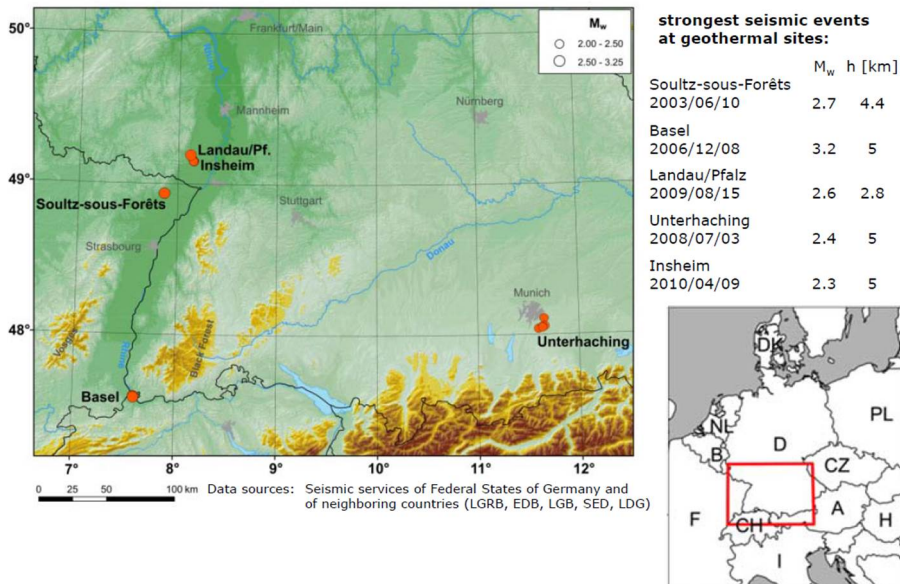


Abb. 5.14 Induzierte Seismizität an Standorten von Geothermie-Projekten (aus /GRÜ 13/)

Auch in einer zusammenfassenden Studie aus den USA /COM 13/ wird gezeigt, dass geothermale Energiegewinnung nur einen geringen Anteil an induzierter Seismizität insgesamt beiträgt (siehe Abb. 5.15).

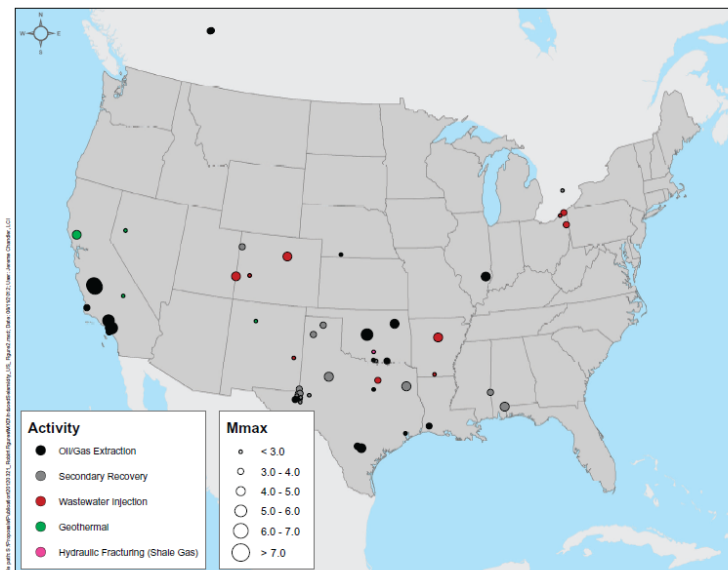


Abb. 5.15 Standorte in den USA und in Kanada, von denen induzierte Seismizität im Zusammenhang mit Energiegewinnung berichtet wird (aus /COM 13/); geothermische Energiegewinnung = grün

5.6.5 Fallbeispiele

Nachfolgend sind einige Fallbeispiele dargestellt, in denen seismische Ereignisse im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten in besonderem Maße das Interesse der Öffentlichkeit auf sich gezogen haben.

5.6.5.1 Basel

Wesentliche Quellen: /HÄR 08/, /BAI 09b/, /DEP 10/

5.6.5.1.1 Überblick

Am 08.12.2006 wurde nach /BAI 09b/ im Zuge des Ausbaus eines geothermischen Reservoirs in etwa 5 km Tiefe (siehe Abb. 5.16) unterhalb der Stadt Basel ein spürbares Erdbeben der Magnitude $M_L = 3,4$ ausgelöst, dem Sachschäden in Höhe von 7 Mio. CHF zugeschrieben wurden. Das Geothermie-Projekt wurde gestoppt und im

Rahmen einer vom Kanton Basel-Stadt beauftragten und vom Bund (CH) unterstützten Studie zunächst das Erdbebenrisiko abgeschätzt, welches durch den weiteren Ausbau und den Betrieb des geothermischen Systems verursacht werden würde.

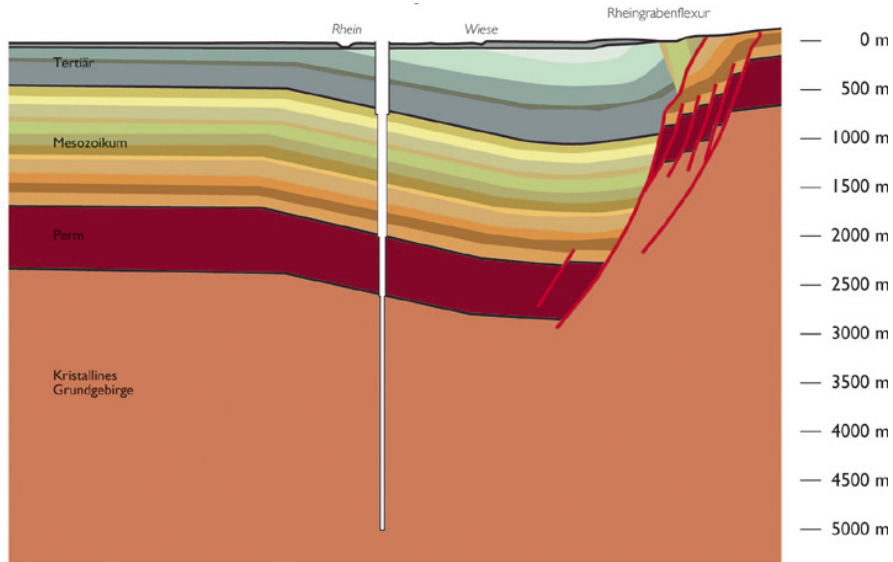


Abb. 5.16 Geologischer West-Ost-Schnitt des Gebietes um Basel (CH)

Die schematisch dargestellte Sondierbohrung für das Geothermiekraftwerk Basel-Kleinhüningen reicht ca. 5.000 m tief in das kristalline Grundgebirge unter dem Rheingraben - Quelle: http://www.planeterde.de/Members/holger-kroker/0703/2007-03-27-16-23_961237876608/view (01.08.2013)

Neben der unmittelbar durch das Geothermie-Projekt verursachten Seismizität berücksichtigt die vorliegende Studie /DEP 10/ auch den Einfluss des geothermischen Reservoirs auf die natürliche seismische Aktivität in der Region Basel. Im Vordergrund steht dabei die Frage, inwieweit das Auftreten eines großen Erdbebens durch das Geothermie-Projekt beeinflusst werden kann. Ein großes, natürliches Erdbeben hat im Jahr 1356 große Zerstörungen in der Stadt Basel verursacht.

Um dieser Fragestellung auf den Grund zu gehen, wurde zunächst ein geologisches Modell des Untergrunds im Raum Basel entwickelt. In der weiteren Umgebung des geothermischen Reservoirs wurden in diesem Zusammenhang acht relevante, natürliche Störungszonen identifiziert, deren Größe ausreichend ist, um große Erdbeben zu verursachen. Für diese Störungen wurde die seismische Aktivität abgeschätzt, d. h. in welchen zeitlichen Abständen auf diesen Störungen große Erdbeben zu erwarten sind. Durch Veränderungen der Spannungen im Untergrund kann das geothermische Reservoir den Zyklus dieser natürlichen Erdbeben beeinflussen (s. o.). Modellrechnungen

ergaben, dass diese Veränderungen sehr klein sind und nur ein vernachlässigbares Risiko darstellen /DEP 10/.

Daneben führen die mit dem Ausbau und dem Betrieb der Anlage verbundenen Vorgänge im Untergrund zu seismischer Aktivität in unmittelbarer Nähe des geothermischen Reservoirs. Für diese Prozesse wurde ein numerisches Modell entwickelt und mittels Computersimulationen sowie empirischen Vergleichen untersucht, wie sich die seismische Aktivität zukünftig entwickeln könnte (siehe /BAI 09b/). Mit hoher Wahrscheinlichkeit würden beim weiteren Ausbau und beim Betrieb der Geothermieanlage unter den gegebenen Standortbedingungen Beben auftreten, die in ihrer Stärke die bisher stattgefundenene Aktivität übersteigen. Als obere Grenze ergab sich eine Magnitude in der Größenordnung $M_L = 4,5$. In der Ausbauphase muss mit bis zu 30 spürbaren Beben gerechnet werden, von denen bis zu 9 Beben die Stärke des Bebens vom 08.12.2006 erreichen oder sogar überschreiten könnten. Während der 30-jährigen Betriebsphase muss mit 14 bis 170 spürbaren Beben gerechnet werden. Um das damit verbundene Schadensausmaß bestimmen zu können, wurde der Gebäudebestand im Umkreis von 12 km zur Anlage aufgenommen. Mit einer Klassierung dieser Gebäude nach ihrer Verletzlichkeit konnte so eine probabilistische Modellierung des seismischen Risikos durchgeführt werden. Relevante Sachschäden an Infrastrukturanlagen sind aufgrund einer eingehenden Expertenschätzung bei den zu erwartenden Beben nicht zu befürchten. Für den weiteren Ausbau des geothermischen Reservoirs wurde ein wahrscheinlichster Sachschaden von etwa 40 Mio. CHF ermittelt. Diese Summe setzt sich aus leichten, nichtstrukturellen Gebäudeschäden zusammen, die aber aufgrund der hohen Besiedlungsdichte in großer Zahl auftreten würden. Die Wahrscheinlichkeit liegt bei 15 %, dass die Schadenssumme im Extremfall sogar auf über 600 Mio. CHF steigen könnte. Während des auf 30 Jahre angenommenen Betriebs der Anlage liegt der wahrscheinliche Sachschaden bei 6 Mio. CHF pro Jahr /DEP 10/.

Während das Risiko, Personenschäden durch das Geothermie-Projekt herbeizuführen, anhand der Beurteilungskriterien der Störfallverordnung als gering zu erachten ist /BAI 09b/, kann das Sachschadensrisiko als nicht akzeptabel beurteilt werden. Diese Beurteilung ergibt sich auch aus einem Vergleich mit anderen technischen Risiken in der Schweiz, deren zusammengefasstes Sachschadensrisiko zum Teil geringer ist als dasjenige des Geothermie-Projektes.

Angesichts des erheblichen Schadensrisikos wurden alternative Konzepte zum Ausbau des geothermischen Reservoirs am Standort Basel angedacht. Für die hier untersuch-

ten Konzepte eines tiefen geothermischen Systems ist festzustellen, dass sich das Auftreten von Beben nicht vollständig verhindern lassen wird. Daher erfordern alternative Nutzungskonzepte an diesem Standort eine gesonderte Risikobewertung.

Unter dem Aspekt des seismischen Risikos ist der Standort Basel ungünstig, um ein tiefes geothermisches Reservoir im kristallinen Grundgebirge zu nutzen. Andere Standorte in der Schweiz weisen ein deutlich geringeres seismisches Risiko auf. Im Vorfeld zukünftiger Projektentwicklungen in der Schweiz gilt es daher, das standort-spezifische seismische Risiko sorgfältig zu evaluieren, wobei die in Basel gewonnenen Erkenntnisse eine wichtige Datenbasis darstellen. Im Vergleich mit den Erfahrungen aus anderen Geothermie-Projekten und nach Analyse der Daten des sistierten Projekts bleibt anzumerken, dass die in Basel durch den Ausbau des geothermischen Reservoirs verursachten Erdbeben als außergewöhnlich stark anzusehen sind. /DEP 10/

5.6.5.1.2 Zusammenfassung

Um das Erdbebenrisiko abzuschätzen, das sich aus dem weiteren Ausbau und dem Betrieb der Geothermieranlage ergeben würde, ist es nach /BAI 09b/ von großer Bedeutung, die natürlichen Veränderungsprozesse im Untergrund zu verstehen. Das mit der Geothermieranlage verbundene seismische Risiko kann nur über die Wechselwirkung mit den natürlichen Vorgängen vollständig erfasst werden.

Generell verursachen die natürlichen Verschiebungen in der Erdkruste (Plattentektonik) Spannungen im Untergrund, die sich im Laufe der Zeit aufstauen können. Wird ein kritischer Grenzwert erreicht, so können die Spannungen in Form eines Erdbebens wieder abgebaut werden. Anhaltende Verschiebungsprozesse führen zu einem erneuten Spannungsaufbau und damit zu einem Kreislauf wiederkehrender Erdbeben. Erdbeben finden entlang von Schwächezonen, so genannten Verwerfungen, statt. Dort kommt es während eines Erdbebens zu Versatzbewegungen benachbarter Gesteinsblöcke. Dabei wächst die Stärke des Erdbebens (Magnitude) mit der Größe der betroffenen Verwerfung. Für eine Risikostudie ist es deshalb erforderlich, die natürlichen Verwerfungen mit ausgedehnten Bruchflächen im Umfeld der Geothermieranlage zu identifizieren und den dort stattfindenden, natürlichen Spannungsaufbau abzuschätzen. Unter Berücksichtigung umfangreichen Datenmaterials aus publizierten Studien wurde der aktuelle Kenntnisstand bezüglich der lokalen Geologie und der natürlichen Verwerfungssysteme zusammengefasst /BAI 09b/. Generell besteht hierbei die Schwierigkeit,

dass die Verwerfungssysteme im Untergrund nicht direkt zugänglich sind. Existenz und Verlauf einer Verwerfung können oft nur indirekt abgeschätzt werden. Zwar erstrecken sich manche Verwerfungen bis an die Erdoberfläche, wo sie beobachtet und kartiert werden können. Allerdings ist deren weiterer Verlauf in der Tiefe oft mit Unsicherheiten behaftet. Diese Schwierigkeiten spiegeln sich auch darin wieder, dass trotz intensiver Forschung bis heute nicht abschließend geklärt werden konnte, auf welcher Verwerfung das schwere Erdbeben stattgefunden hat, welches im Jahr 1356 große Zerstörungen in Basel verursachte. Um diesen Unsicherheiten Rechnung zu tragen, werden im Rahmen der Risikostudie alle bekannten Verwerfungen in der näheren Umgebung des Geothermie-Standortes als möglicher Ursprung großer Erdbeben betrachtet. Die Lage der so identifizierten acht wichtigsten Verwerfungen ist in Abb. 5.17 dargestellt. Sechs dieser Verwerfungen sind groß genug, um ein schweres Erdbeben, wie das aus dem Jahr 1356, zu „beherbergen“. Die größte Verwerfung hat eine Länge von etwa 40 km. Die Tiefenerstreckung dieser Verwerfungen ist zum Teil nur schlecht belegt. Daher wurde für jede Verwerfung eine maximale Tiefenerstreckung aus vorhandenen Erdbebenmessungen abgeschätzt. So definiert die Tiefenlage der kleineren, in dieser Region regelmäßig stattfindenden Erdbeben, die maximale Tiefe, in der das Gestein noch ausreichend hohe Spannung aufnehmen kann. Gleichzeitig kann über die Erdbebenmessungen auch auf die Richtung und die Geschwindigkeit der natürlichen Verformungsprozesse im Untergrund geschlossen werden. Auf diese Weise konnte ein Modell zur Beschreibung der natürlichen Erdbebenaktivität in der Region um Basel erstellt werden /BAI 09/.

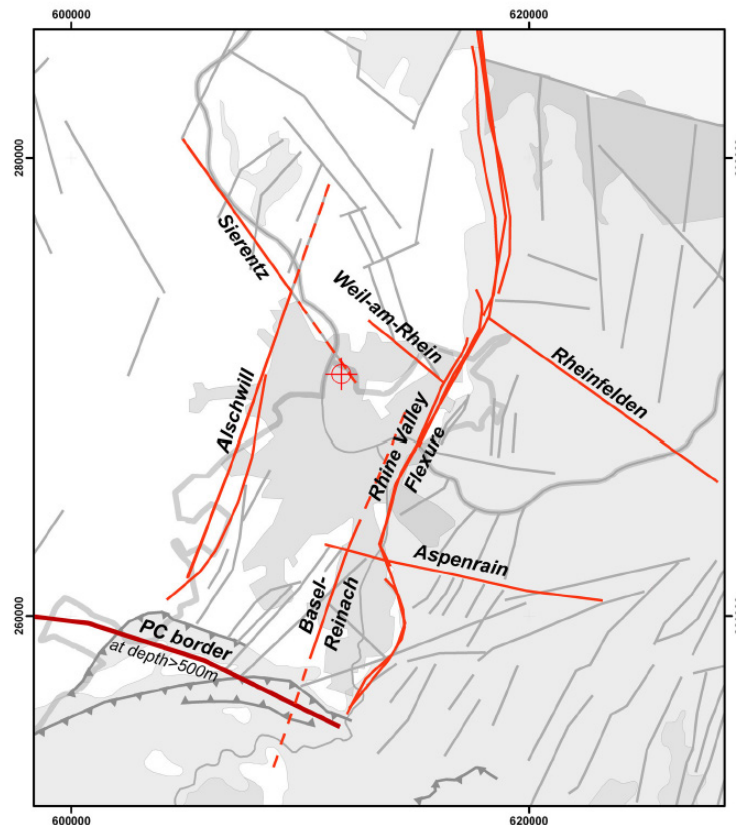


Abb. 5.17 Karte der acht wichtigsten, natürlichen Verwerfungen im Umfeld des durch ein Fadenkreuz markierten Geothermie-Standortes Basel (aus /BAI 09b/)

Neben dem Modell für die natürliche Erdbebenaktivität bedarf es auch eines Modells zur Beschreibung derjenigen Erdbeben, die durch das geothermische System verursacht wurden (induzierte Erdbeben). Während der Wasserverpressung im Dezember 2006 bewirkte der zusätzliche Flüssigkeitsdruck lokale Spannungsveränderungen im Untergrund, so dass eine Vielzahl kleinerer Erdbeben ausgelöst wurde. Die mit diesen Erdbeben verbundenen Deformationsprozesse haben die Wasserdurchlässigkeit im Untergrund erhöht. Auf diese Weise zeichnen die Orte, an denen kleine Erdbeben stattgefunden haben, die dominierenden Wasserwegsamkeiten im Untergrund nach.

Über die dreidimensionale Ortung dieser Erdbeben wurde so ein geometrisches Modell des künstlich geschaffenen, geothermischen Reservoirs abgeleitet /BAI 09b/. Dieses Modell besteht aus einer geringen Anzahl größerer Rissflächen mit erhöhter Wasserleitfähigkeit. Im Extremfall können diese Rissflächen innerhalb der Datenunsicherheiten auf einen einzelnen Riss mit einer Fläche von etwa 0,75 km² zusammen gezogen werden. Messdaten, die während der Wasserverpressung gewonnen wurden, deuten da-

rauf hin, dass die hier aktivierten Rissflächen als Schwächezonen natürlichen Ursprungs bereits existiert haben. Durch die Wasserinjektion im Jahr 2006 hat sich deren Leitfähigkeit um mehrere Größenordnungen erhöht. Die umliegende Gesteinsmatrix weist hingegen keine nennenswerte Wasserleitfähigkeit auf. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Computermodell erstellt, um die Ausbreitung des Wasserdrucks und die damit verbundene Erdbebenaktivität zu simulieren /BAI 09/. Dieses Computermodell beruht auf grundlegenden physikalischen Prozessen und wurde bewusst einfach gehalten. Trotz seiner Einfachheit kann das Modell nach /BAI 09/ die wesentlichen Beobachtungen während der Wasserverpressung im Dezember 2006 reproduzieren. Dazu zählt insbesondere, dass auch im Computermodell die stärksten Erdbeben erst unmittelbar nach der Wasserinjektion stattfinden und die Erdbebenaktivität noch über mehrere Monate anhält. Aufbauend auf diesem Computermodell wurden Simulationsrechnungen für den weiteren Ausbau und den Betrieb des geothermischen Systems durchgeführt /BAI 09/. Exemplarisch zeigt Abb. 5.18 das Modell eines Systems, bestehend aus einer Förderbohrung zur Entnahme des heißen Wassers und einer Injektionsbohrung, durch die das abgekühlte Wasser in das geothermische Reservoir zurückgeführt wird.

Aus den Computersimulationen /BAI 09b/ ergibt sich eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass beim weiteren Ausbau und Betrieb des geothermischen Systems Erdbeben auftreten, die in ihrer Stärke die bisher stattgefundenene Aktivität übersteigen würden. Als obere Grenze ergab sich eine Erdbebenstärke in der Größenordnung $M_L = 4,5$. In der Ausbauphase muss demnach mit bis zu 30 spürbaren Erdbeben gerechnet werden, von denen bis zu 9 Erdbeben die Stärke des Bebens vom 08.12.2006 erreichen oder sogar überschreiten könnten. Während der 30-jährigen Betriebsphase muss nach /BAI 09b/ mit 14 bis 170 spürbaren Erdbeben gerechnet werden. Neben den Computersimulationen wurden auch Daten vergleichbarer Geothermieprojekte herangezogen, um eine unabhängige Abschätzung der zukünftigen Erdbebenaktivität vornehmen zu können. Aus diesen Daten wurde eine empirische Beziehung zwischen der Größe eines geothermischen Reservoirs und der maximalen Erdbebenstärke abgeleitet. Übereinstimmend mit den Ergebnissen der Computersimulationen ist auch nach dieser Beziehung mit stärkeren Erdbeben während der Ausbauphase des geothermischen Systems zu rechnen, wobei die obere Grenze der Erdbebenstärke im empirischen Modell etwas geringer liegt (zwischen $M_L = 4$ und $M_L = 4,5$).

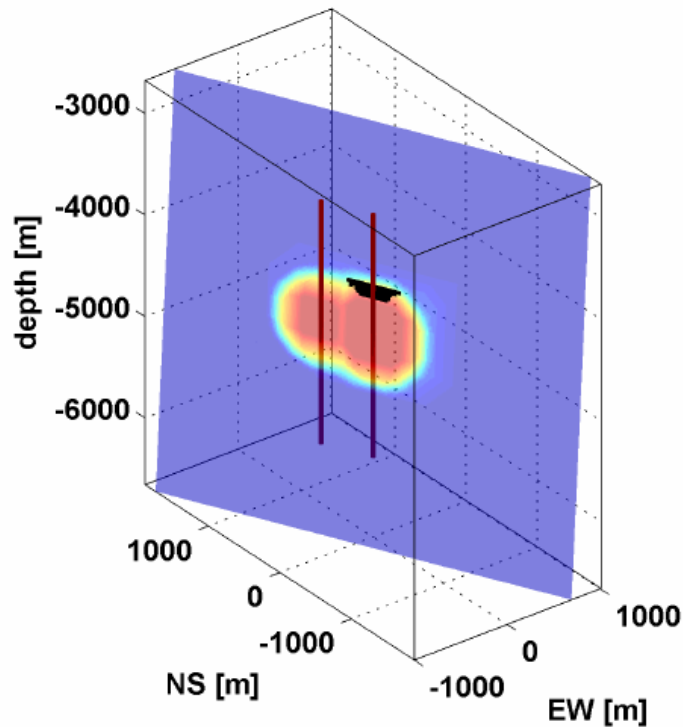


Abb. 5.18 Simulation des Ausbaus des geothermischen Systems mit einem Computermodell

Die warmen Farben kennzeichnen Bereiche erhöhter Wasserleitfähigkeit. Neben der tatsächlich existierenden Bohrung (senkrechte Linie, rechts) wurde eine zweite Bohrung im Abstand von 500 m platziert (senkrechte Linie, links). Schwarz gekennzeichnet ist der Bereich, der bei der Computersimulation der Wasserverpressung von 2006 das stärkste Erdbeben produziert hat (aus /BAI 09b/).

Obwohl die beiden unabhängigen Untersuchungen im Ergebnis zu ähnlichen Erdbebenstärken kommen, bestehen große Unterschiede in der Häufigkeit, mit der stärkere Erdbeben in der Betriebsphase zu erwarten wären. Die Erdbebenaktivität in den Computersimulationen ist maßgeblich davon abhängig, inwieweit der Wasserdruck im Langzeitbetrieb eine Entlastung an den äußeren Grenzen des Reservoirs erfährt. Je weniger Druckentlastung stattfindet, desto stärker ist die Erdbebenaktivität. Es ist sehr wahrscheinlich, dass solche Druckentlastungen auftreten, allerdings konnten diese in dem relativ kurzen Messzeitraum im Dezember 2006 nicht hinreichend bestimmt werden. Deswegen wurden die Computersimulationen ohne eine entsprechende Druckentlastung durchgeführt. Das bedeutet aber, dass die Simulationen die Erdbebenaktivität tendenziell zu hoch einschätzen. Im Gegensatz dazu tendieren die empirischen Beziehungen dazu, die Erdbebenaktivität etwas zu gering einzuschätzen. Das resultiert aus der Annahme, dass in der Betriebsphase kein weiteres Wachstum des Reservoirs

stattfindet, was sich aber nicht unbedingt vermeiden lässt. Für einen zukünftigen Betrieb wäre also davon auszugehen, dass die tatsächliche Erdbebenaktivität innerhalb des Bereichs liegt, der durch die Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Untersuchungen abgedeckt ist. In der späteren Risikoabschätzung werden beide Untersuchungsergebnisse zugelassen.

Neben den unmittelbar im geothermischen Reservoir verursachten Erdbeben wurde besonderes Augenmerk auf die Frage gelegt, inwieweit durch die Geothermieanlage die natürliche Erdbebenaktivität in der Region Basel beeinflusst werden könnte. In der Ausbau- und Betriebsphase der Geothermieanlage werden die Spannungen im Untergrund verändert. Ursache dafür sind zum einen Deformationsprozesse im Reservoir, die insbesondere während der Ausbauphase stattfinden. Zum anderen werden die Spannungen durch den zusätzlichen Wasserdruck und die allmähliche Abkühlung des Reservoirs beeinflusst. Diese Veränderungen können sich auf den natürlichen Zyklus von Spannungsauf- und -abbau auswirken.

Mit den hier abgeleiteten Modellen wurden Computersimulationen durchgeführt /BAI 09/, um diese Spannungsveränderungen zu berechnen. In Abb. 5.19 wird exemplarisch gezeigt, wie die Spannungen auf der größten der umliegenden Verwerfungen, der Rheintal-Flexur, durch den 30 jährigen Betrieb der Geothermieanlage beeinträchtigt würden. An einigen Stellen werden die Spannungen auf dieser Verwerfung erhöht (rote Farben), was einer Zunahme des seismischen Risikos entspricht. Gleichzeitig gibt es aber auch Bereiche, in denen die Spannungen verringert werden (blaue Farben), was mit einer Abnahme des seismischen Risikos gleichzusetzen ist. Um das Auftreten eines starken Erdbebens maßgeblich zu beeinflussen, müssen solche Änderungen über einen großen räumlichen Bereich wirken. So liegt dieser Bereich in der Größenordnung von 100 km² für ein Erdbeben der Magnitude $M_w = 6,5$.

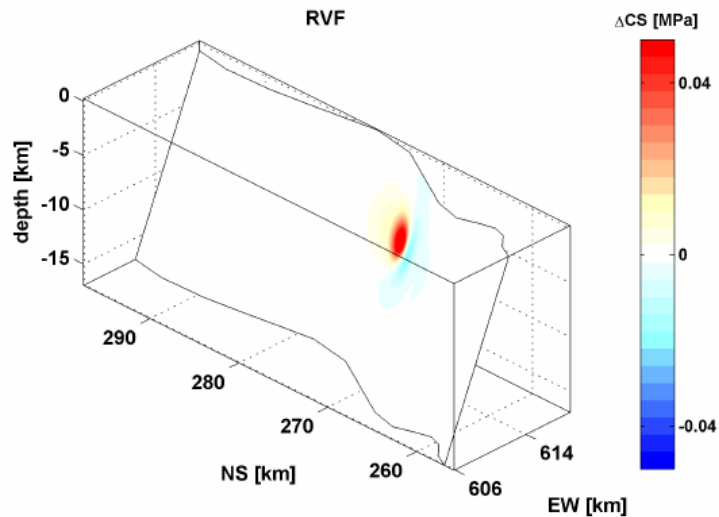


Abb. 5.19 Beispiel für die relativen Veränderungen der Spannungen auf der größten Verwerfung aus Abb. 5.17 nach einem 30-jährigen Betrieb der Geothermieranlage

Rote Farben kennzeichnen eine Spannungszunahme, blaue Farben eine Abnahme der Spannungen (aus /BAI 09/)

Für alle umliegenden Verwerfungen wurden entsprechende Computersimulationen durchgeführt /BAI 09/. Um die verbleibende Unsicherheit verschiedener Modellparameter zu berücksichtigen, wurden diese Parameter während der Simulationen systematisch variiert. Aus der Vielzahl möglicher Modelle ergibt sich dadurch eine ganze Bandbreite von Spannungsveränderungen. Allen gemeinsam ist allerdings, dass für starke Erdbeben die Größenordnung der Veränderungen sehr gering ist und damit der Zyklus dieser natürlichen Erdbeben durch Ausbau und Betrieb der Geothermieranlage kaum beeinflusst wird. Dieses zeigt sich besonders deutlich in einer probabilistischen Modellierung der Erdbebengefährdung. Hierbei wird die Wahrscheinlichkeit berechnet, mit der Erdbeben einer bestimmten Intensität auftreten, wobei die Intensität ein Maß für die Auswirkungen eines Bebens an der Erdoberfläche ist. Verglichen mit der natürlichen Erdbebenaktivität besteht eine zusätzlich erhöhte Wahrscheinlichkeit nur für Erdbeben mit geringen Intensitäten (Abb. 5.20) /BAI 09/.

Der Einfluss des geothermischen Reservoirs auf die Erdbebengefährdung ist nach /BAI 09/ während der Ausbaumaßnahmen am größten. In unmittelbarer Nähe der Geothermieranlage wird zu dieser Zeit die natürliche Erdbebengefährdung um das fünfzigfache überschritten. Mit zunehmendem Abstand zur Geothermieranlage nimmt die zu-

sätzliche Gefährdung ab. In 15 km Entfernung liegt die zusätzliche Gefährdung noch bei dem siebenfachen des natürlichen Werts.

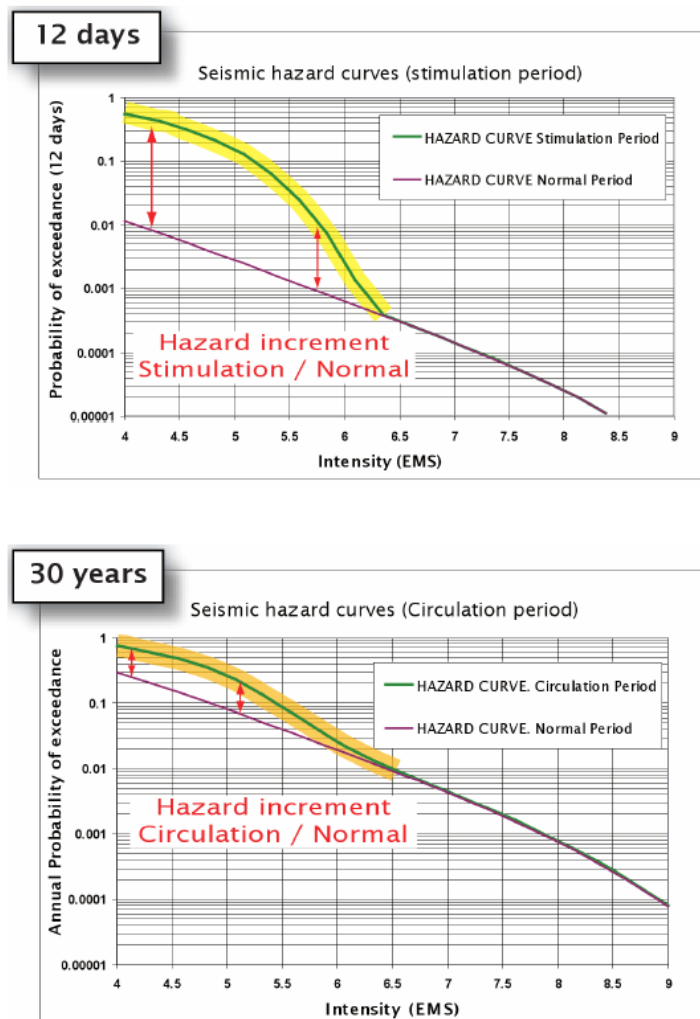


Abb. 5.20 Modellierung der Wahrscheinlichkeit (probability of exceedance), Erdbebenintensitäten (Intensity) während der zwölf-tägigen Ausbauphase (oben: stimulation period) und innerhalb eines Jahres in der insgesamt dreißig-jährigen Betriebsphase (unten: circulation period) zu überschreiten

Zum Vergleich sind auch die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten für die natürliche Erdbebentätigkeit (normal period) angegeben. Die Wahrscheinlichkeiten beziehen sich auf einen Standort in unmittelbarer Nähe der Geothermieanlage (aus /BAI 09/).

Bis hierher wurde untersucht, wie stark sich die Erdbebenaktivität durch das geothermische Reservoir verändern würde. Um das damit verbundene Schadensausmaß bestimmen zu können, wurde der Gebäudebestand im Umkreis von 12 km zur Anlage aufgenommen. Mit einer Klassifizierung dieser Gebäude nach ihrer Verletzlichkeit

konnte so eine Modellierung vorgenommen werden, um die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens einer bestimmten Schadenssumme zu bestimmen. Dieser Zusammenhang konnte über die in Verbindung mit dem Erdbeben vom 08.12.2006 kompensierten Sachschäden kalibriert werden.

Die probabilistische Modellierung des seismischen Risikos ergibt für den weiteren Ausbau des geothermischen Reservoirs einen wahrscheinlichsten Sachschaden von etwa 40 Mio. CHF. Diese Summe setzt sich aus leichten, nichtstrukturellen Gebäudeschäden zusammen, die aber aufgrund der hohen Besiedlungsdichte in großer Zahl auftreten würden. Die Wahrscheinlichkeit liegt bei 15 %, dass die Schadenssumme im Extremfall sogar auf über 600 Mio. CHF steigen könnte. Während des auf 30 Jahre angenommenen Betriebs der Anlage liegt der wahrscheinliche Sachschaden bei 6 Mio. CHF pro Jahr. Darüber hinausgehende relevante Sachschäden an Infrastrukturanlagen sind aufgrund einer eingehenden Expertenschätzung bei den zu erwartenden Beben nicht zu befürchten. Eine entsprechende Analyse wurde auch für mögliche Personenschäden, bedingt durch Gebäudeeinsturz, durchgeführt. Verglichen mit dem Risiko aufgrund der natürlichen Erdbebenaktivität ergibt sich ein kaum nennenswerter Beitrag durch die Geothermieanlage. Sowohl das Personen- wie auch das Sachschadensrisiko liegen außerhalb des Bereiches, in dem die Beurteilungskriterien der Störfallverordnung üblicherweise angewendet werden (Abb. 5.21). Die Störfallverordnung hat zum Ziel, Bevölkerung und Umwelt zu schützen vor außerordentlichen Ereignissen, die selten sind aber ein hohes Schadensausmaß aufweisen.

Beim Geothermie-Projekt sind zum einen nur geringe Personenschäden zu erwarten, die nach den Kriterien der Schweizer Störfallverordnung unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden liegen. Beurteilt man hingegen die zu erwartenden Sachschäden, so sind sie gemäß dem Maßstab der Störfallverordnung hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens und der Schadenssumme als nicht akzeptabel zu beurteilen. Eine Beurteilung des Sachschadensrisikos als nicht akzeptabel ergibt sich auch aus einem Vergleich mit anderen technischen Risiken in der Schweiz, deren zusammengefasstes Sachschadensrisiko zum Teil geringer ist als dasjenige des Geothermie-Projektes. /DEP 10/

Angesichts des erheblichen Schadensrisikos wurden alternative Konzepte zum Ausbau des geothermischen Reservoirs am Standort Basel angedacht. Aufgrund der relativ geringen natürlichen Wasserdurchlässigkeit der Gesteinsformation im derzeitiger erschlossenen Tiefenbereich sind künstliche Maßnahmen (Stimulation) erforderlich, um

den wirtschaftlichen Betrieb einer Geothermieanlage zu ermöglichen. Auch das bisher geschaffene Reservoir erscheint in der jetzigen Form ohne zusätzliche Ausbaumaßnahmen nicht nutzbar. Bei den Maßnahmen zum Ausbau würde sich das Auftreten von Erdbeben nicht vollständig verhindern lassen.

Eine Bewertung des seismischen Risikos einer Nutzung der bestehenden Bohrung in einem oberflächennahen Bereich mit einem bereits bestehenden hydrothermalen Reservoir verbunden mit dem Ausbau eines flachen geothermischen Systems wurde im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen. Es sei aber angemerkt, dass im nahe gelegenen Riehen seit etwa 15 Jahren eine Geothermieanlage zur Wärmeabgewinnung im Tiefenbereich um 1.500 m betrieben wird. Erdbebenaktivität aufgrund dieser Anlage ist nicht bekannt. Generell bleibt zu bemerken, dass alternative Nutzungskonzepte am Standort Basel eine gesonderte Risikobewertung erfordern.

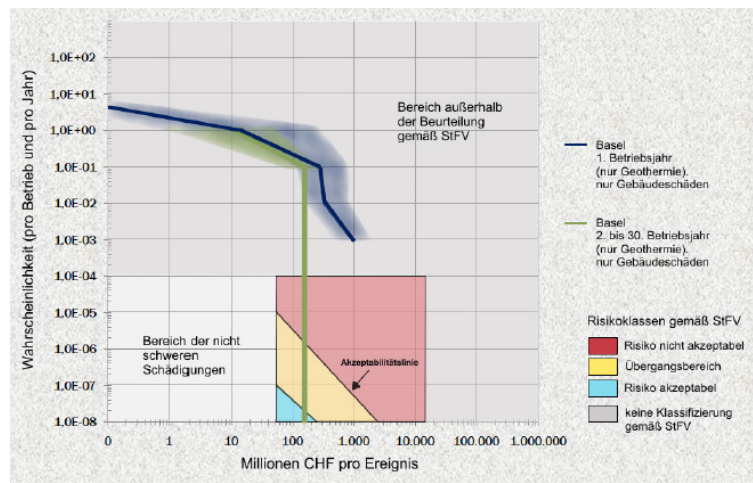


Abb. 5.21 Risikobeurteilung nach der Störfallverordnung

Im ersten Betriebsjahr sind auch Schäden aus der Ausbauphase des geothermischen Reservoirs berücksichtigt. Deshalb fallen die Schadenshäufigkeiten im ersten Betriebsjahr (blaue Linie) höher aus als in den Folgejahren (grüne Linie) (aus /BAI 09/)

5.6.5.1.3 Zusammenfassende Darstellung nach /DEP 10/

Am 08.12.2006 ereignete sich ein Erdbeben mit einer Magnitude von 3,4, das in der ganzen Region Basel deutlich spürbar war. Bis März 2007 folgten weitere spürbare Erdbeben, von denen drei Magnituden von mehr als 3 aufwiesen. Mit Hilfe eines zuvor installierten Überwachungssystems konnten alle Erdbeben genau lokalisiert werden und mit den Tätigkeiten im Bohrloch in Zusammenhang gebracht werden. Dieses Sys-

tem ermöglichte auch, bei Bohrloch­tätigkeiten die ersten Anzeichen einer erhöhten seismischen Aktivität sofort zu erkennen und das weitere Einpressen von Wasser zu stoppen.

Erdbebengefahr

Für eine Weiterführung des Projekts wäre nach /DEP 10/ eine erneute Stimulationsphase (d. h. Injektion von Wasser) von wenigen Wochen Dauer nötig gewesen. In dieser Zeit wäre es mit hoher Wahrscheinlichkeit wieder zu spürbaren Beben gekommen. Die Studie rechnet mit bis zu 30 spürbaren Beben in dieser Phase. Davon wären bis zu 9 gleich stark oder stärker als das Beben vom 08.12.2006 gewesen, wobei als obere erwartete Grenze eine Magnitude von 4,5 errechnet wurde. In der Betriebsphase des Kraftwerkes (Annahme: 30 Jahre) wäre darüber hinaus mit 14 bis 170 spürbaren Erdbeben zu rechnen gewesen. Davon hätten bis zu 50 Beben gleich stark oder etwas stärker als das Beben vom 08.12.2006 sein können. Das Risiko, dass das Geothermie-Projekt ein starkes Erdbeben, wie Basel es 1356 mit einer Magnitude von ca. 7 erlebte, auslösen könnte, wird hingegen als gering eingestuft. Das Projekt würde die theoretische Wiederkehrperiode eines solch starken Bebens, die auf 1.000 bis 3.000 Jahre geschätzt wird, um einige Jahre, höchstens um wenige Jahrzehnte, verkürzen. /DEP 10/

Beurteilung des Risikos

Die Studie /DEP 10/ vergleicht die ermittelten Risiken mit anderen technischen Risiken in der Schweiz und bewertet deren Tragbarkeit anhand der Kriterien der eidgenössischen Störfallverordnung (StFV). Der Katastrophenschutzartikel (Art. 10) des Umweltschutzgesetzes (USG) und die darauf abgestützte StFV haben zum Ziel, Bevölkerung und Umwelt vor außerordentlichen und seltenen Ereignissen mit schweren Schäden zu schützen, die durch den Betrieb technischer Anlagen verursacht werden können. Die Studie hat nun ergeben, dass zum einen das Personenschadenrisiko unterhalb der Schwelle für schwere gesellschaftliche Schäden bleibt. Beurteilt man hingegen die zu erwartenden Sachschäden, so sind sie gemäß dem Maßstab der StFV sowohl hinsichtlich der Häufigkeit des Auftretens als auch der Schadenssumme als nicht akzeptabel zu beurteilen. Die Beurteilung des Sachschadenrisikos als nicht akzeptabel ergibt sich auch aus einem Vergleich mit anderen technischen Risiken in der Schweiz, deren zusammengefasstes Sachschadenrisiko zum Teil geringer ist als dasjenige des DHM-Projektes.

Die Studie kommt zusammenfassend zum Schluss, dass unter dem Aspekt des seismischen Risikos der Standort Basel ungünstig ist, um ein tiefes geothermisches Reservoir im kristallinen Grundgebirge zu nutzen. Auch wenn alternative Erschließungskonzepte bei einer weiteren Reservoirbildung zur Anwendung kämen, ließe sich das erneute Auftreten von spürbaren Erdbeben und Sachschäden nicht entscheidend reduzieren.

Die Erfahrung in Basel hat nach /DEP 10/ gezeigt, dass Bau und Betrieb einer tiefen geothermischen Anlage bedeutende Spannungsänderungen im Untergrund hervorrufen können, welche die seismische Aktivität über längere Zeitperioden beeinflussen. Spannungsänderungen mit einer Beeinflussung der Seismizität sind aber ab einer gewissen Tiefe auch bei konventionellen hydrothermalen Geothermie-Kraftwerken ohne Stimulation des Untergrundes nicht auszuschließen. Diese Erkenntnis hat zur Folge, dass auch eine spezielle Risikobewertung verlangt werden muss, falls das im bestehenden Bohrloch bei ca. 2.500 m vermutete natürliche hydrothermale Reservoir genutzt werden sollte.

Die Basler Erfahrung hat gezeigt, dass zukünftig bei Projekten der Geothermie eine deutlich vertiefte Abklärung der Risiken notwendig ist. Weitere Grundlagen für die Beurteilung der seismischen Risiken aus Geothermieanlagen sollten in den kommenden Jahren durch nationale und internationale Forschungsanstrengungen geliefert werden. Es bleibt jedoch zu vermerken, dass nach dem aktuellen Wissensstand oberflächennahe Anlagen wie z. B. Erdwärmesonden, bei denen in einem geschlossenen Wärmeträgersystem lediglich ein Wärmetransport und -austausch stattfindet, aber keine nennenswerten physikalischen oder hydrologischen Spannungsänderungen im Grundgebirge ausgelöst werden, keiner vertieften Analyse der seismischen Risiken bedürfen.

5.6.5.2 Landau

Wesentliche Quellen: /EXP 10/, /GRO 12/

5.6.5.2.1 Übersicht

Beim Geothermie-Projekt Landau handelt es um die Nutzung eines Hydrothermalsystems (d. h. einer Heißwasser-haltigen Lagerstätte, wie z. B. auch in Unterhachingen

bei München oder Groß Schönebeck in Brandenburg). Dazu wurde in ca. 3.300 m Tiefe eine so genannte „Dublette“ (Abb. 5.22, Abb. 5.23) installiert. Ziel des Projektes war eine kombinierte geothermische Strom- und Wärmeenergiegewinnung. Die Anlage hat Ende 2007 ihren Betrieb aufgenommen. Am 15.8. und 14.9.2009 traten im Raum Landau i. d. Pfalz seismische Ereignisse der Magnitude 2,7 bzw. 2,4 auf, was zu einem rund zwei monatigen Stillstand des Kraftwerks führte. Nachdem vom zuständigen Landesministerium die Wiederaufnahme des Probebetriebs genehmigt wurde, konnte die Anlage am 26.11.2009 bei niedrigen Fließraten, einem auf zunächst 20-25 bar reduzierten Druck und einer idealen Fördertemperatur des Thermalwassers von ca. 160°C wieder an das Landauer Versorgungsnetz angeschlossen werden.

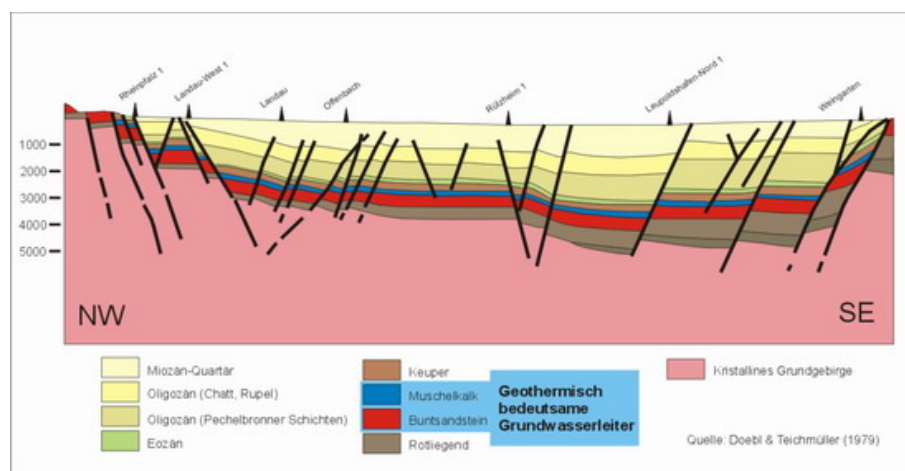


Abb. 5.22 Geologischer Schnitt durch den Oberrheingraben im Bereich Landau-Karlsruhe

Geothermisch bedeutsam sind in diesem Bereich die Schichten des Buntsandstein und des Muschelkalk - Quelle: http://www.geothermie.emerging-trails.de/43_artikel_02-Geothermie-A0007/03-BW-A0019/01-Oberrhein-A0020.html (01.08.2013)

Eine Expertengruppe „Seismisches Risiko bei hydrothormaler Geothermie“ /EXP 10/ hat das Auftreten von seismischen Ereignissen im Raum Landau umfassend analysiert und bewertet. Als Reaktion auf das Erdbeben von Landau gründete sich darüber hinaus der Forschungsverbund MAGS (Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen **Aktivität** bei der energetischen Nutzung geothermischer **S**ysteme im tiefen Untergrund) - siehe Kapitel 5.6.6.1. Der Bericht der Expertengruppe ist nachfolgend in seinen wesentlichen Aussagen wiedergegeben.

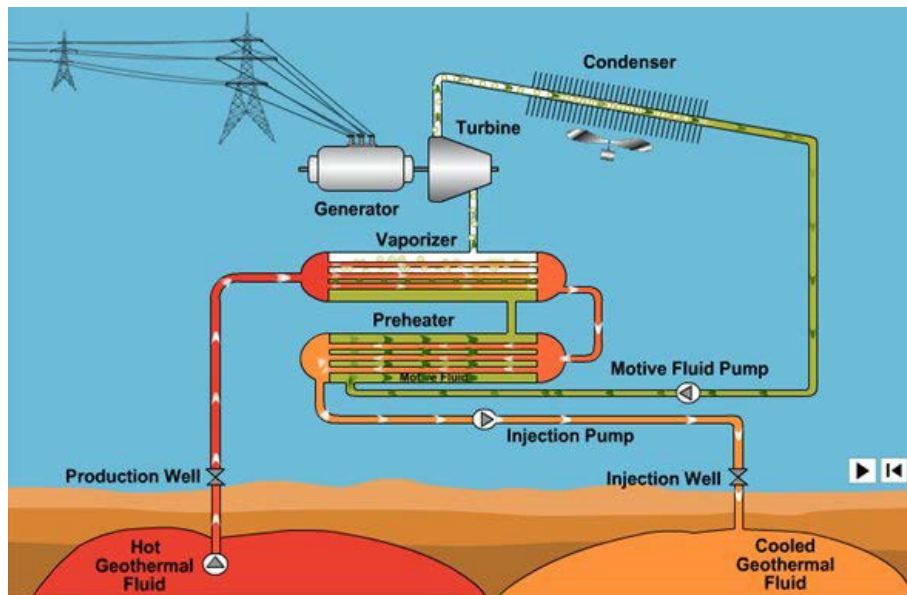


Abb. 5.23 Prinzipskizze einer geothermischen Dublette; Quelle: http://tu-freiberg.de/ze/geothermie/tg_grundlagen.html (12.03.2014)

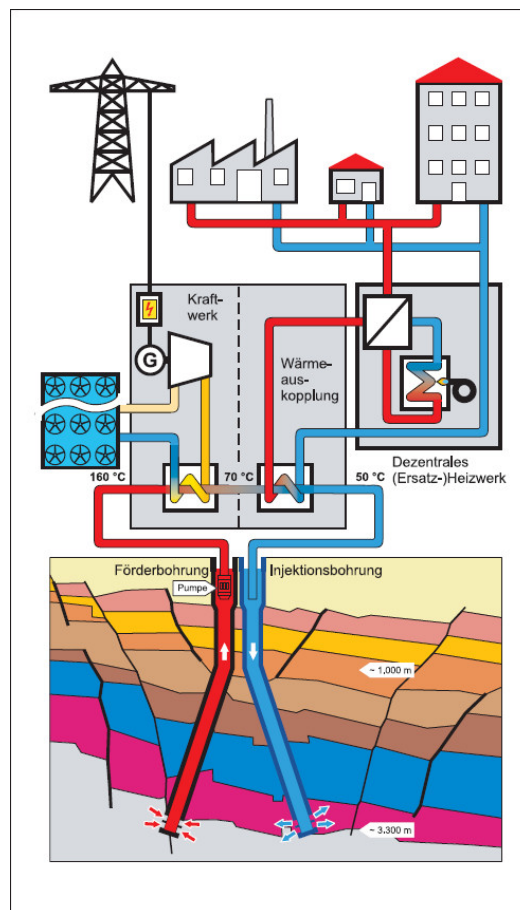


Abb. 5.24 Schematische Darstellung der Geothermie-Anlage Landau; Quelle: <http://www.bine.info/themen/publikation/geothermische-stromerzeugung-in-landau/das-kraftwerk/> 14.03.2014

Das Erdbeben vom 15.8.2009 trat in einer Entfernung von weniger als 2 km von den Bohrloch-Landepunkten des Geothermiekraftwerkes Landau unter dem Stadtzentrum von Landau i. d. Pfalz auf. Die Herdtiefe des Erdbebens lag bei $2,8 \text{ km} \pm 0,5 \text{ km}$ und damit im gleichen Tiefenbereich wie das geothermisch genutzte Reservoir. Des Weiteren hatte seit Inbetriebnahme der Geothermieanlage auch die Anzahl der nicht spürbaren Mikroerdbeben zugenommen. Zusammenfassend ist die Expertengruppe /EXP 10/ zu der Meinung gelangt, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen der Seismizität seit November 2007 im Bereich um Landau, die auch das Erdbeben vom 15.8.2009 beinhaltet, und der geothermischen Energiegewinnung in Landau sehr wahrscheinlich ist.

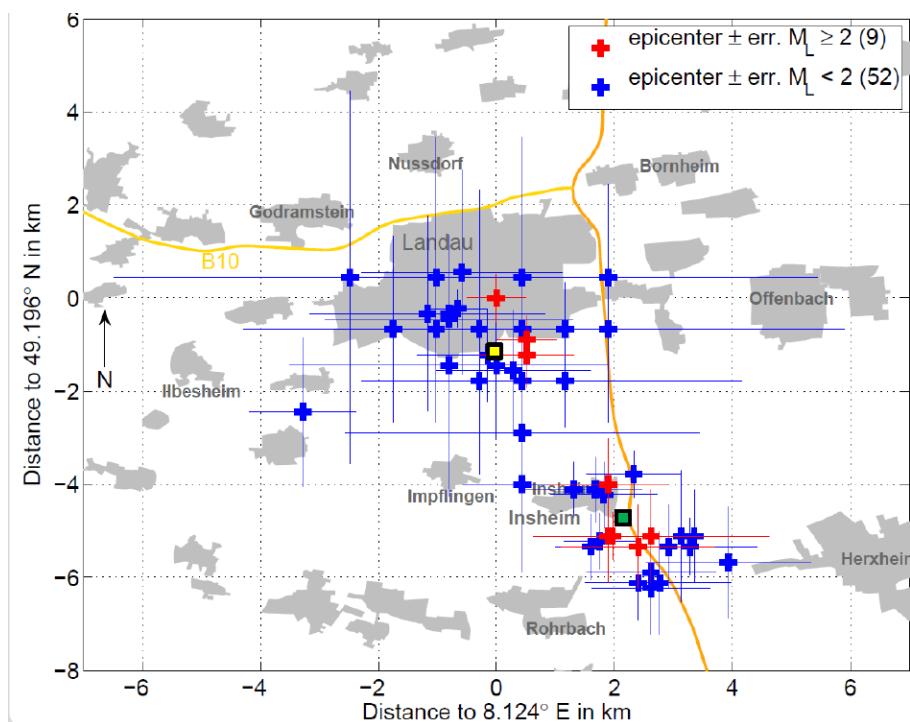


Abb. 5.25 Landau / Insheim - Seismizität von Mai 2009 bis November 2012 (gelb: Lage des Geothermie-Kraftwerkes Landau; grün: Insheim) (aus /GRO 12/)

Die Auswirkungen des seismischen Ereignisses vom 15.8.2009 wurden an Hand von Erdbebenfragebögen, Schadensmeldungen und einer Messung der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit an einem südlich des Stadtzentrums installierten Seismometer bewertet. Die Stärke des Erdbebens lag in einem Bereich, in dem leichte nichtstrukturelle Schäden an empfindlichen Gebäuden nicht mehr vollkommen ausgeschlossen werden können. Leichte strukturelle (Schäden an der Tragstruktur) oder moderate nichtstrukturelle Schäden aber sehr unwahrscheinlich sind.

Nach /GRO 12/ ergibt sich folgender Sachstand:

- Bis jetzt (Redaktionsschluss der Publikation) wurden ca. 500 seismische Ereignisse ($M_L > -0,5$) detektiert
- Die seismischen Ereignisse bei Landau sind oberhalb $M_L \sim 1,3$ wahrnehmbar
- Oberhalb $M_L \sim 1,7$ sind die seismischen Ereignisse bei Landau deutlich spürbar

Das instrumentell bestimmte Hypozentrum, die Ergebnisse der Makroseismik sowie die gemeldeten Schäden ergaben in der Synthese ein stimmiges Bild, das den engen Zusammenhang zwischen den seismischen Ereignissen und dem geothermisch genutzten Reservoir unterstreicht.

Die nach derzeitigem Kenntnisstand /EXP 10/ wahrscheinlichste Ursache des Erdbebens ist eine Erhöhung des Porenwasserdrucks, die durch die Injektion von Wasser in tiefe Gesteinsschichten hervorgerufen wurde. Dies setzte die Scherfestigkeit des Untergrundes herab, so dass im Untergrund vorhandene tektonische Spannungen durch einen Scherbruch, das Erdbeben, abgebaut wurden. Die vom Porenwasserdruck im Untergrundgestein induzierte Seismizität kann somit durch Reduktion der Fluidfließrate und des Fluiddruckes im Bohrloch reduziert werden. Die hydraulische Druckausbreitung erfolgt im Porenwasserraum und entlang von Klüften im Gestein des Untergrundes. Dieser langsame Ausbreitungsvorgang führt zu einer zeitlichen Verzögerung zwischen der Änderung des hydraulischen Drucks am Bohrloch einer Geothermieranlage und der daraus folgenden Änderung des hydraulischen Drucks im weiter entfernten Gestein, der für die Erdbebenaktivität verantwortlich ist. Tritt eine unerwünscht hohe Erdbebenaktivität auf, kann der Prozess somit nicht sofort, sondern nur zeitlich verzögert gestoppt werden.

Zur Vermeidung bzw. Reduzierung weiterer seismischer Ereignisse an den Standorten von Geothermieranlagen hat die Expertengruppe eine Reihe von Empfehlungen erarbeitet /EXP 10/:

- Genaue Beobachtung der nicht spürbaren Mikroseismizität im Umfeld der Geothermieranlage mit Hilfe von Seismometern zur Begrenzung der Erdbebenaktivität. Bei unerwünschter Zunahme der Seismizität kann dann frühzeitig die Fließrate in der Geothermieranlage reduziert werden.

- Erweiterung der vorhandenen Beobachtungsnetze (seismologisches Netz und Immissionsnetz) durch zwei unabhängige hochempfindliche Bohrlochmessstationen im näheren Umfeld des Kraftwerkes.
- Einspeisung kontinuierlicher seismologischer Wellenformdaten in Echtzeit von allen Geothermie-Kraftwerken in ein gemeinsames Datenzentrum unter Verwendung vereinheitlichter und abgestimmter seismologischer Datenformate; qualifizierte und unabhängige Kontrolle der seismologischen Auswertungen durch Einbeziehung staatlicher Dienste.
- Durchführung einer seismischen Gefährdungsanalyse: Berechnung von Überschreitens-Wahrscheinlichkeiten verschiedener maximaler Bodenschwinggeschwindigkeiten als Maß für die seismische Gefährdung anhand der bereits aufgetretenen Seismizität (probabilistische seismische Gefährdungsanalyse). Zur Lösung des Problems der möglichen Zeitabhängigkeit der seismischen Gefährdung zusätzlich numerische Reservoir-Modellierungen mit Abschätzung der durch das Geothermie-Reservoir verursachten hydraulische Druckausbreitung, der thermischen Kontraktion und der daraus resultierenden Spannungsänderungen im Untergrund (neue Ansätze zur Modellierung können sich bspw. aus /HAK 14/, /ZHA 14/ und /YOO 14/ ergeben).
- Erstellung eines Reaktionsschemas, das bereits im Voraus die Vorgehensweise bei unerwünscht hoher Seismizität festlegt (Ampel-System, siehe Kapitel 5.6.7). Das Reaktionsschema sollte dabei immer eine Schadensvermeidung zum Ziel haben und die verzögerte Reaktion des Untergrundes auf Grund der langsamen Fluidausbreitung mit berücksichtigen.
- Aufbau eines Messnetzes zur Bestimmung der Bodenschwinggeschwindigkeit nach DIN 4150, wie an den Standorten Landau und Insheim mittlerweile erfolgt. Dieses Messnetz dient im Schadensfall der Beweissicherung und soll eine schnelle Regulierung garantieren, falls entgegen dem Konzept doch Schäden aufgetreten sind.
- Enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung, um die noch offenen Fragen zur fluid-induzierten Seismizität bei tiefer Geothermie in Deutschland wissenschaftlich fundiert zu klären und anschließend die neuen Erkenntnisse schnell in die Praxis umzusetzen.

5.6.5.2.2 Seismische Gefährdungsanalyse für den Standort Landau nach /EXP 10/

Neben der eingangs genannten seismischen Gefährdung auf Grund natürlicher Erdbeben sollte nach /EXP 10/ für den Standort Landau die Berechnung der seismischen Gefährdung auf Grund induzierter Erdbeben mit einer probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse durchgeführt werden. Das typische Ergebnis einer solchen Berechnung könnte folgendermaßen aussehen [hypothetisches Beispiel, keine Berechnung]:

„Die Überschreitenswahrscheinlichkeit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit von $PGV = 3 \text{ mm/s}$ innerhalb der nächsten 30 Jahre bei konstanten hydraulischen Parametern der Geothermieanlage beträgt 10 %, während die Überschreitenswahrscheinlichkeit einer maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit von $PGV = 30 \text{ mm/s}$ bei 1 % liegt“.

- Empfehlung: Die Expertengruppe /EXP 10/ empfiehlt, die Berechnung der Überschreitens-Wahrscheinlichkeit als Funktion der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit (seismische Gefährdungskurve) innerhalb der angenommenen Laufzeit der Geothermieanlage (z. B. 30 Jahre) als Maß für die seismische Gefährdung durchzuführen.

Notwendige Schritte zur Berechnung sind die Bestimmung einer Abklingrelation der maximalen Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV , peak ground velocity) mit der Entfernung vom Erdbebenherd für induzierte (und somit flache) Erdbeben. Hierbei muss auch die Variabilität (aleatorische Unsicherheit) berücksichtigt werden, die sich aus dem unvollständigen Wissen zu zukünftigen Erdbeben-Herdmechanismen, lokalen Standorteffekten, größtenteils unbekannter dreidimensionaler Untergrundstruktur und anderen unbekanntem Faktoren ergibt. Das Seismizitätsmodell sollte an Hand der bereits aufgetretenen induzierten Seismizität und mit Hilfe des Gutenberg-Richter-Gesetzes bestimmt werden. Ob bei großen Magnituden Abweichungen vom Gutenberg-Richter-Gesetz zu erwarten sind, ist zurzeit noch Gegenstand aktueller Forschung. Daher ist die seismische Gefährdung für verschiedene Modellannahmen zur Maximalmagnitude jeweils alternativ zu berechnen. Als konservative Abschätzung ist die Gutenberg-Richter-Relation bei großen Magnituden durch eine Maximalmagnitude zu begrenzen, die dem größtmöglichen Erdbeben im Oberrheingraben entspricht. Als alternative Abschätzung ist die Gutenberg-Richter-Relation bei großen Magnituden

durch eine Maximalmagnitude zu begrenzen, die sich aus der Reservoirgröße ergibt. Die Abschätzung der Reservoirgröße ist zu belegen (z. B. Relativlokalisationen der Mikroerdbeben zur Abschätzung der Größe der seismisch aktiven Region). Neben der Gefährdungskurve (Überschreitenswahrscheinlichkeit als Funktion der Bodenschwinggeschwindigkeit) für den am stärksten gefährdeten Standort sollte die zu erwartende Bodenschwinggeschwindigkeit (z. B. bei einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 30 Jahren) auch auf einer Gefährdungskarte flächenhaft berechnet werden /EXP 10/.

Bei hoher seismischer Gefährdung ist zusätzlich eine Abschätzung der Anzahl der gefährdeten Gebäude in der Stadt vorzunehmen, um das Risiko möglicher Schäden zu bestimmen (Risiko = Gefährdung * Verletzlichkeit). Des Weiteren empfiehlt die Expertengruppe /EXP 10/ in diesem Fall auch eine Simulation (Szenario) der Auswirkungen des angenommenen Maximalbebens an der Erdoberfläche innerhalb des deterministischen Ansatzes durchzuführen, wobei die Maximalmagnitude aus der Reservoirgröße zu ermitteln ist. Nachdem die seismische Gefährdung für die angenommenen hydraulischen Betriebsparameter berechnet wurde, sollte die Änderung der seismischen Gefährdung bei einer Änderung der hydraulischen Betriebs-Parametern abgeschätzt werden.

5.6.5.3 Soutz-sous-Forêts

Wesentliche Quellen: /BAI 06/, /BAI 10/, /CUE 06/, /CHA 07/, /BAI 10/, /PLA 10/

Der Ort Soutz-sous-Forêts liegt ca. 50 km nördlich von Strasbourg im französischen Teil des Oberrheingrabens und im Zentrum der größten geothermischen Wärmeanomalie Mitteleuropas. Bereits in 1.000 m Tiefe herrschen hier Temperaturen von 100°C, statt der „normalerweise“ zu erwartenden 40°C. Diese Wärmeanomalie wird in Soutz auf den Aufstieg heißer Tiefenwässer zurückgeführt. Unterhalb von 1.000 m flacht der Temperaturgradient allerdings ab. Das kristalline Gestein (Granit) beginnt in einer Tiefe von rund 1.400 m und weist bereits von Natur aus Risse und Spalten auf. Für die Auswahl des Standortes Soutz (Abb. 5.26) sprachen die aktive Grabenstruktur und die damit verbundene relativ niedrige Gebirgsspannung, wodurch Risse im Gestein mit verhältnismäßig geringem Druck geöffnet werden können (Abb. 5.27). Die Bohrungen GPK 2, 3 und 4 haben rund 5.000 m Tiefe erreicht (Abb. 5.28).

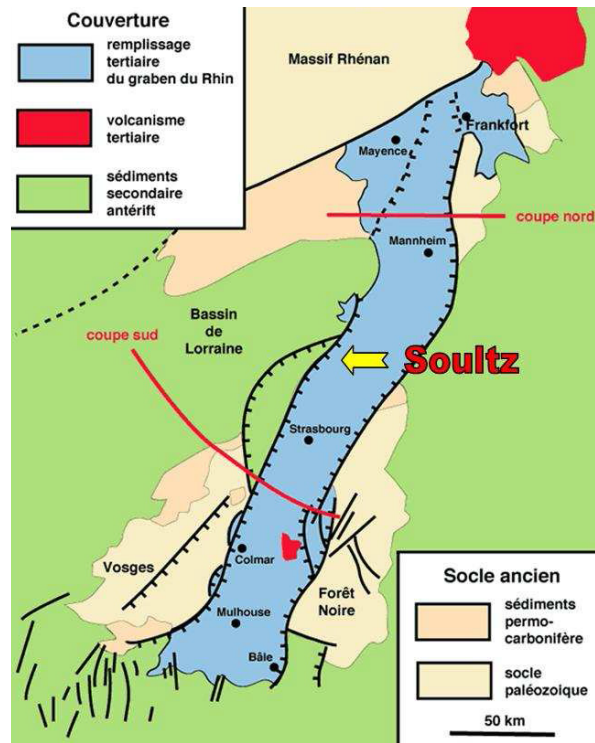


Abb. 5.26 Schematische geologische Karte des Oberrheingrabens mit Lage des Standortes Soutz-sous-Forêts; Quelle: http://data.geothermie-soutz.fr/doc.pdf/geologie_des_oberrheingrabens.pdf (12.03.2014)

Bis 4.500 m Tiefe sind diese Bohrungen verrohrt und darunter offen, um Wasser aufzunehmen bzw. zurückzuleiten. In sechs benachbarten Bohrungen wurden Lauschgeräte (Geophone, Hydrophone, Beschleunigungsmesser) installiert, die während der hydraulischen Stimulationen die Bruchgeräusche aufzeichneten. Aus diesen Daten ließ sich die Geometrie des unterirdischen Wärmetauschers ableiten (Abb. 5.29). Diese Kenntnisse wurden genutzt, um spätere Bohrungen gezielt an den Rand bereits stimulierter Gebiete zu platzieren.

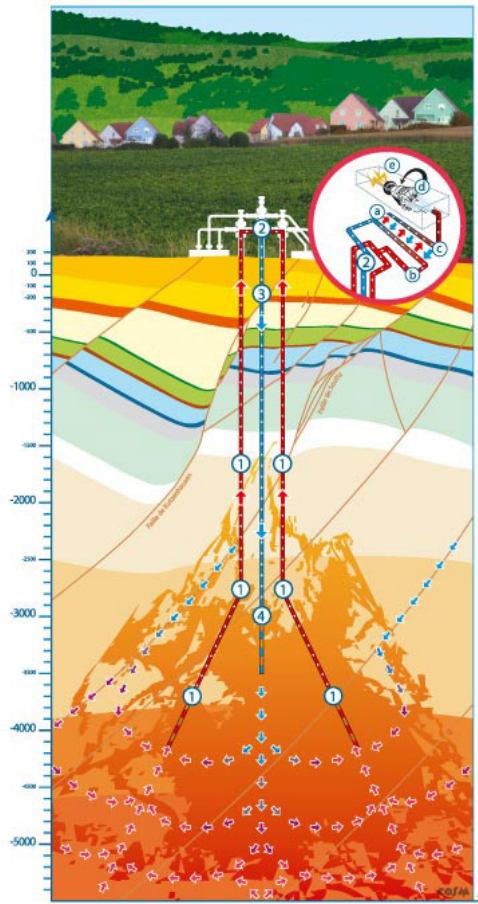


Abb. 5.27 Prinzipskizze der Geothermie-Anlage Soutz-sous-Forêts

1 Entnahme heißen Wassers über Produktionsbohrungen, 2 Oberirdischer Wärmetauscher, 3 Rückführung des abgekühlten Wassers in den Untergrund, 4 Re-Injektion in den unterirdischen Wasserkreislauf mit Erwärmung bis auf 200°C; Quelle: <http://www.lithotheque.site.ac-strasbourg.fr/hommes/sources-denergies/la-geothermie-profonde-en-alsace> (12.03.2014)

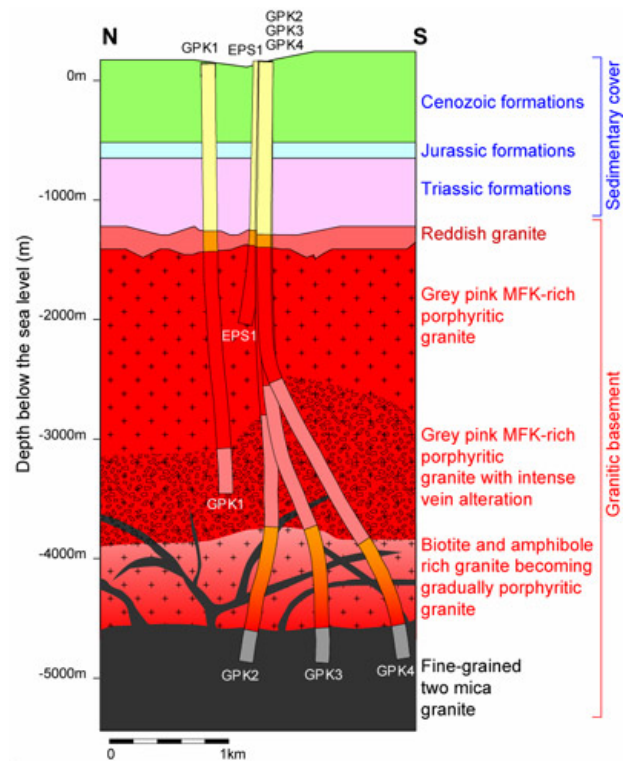


Abb. 5.28 Schematisches geologisches Querprofil am Geothermiestandort Soultz-sous-Forêts mit Lage der wichtigsten Bohrungen; Quelle: <http://www.geothermie-soultz.fr/> (09.04.2013)

Nach Betreiberinformationen (<http://www.geothermie-soultz.fr/>)⁷ wurden während der einzelnen hydraulischen Stimulationen mittels eines untertägig installierten, seismischen Netzwerkes mehrere 10.000 seismische Ereignisse am Standort Soultz gemessen (nach /BAI 10/ mehr als 114.000). Erste seismische Ereignisse wurden dabei gleich zu Beginn der Injektion registriert und werden als Ergebnis der veränderten hydraulischen Rahmenbedingungen angesehen. Bei Unterbrechung der Injektion wurde ein weitgehender Rückgang der Erdbebenaktivität beobachtet, der mehrere Tage in Anspruch nehmen kann. Die weit überwiegende Mehrheit dieser Erdbeben sind so genannte "Mikro-Erdbeben", die insgesamt sehr schwach sind und deren Energie mit zunehmender Fortpflanzung der Erdbebenwellen im Untergrund so gedämpft wird, dass sie an der Oberfläche nicht wahrzunehmen sind. Ihre Stärke auf der Richterskala schwankt zwischen ca. -2 (Mindestnachweisgrenze des hochauflösenden Forschungsmessnetzes in Soultz) und 1,8. Sehr vereinzelt wurden jedoch auch Mikrobe-

⁷ Diese Webseite ist seit Herbst 2013 nicht mehr allgemein zugänglich

ben größerer Magnituden gemessen, ein Ereignis im Rahmen der Stimulation war an der Erdoberfläche spürbar (nach /BAI 09a/ und /BAI 09b/ weist das Geothermie-Projekt am Standort Soultz-sous-Forêts aber auch die stärksten bis heute bei petrothermalen Projekten beobachteten Magnituden von 2,9 auf, vgl. Tab. 5.1 - aus dieser Tabelle ist auch ersichtlich, dass derartige Ereignisse erst nach Beendigung der hydraulischen Stimulation stattgefunden haben). Bei der hydraulischen Stimulation einer Bohrung traten in Soultz im Mittel etwa zehn seismische Ereignisse mit einer Stärke um Magnitude 2 oder darüber auf. Bei Anwendung chemischer Stimulation zeigte sich dagegen praktisch keine induzierte Seismizität. Die Stärke der Mikro-Erdbeben, die im Zuge der hydraulischen Zirkulationstests zu beobachten gewesen sind, ist mit derjenigen von Stimulationstests nicht zu vergleichen. Unter Bedingungen, die sich dem Anlagenbetrieb annähern, d. h. beim Betrieb der Förderpumpen, wurde nur eine sehr geringe Mikro-Erdbeben-tätigkeit beobachtet.

Nach /BAI 06/ u. a. haben die Stimulierungsaktivitäten am Geothermie-Standort Soultz-sous-Forêts allerdings auch mehrere seismische Ereignissen induziert, die an der Erdoberfläche gespürt wurden und in der Öffentlichkeit größere Besorgnis über mögliche Schäden hervorgerufen haben.

5.6.5.3.1 Induzierte Seismizität am Standort nach /BAI 06/

Die Injektion großer Flüssigkeitsmengen mit hohem Druck (im Englischen als „Shear Dilatation Stimulation“ bezeichnet) stellt heutzutage eine Art Standard-Technologie für die Erschließung tiefer geothermischer Reservoiren dar. Insbesondere in kristallinen Gesteinen werden derartige Injektionsmaßnahmen allerdings durch das Auftreten von induzierter Seismizität begleitet. Ein detailliertes Verständnis der Mechanismen, die solche größeren Ereignisse verursacht haben, ist deshalb erforderlich. Mehrere Studien auf diesem Gebiet geben Hinweise darauf, dass die kumulativen seismischen Ereignisse mit dem injizierten Flüssigkeitsvolumen /MCG 76/ zunehmen. Das zugrunde liegende Konzept ist ein physisches Hydrauliksystem ohne Abstrom in das Fernfeld (geschlossenes System). Hydraulische Energie, die diesem System zugefügt wird, wird in Form von elastischer Energie gespeichert, bis weitere Entspannungsprozesse (z. B. seismische Ereignisse) auftreten. Beobachtungen an verschiedenen geothermischen Standorten zeigen aber, dass vergleichsweise große Magnituden-Ereignisse (d. h. bis zu $M \sim 3$) in der sog. „shut-in-Phase“ nach Abschluss der Injektion auftreten (seismische Energie-Freisetzung während der shut-in-Phase um einen Faktor 3 höher als während der vorangegangenen Stimulation). Basierend auf Beobachtungen am Ge-

othermie-Standort Soultz-sous-Forêts (Frankreich) ist von /BAI 06/ ein konzeptionelles Modell zur Erklärung dieser Post-Injektions-Seismizität und ihrer Tendenz, relativ starke seismische Ereignisse zu produzieren, entwickelt worden. Nach diesem Modell tritt induzierte Seismizität nur auf bereits bestehenden Bruchflächen durch eine Reduzierung der effektiven Normalspannung auf. Diese Bruchflächen setzen sich aus kleinen Frakturen im mm-Maßstab zusammen, die unabhängig gleiten können, aber mit benachbarten Frakturen ähnlich einem Block-Feder-Modell gekoppelt sein können („Kluftgruppen“). Je nach räumlichem Fluiddruck-Gradienten können dann benachbarte Kluftgruppen gleichzeitig überkritisch werden und in Form eines einzigen seismischen Ereignisses vergleichsweise großer Magnitude abgleiten. Das von /BAI 06/ vorgeschlagene Modell deutet darauf hin, dass die beobachtete Post-Injektions-Seismizität durch den einfachen Prozess einer anhaltenden Druck-Diffusion beschrieben werden kann, ohne zusätzliche Auslösemechanismen einbeziehen zu müssen.

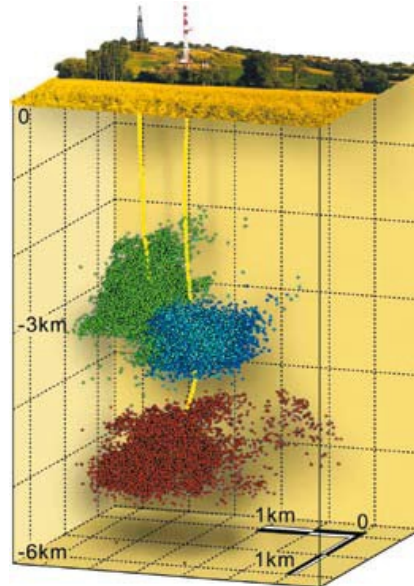


Abb. 5.29 Drei Generationen von künstlich erzeugten Rissen ("Fracns") durch hydraulische Stimulation in unterschiedlichen Tiefenlagen am Standort Soultz-sous-Forêts

Jeder Punkt kennzeichnet ein durch das Einpressen von Wasser verursachtes mikro-seismisches Ereignis, die Punktwolken zeigen die künstlich erzeugten Wärmetauschflächen (aus /WIE 02/).

Ausführlich dargestellt und intensiv diskutiert sind Modellvorstellungen in der eingangs aufgeführten Literatur (/BAI 06/, /BAI 10/, /CUE 06/, /CHA 07/, /BAI 10/, /PLA 10/). Auch das Projekt GEISER befasst sich mit dem Geothermie-Standort Soultz-sous-Forêts. Eine ausführliche Literaturliste (Stand: 21.02.2013) ist unter dem Link http://labex-geothermie.unistra.fr/IMG/pdf/soultz_bibliographic_reference_list_2013.pdf abrufbar (12.03.2014).

5.6.5.4 Bayerische Molasse

Wesentliche Quellen: /SCH 12a/, /BAY 10/

Der Malm (Oberer Jura) des süddeutschen Molassebeckens ist als Kluft-Karst-Aquifer das bedeutendste hydrogeothermische Reservoir in Mitteleuropa, sowohl für die Wärmebereitstellung wie für die Erzeugung von elektrischem Strom. Dreizehn in Produktion befindliche oder abgeteufte Dubletten und Tripletten im Großraum München verdeutlichen das große, auch wirtschaftlich nutzbare geothermische Potenzial.

Die potenzielle gegenseitige Beeinflussung geothermischer Dubletten und die Erforschung des Zusammenhangs seismischer und hydraulischer Parameter standen im Mittelpunkt des Verbundvorhabens „Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München“ /SCH 12a/. Die 3D-Seismik Unterhaching, ein 3D-Strukturmodell, ein hydrogeologisches Modell sowie ein 3D-Temperaturmodell bildeten die Grundlage für die numerische thermisch-hydraulische Modellierung. Das 3D-Strukturmodell des Großraums München wurde aus der 3D-Seismik Unterhaching, 2D-seismischen Profilen und Bohrungsdaten abgeleitet. Auf Basis der 3D-Seismik Unterhaching und detaillierter Lithofazies-Bestimmungen an Cuttings im Kernaussagebiet wurden Riff- und Beckenbereiche auskartiert. Unterschiedliche seismische Signaturen, seismische Attribute und Variationen in den Intervallgeschwindigkeiten charakterisieren den Untergrund geophysikalisch und wurden unter Einbeziehung geologischer und hydrogeologischer Informationen sowie Bohrlochmessungen hinsichtlich hydraulisch leitfähiger Bereiche interpretiert. Die Interpretation der Zuflussbereiche in den Geothermie-Bohrungen und die aus Pumpversuchen abgeleitete Transmissivitätsverteilung im Modellgebiet sind die Grundlage eines vereinfachten hydrostratigraphischen Typprofils.

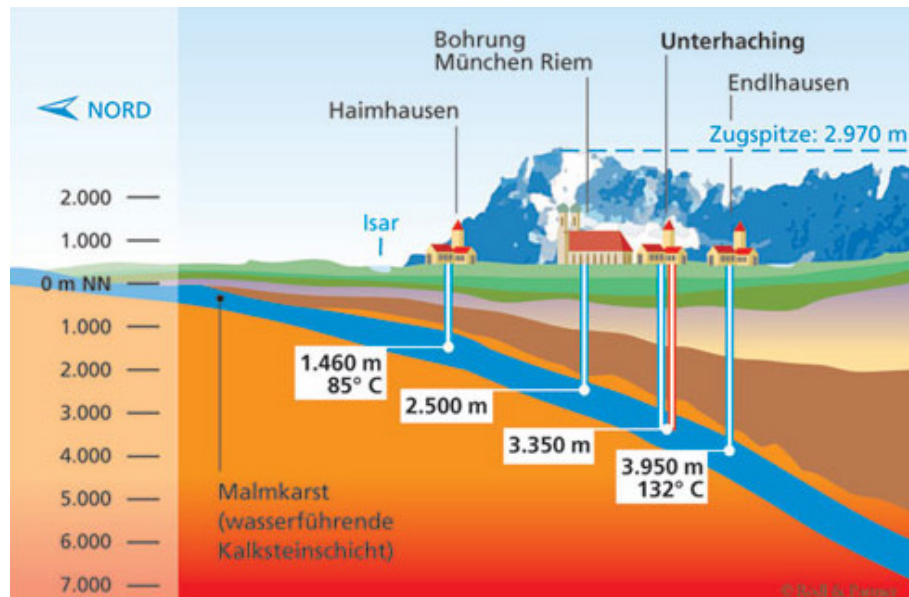


Abb. 5.30 Nord-Süd-Schnitt durch das Voralpenland mit Lage des Geothermie-Projektes Unterhaching; Quelle: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/bilder/allgemein/image/pjpeg/pilot_geothermie_grafik.jpg (14.07.2013)

Im Jahre 2008 trat in der Nähe der Injektionsbohrung Unterhaching Gt 2 Mikroseismizität mit Lokalmagnituden von 2,0 bis 2,4 auf. Dies war Anlass, ein seismologisches Monitoring im Umfeld der Bohrung in das Verbundvorhaben zu integrieren. Im Zeitraum Januar 2010 bis November 2011 konnten 101 Mikrobeben vom lokalen Monitornetz aufgezeichnet werden. Die Magnituden lagen meist zwischen -0,5 und +1,0; ein Mikrobeben mit der Magnitude 2,1 fand am 27.05.2010 statt. Ein Großteil der Epizentren liegt im Umkreis von 500 m um den Landepunkt der Bohrung Unterhaching Gt 2. Die Hypozentren befinden sich sehr einheitlich innerhalb eines Tiefenintervalls von etwa 300-400 m. Sie kommen dabei etwa 1,0-1,5 km unterhalb des Landepunktes zu liegen, also deutlich unter dem Jura im Kristallin. Dabei ist zu beachten, dass die Herdtiefenbestimmung mit größeren Fehlern behaftet ist als die Epizentrenbestimmung. Die Ereignisse reihen sich grob entlang eines ca. 45° streichenden Verlaufs auf; damit ist ein Zusammenhang mit der ähnlich streichenden Hauptstörung, die aus der 3D-Seismik bekannt ist, sehr wahrscheinlich. Da sowohl Top als auch Basis des Malm von dieser Verwerfung betroffen sind, gilt als sicher, dass diese Störung tief ins Kristallin reicht. Eine zeitliche Korrelation zwischen dem Auftreten von Mikroseismizität mit Änderungen der Betriebsparameter der Reinjektionsbohrung Unterhaching Gt 2 ist nicht erkennbar. Ein möglicher Zusammenhang ist jedoch weiterhin Gegenstand der Forschung im

Rahmen des vom BMU geförderten Verbundprojektes „Mikroseismische Aktivität Geothermischer Systeme (MAGS)“ (siehe Kapitel 5.6.6.1).

Das seismische Risiko ist i. W. von /BAY 10/ beschrieben. Wie bei allen menschlichen Eingriffen in den Untergrund (z. B. Bergbau, Erdöl- und Erdgasförderung, Talsperren und Tunnelbau) können auch durch die tiefe Geothermie Erschütterungen im Untergrund hervorgerufen werden, die als induzierte Seismizität bezeichnet werden. Induzierte Seismizität tritt zunächst vor allem bei der Nutzung petrothermaler Systeme auf, da hier durch die Erzeugung von neuen Rissflächen oder dem Aufweiten von vorhandenen Rissflächen im Gebirge zwangsläufig kleine Erschütterungen erzeugt werden, die jedoch in der Regel an der Oberfläche nicht spürbar sind. Diese Erschütterungen werden jedoch mit Messstationen beobachtet und zur Ortung der erzeugten Risse verwendet. In tektonisch und seismisch aktiven Zonen wie z. B. dem Rheingraben ist jedoch nicht auszuschließen, dass durch diese Erschütterungen bzw. durch die Erhöhung des Poren- oder Kluftwasserdruckes bestehende Spannungen im Untergrund gelöst werden, was zu an der Oberfläche spürbaren Erschütterungen führen kann (Beispiel Geothermie-Projekt Basel/Schweiz). In solchen Gebieten kann auch eine hydrothermale Geothermienutzung – vermutlich durch Veränderungen des Flüssigkeitsdruckes im Gebirge – induzierte Seismizität zur Folge haben. Die daraus resultierenden seismischen Ereignisse liegen in etwa zwei bis fünf Kilometer Tiefe, haben meist eine sehr geringe Magnitude und verursachen in der Regel keine Schäden (Beispiel Geothermie-Projekte Landau und Insheim), dennoch wird seitens der Bergbehörden bei Projekten z. B. im Rheingraben ein entsprechendes Monitoring vorgeschrieben. Auch in Bayern wurden im Umfeld einer bestehenden Geothermianlage erstmals seismische Ereignisse mit sehr geringer Magnitude registriert. Es kann jedoch bislang nicht zweifelsfrei belegt werden, dass diese seismischen Ereignisse tatsächlich durch die Geothermienutzung verursacht sind und es sich somit um induzierte Seismizität handelt. Grundsätzlich ist allerdings davon auszugehen, dass in tektonisch ruhigen und weitgehend aseismischen Gebieten wie z. B. dem bayerischen Molassebecken eine hydrothermale Energienutzung zwar induzierte Seismizität zur Folge haben kann, aber dadurch keine seismischen Ereignisse ausgelöst werden können, deren Magnitude die Schwelle zu Schadböden überschreitet. Die bisherigen Erfahrungen aus über 10 Jahren hydrothormaler Energiegewinnung im bayerischen (seit 1998) und oberösterreichischen (seit 1996) Teil des Molassebeckens bestätigen diese Einschätzung.

5.6.5.5 Sachsen

Wesentliche Quellen: /LUL 11/

Die natürliche Seismizität ist ein Ausdruck des natürlichen Spannungszustandes der Erdkruste, der für die tiefe Geothermie sowohl für die Erschließung des Reservoirs und als auch für die potenzielle Stärke der zu erwartenden induzierten Seismizität berücksichtigt werden muss. In Deutschland erfolgt die Einschätzung der natürlichen (tektonischen) seismischen Gefährdung durch eine Unterteilung in vier Erdbebenzonen. Dabei wird die zu erwartende Intensität nach der EMS-Skala an der Erdoberfläche angegeben. Grundlage dafür ist die DIN 4149:2005-4. In einer solchen „prohabilitistischen“ Erdbebenzonenkarte werden:

- die Wahrscheinlichkeit des Wiederauftretens eines Erdbebens für einen bestimmten Punkt angegeben,
- ein Grenzwert („Bemessungswerte“) der Erschütterung („Bodenbeschleunigung“) zugeordnet,
- das Schwingungsverhalten des Untergrundes („elastisches Antwortspektrum“) berücksichtigt und
- das Verhalten des geologischen Untergrundes einbezogen.

Dabei spiegelt sich die Häufigkeit und Stärke historischer Beben in einer bestimmten Region wider. In Sachsen treten die Erdbebenzonen 0, 1 und 2 auf. Diese entsprechen einer zu erwartenden EMS-Intensität von VI bis VII (leichte bis mittlere Gebäudeschäden). Während die Vorzugsgebiete Freiberg und Elbezona außerhalb der angegebenen Erdbebenzonen liegen, befindet sich das Vorzugsgebiet Aue innerhalb der Zonen 0 bzw. im Grenzbereich der Zone 1 (Abb. 5.31).

Unter induzierter Seismizität werden seismische Erschütterungen verstanden, die durch anthropogene Einwirkungen hervorgerufen werden. Bei der petrothermalen Geothermie erfolgt die Gewinnung der geothermischen Energie aus dem tieferen Untergrund unabhängig von Wasser führenden Horizonten. Nach Abteufen einer Bohrung wird durch das Einpressen von Wasser das natürlich vorhandene Kluftsystem geweitet oder neue Klüfte (*fracs*) geschaffen. Die natürliche Permeabilität wird erhöht, und zusätzliche und bessere Wasserwegsamkeiten werden geschaffen; das Gebirge wird „stimuliert“ (*hydraulic fracturing*, Stimulation). Stimulationen müssen ihrer Natur nach mit seismischen Ereignissen einhergehen.

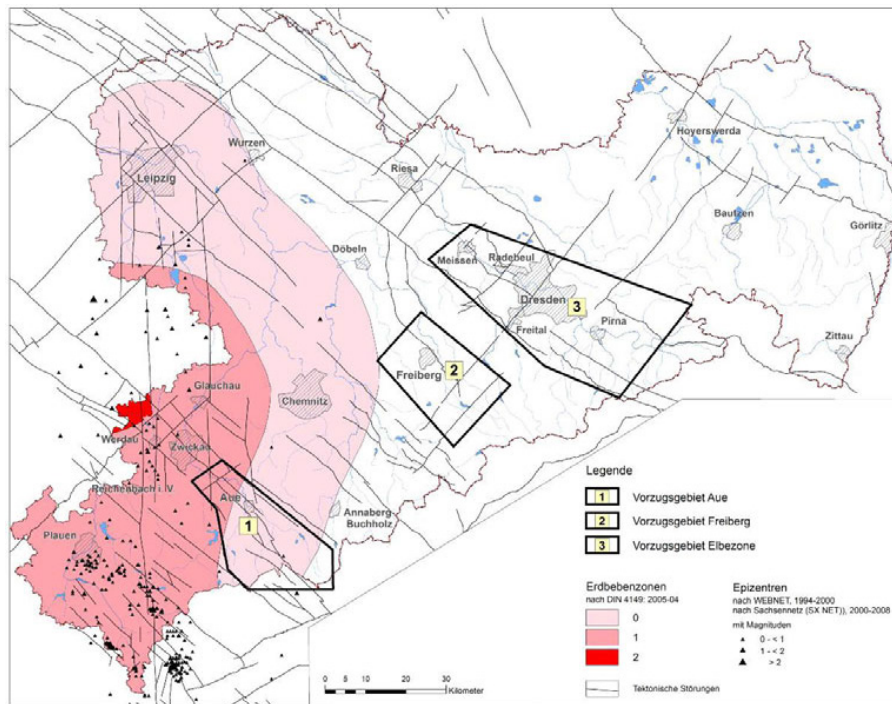


Abb. 5.31 Erdbebenzonen und Epizentren seismischer Ereignisse in Sachsen im Zeitraum 1994 – 2008 sowie Vorzugsgebiete für Geothermie-Projekte (aus /LUL 11/)

Es besteht die Möglichkeit, dass die entstehenden Erschütterungen die Wahrnehmbarkeitsschwelle an der Erdoberfläche überschreiten. Das Auftreten von induzierter Seismizität wird aber bis zu einem gewissen Grade als beurteilbar, prognosefähig und zum Teil als beeinflussbar angesehen. Schlüssel hierzu sind laufende Messungen, Kontrollen des Injektionsdrucks und ein seismologisches Monitoring in der näheren und weiteren Umgebung der Anlage. Die Stärke der induzierten Ereignisse wird nach dem derzeitigen Kenntnisstand durch unterschiedliche Faktoren beeinflusst. Es sind einerseits natürliche, lagerstättenspezifische Parameter wie das anliegende Spannungsfeld, verschiedene Gesteinsparameter und das vorhandene Kluftvolumen. Andererseits kann die Stärke der Ereignisse auch durch technologische Parameter wie die Injektionsmenge und Injektionsdauer des Wassers sowie die Höhe des Druckes beeinflusst werden. Die Lage des Gebietes in einer bestimmten Erdbebenzone kann ebenfalls eine Rolle spielen. Die genauen Ursachen und Wechselwirkungen sind von Lokalität zu Lokalität verschieden und sind Gegenstand mehrerer derzeit laufender Forschungsprojekte.

Zu dieser Thematik gibt es international und bundesweit verstärkte Aktivitäten. Ziel ist es, eine möglichst standardisierte Vorgehensweise bei der Gefährdungsabschätzung

von Tiefengeothermie-Projekten abzuleiten. Das GFZ Potsdam ist federführend im europäischen Verbundprojekt GEISER (Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs) tätig (siehe Kapitel 5.6.6.3), die BGR ist Koordinator für das BMU-Verbundprojekt MAGS (Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund, Kapitel 5.6.6.1). Der Forschungsverbund hat im Rahmen des MAGS-Projektes ein zusätzliches Teilthema zur Auswertung der durch den Grubenwasseranstieg induzierten Seismizität im Vorzugsgebiet Aue konzipiert. Beide Projekte begannen erst 2010, so dass kurzfristig keine konkreten Ergebnisse für ein sächsisches Tiefengeothermieprojekt zu erwarten sind. Unabhängig davon ergibt sich für ein sächsisches Geothermie-Projekt die Schlussfolgerung, dass in jedem Fall entsprechende Untersuchungen während der Bohrarbeiten, bei der Stimulierung und beim Betrieb der Anlage erfolgen müssen (mikroseismisches Monitoring).

5.6.5.6 Norddeutsche Tiefebene

Wesentliche Quellen: /JAR 94/, /BAL 01/, /KÖT 07/

Die Norddeutsche Tiefebene stellt in Deutschland das größte Gebiet dar, das grundsätzlich für die Gewinnung von geothermischer Energie geeignet ist. Allerdings existieren in der norddeutschen Tiefebene entsprechend den regionalen tektonischen Verhältnissen des nördlichen Mitteleuropas keine extremen Spannungen, die zu Beanspruchungen der Kruste führen, wie sie z. B. aus dem alpinen Raum bekannt sind. Die Krustenbewegungen und die Seismizität in Mitteleuropa nehmen mit zunehmender Entfernung vom Alpenrand ab. Die Anzeichen für eine intensive Tektonik sind im Quartär in Norddeutschland nicht gegeben. Sie reichte aber aus, den Rest alpiner Vorlandspannungen weitgehend abzubauen. Grabenbildungen wie die des Oberrheintals oder der Erhebung der Alpen kamen in Norddeutschland während der letzten 10 Millionen Jahre nicht vor. Eine hochaktive und mobile Kruste lässt sich aus den abgelaufenen Vorgängen für die norddeutsche Tiefebene nicht ableiten. Da das großräumige Spannungsfeld im Bereich des nördlichen Mitteleuropas auf Grund der bestehenden plattentektonischen Situation sich nur langsam in geologischen Zeiträumen ändern wird, dürften sich die zukünftigen tektonisch bedingten Auswirkungen im ähnlichem Rahmen jener Veränderungen abspielen wie sie aus den letzten Millionen von Jahren nachzuweisen sind.

Dementsprechend sind beispielsweise im Zusammenhang mit der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck (Hydraulische Stimulation in tiefen Vulkaniten, Abb. 5.32) kaum mikroseismische Ereignisse registriert worden (70 Ereignisse mittels 500 m entferntem Bohrlochseismometer) /BÖN 14/.

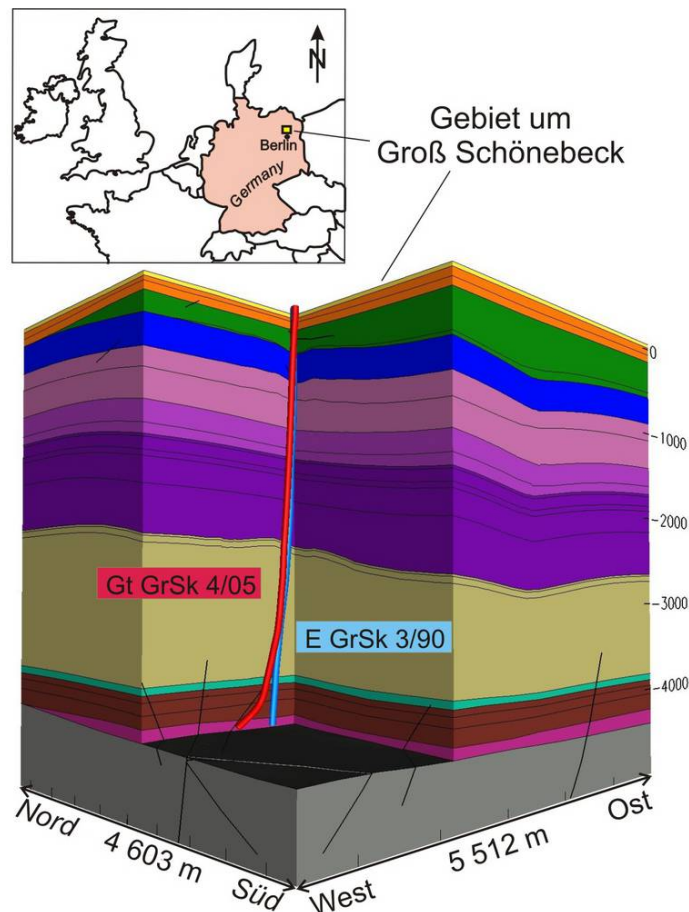


Abb. 5.32 Bohrungsverlauf im geologischen Modell des Geothermiestandortes Groß Schönebeck; Quelle: <http://www.gfz-potsdam.de/forschung/ueberblick/geoengineering-zentren/internationales-geothermiezentrum-icgr/projekte/abgeschlossene-projekte/machbarkeit/>

5.6.6 Relevante Projekte

5.6.6.1 MAGS-Projekt

Das MAGS-Projekt (MAGS = Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme) stellt sich aktuell mit einer eigenen Homepage dar. Diese bildet auch die Grundlage für die nachfolgende Kurzdarstellung

(http://www.mags-projekt.de/MAGS/DE/Home/MAGS_node.html, 10.07.2013).

Der geplante Ausbau der Geothermie ist derzeit durch das vereinzelte Auftreten induzierter Mikroseismizität in der Nähe geothermischer Kraftwerke gefährdet. Nach einem induzierten Mikrobeben in Basel wurde das dortige Geothermie-Projekt gestoppt. In Deutschland traten in der Nähe des Geothermiekraftwerks Landau Mikrobeben auf, die zu Beunruhigungen in der Bevölkerung führten. Auch in Soultz-sous-Forêts (Elsass) und in Unterhaching trat induzierte Mikroseismizität in räumlicher Nähe zu den Geothermie-Standorten auf. Für die Akzeptanz der Energiegewinnung aus tiefer Geothermie ist es entscheidend, wissenschaftlich klar darzulegen, ob diese Seismizität auf Mikrobeben begrenzt bleibt oder ob eine Gefahr für Menschen und Gebäude von den induzierten seismischen Ereignissen ausgehen könnte.

Im Rahmen des vom BMU geförderten Verbundprojekts „Mikroseismische Aktivität Geothermischer Systeme“ (MAGS) sollen deshalb Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund entwickelt werden. Hierzu wird die Seismizität an Nutzungsstandorten der Tiefengeothermie in Deutschland zunächst möglichst genau gemessen und charakterisiert. In einem zweiten Schritt soll die seismische Gefährdung berechnet und mit der Gefährdung durch natürliche Erdbeben am selben Standort verglichen werden. Außerdem werden Strategien zur Vermeidung spürbarer Seismizität bei hydraulischen Stimulationen und im Dauerbetrieb geothermischer Kraftwerke entwickelt. Schließlich soll das Verbundprojekt zu einem verbesserten Prozessverständnis zum Entstehen fluidinduzierter Mikrobeben beitragen.

Die Projektziele lauten zusammengefasst:

- Entwicklung von Konzepten zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung tiefer geothermischer Systeme
- Verbessertes Verständnis der Prozesse, die zum Entstehen fluidinduzierter Mikrobeben führen
- Zusammenarbeit mit Betreibern und Genehmigungsbehörden für eine sichere Energiegewinnung aus tiefer Geothermie

Der Forschungsverbund setzt sich zusammen aus Wissenschaftlern der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, der Freien Universität Berlin, des Karlsruher Instituts für Technologie, der Ludwig-Maximilians Universität München, der TU Claust-

hal und der TU Bergakademie Freiberg und arbeitet mit den Firmen geo x GmbH, Pfalzwerke geofuture GmbH, Bernried Erwärme Kraftwerk GmbH, GeoEnergie Kirchweidach GmbH, Geothermie Unterhaching GmbH & Co KG und WISMUT GmbH zusammen.

Das Verbundprojekt MAGS - Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme setzt sich aus sieben Einzelprojekten zusammen. Dabei beschäftigen sich einige der Projekte mit der Analyse der Seismizität an verschiedenen Standorten im Oberrheingraben und der bayerischen Molasse, während sich andere Einzelprojekte auf die Modellierungen zur Gefährdungsanalyse und zum Prozessverständnis konzentrieren.

1. Quantifizierung und Charakterisierung des induzierten seismischen Volumens im Bereich Landau, Südpfalz
2. Untersuchung von Mikro-Erdbeben in der bayerischen Molasse im Umfeld geothermischer Reservoirs
3. Echtzeitauswertung induzierter Erdbeben und Gefährdungsabschätzung bei hydraulischen Stimulationen geothermischer Reservoirs
4. Untersuchung der seismischen Gefährdung aufgrund induzierter Seismizität bei tiefer geothermischer Energiegewinnung
5. Modellierung der Auftretswahrscheinlichkeiten fluidinduzierter Erdbeben mit einer gegebenen Magnitude bei der Stimulation geothermischer Systeme
6. THMC gekoppelte Untersuchungen zu Mechanismen und freigesetzten Deformationsenergien der seismischen Ereignisse in der Reservoirstimulations- und Betriebsphase
7. Prognose der möglichen induzierten/getriggerten Seismizität im Kristallin in Auswertung der flutungsbedingten seismischen Ereignisse im Bergbaurevier Aue/Schlema

Für die Belange der in vorliegendem Bericht behandelten Thematik sind insbesondere die Arbeiten im Einzelprojekt 4 von Relevanz.

Einzelprojekt 4

Im Einzelprojekt 4 wird die seismische Gefährdung durch menschlich verursachte (induzierte) Rissbildungen und eventuell auch getriggerte Erdbeben in der Nähe von Ge-

othermie-Kraftwerken mit deterministischen und probabilistischen Analysen ermittelt. Die Gefährdung durch induzierte Seismizität wird mit der Gefährdung durch natürlich auftretende Erdbeben verglichen.

Um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens seismischer Einwirkungen in Form von Intensitäten oder Bodenbeschleunigungen anzugeben, wird die probabilistische Methode eingesetzt. Hierbei wird ein Seismizitätsmodell, das die Überschreitenswahrscheinlichkeit von Erdbeben mit einer bestimmten Magnitude beschreibt und ein Ausbreitungsmodell, das die von einem festgelegten Erdbeben erzeugten Bodenbewegungen und deren Abklingen mit der Entfernung beschreibt, benötigt. Für die natürliche Seismizität wird das Seismizitätsmodell mit Hilfe der in der Vergangenheit aufgetretenen Erdbeben festgelegt und unter Annahme von Zeitunabhängigkeit als Wahrscheinlichkeitsmodell für die Zukunft angenommen. Die Magnituden-Häufigkeits-Verteilung kann hierbei durch das Gutenberg-Richter-Gesetz beschrieben werden, das einen Zusammenhang zwischen der Häufigkeit kleiner Erdbeben und der Häufigkeit großer Erdbeben herstellt. Die gemessene Häufigkeit kleiner Erdbeben in der Vergangenheit kann somit verwendet werden, um die Überschreitenswahrscheinlichkeit größerer Erdbeben in der Zukunft abzuschätzen. Maximale zu erwartende Magnituden sind für einzelne seismotektonische Regionen charakteristisch. Sie ergeben sich aus der physikalisch limitierten Größe einer Störungszone.

Zum 1.10.2013 ist das Nachfolgeprojekt MAGS2 - Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung gestartet; die Laufzeit beträgt drei Jahre (10/2013 bis 09/2016). Im Themenfeld A „Monitoringkonzepte und Öffentlichkeitsarbeit“ sollen die seismologischen Überwachungskonzepte verbessert, im Themenfeld B „Fluidinduzierte Seismizität in Geothermiefeldern“ neue Methoden zur Beschreibung fluidinduzierter Seismizität im Falle komplexer Geothermiefelder entwickelt werden. Im dritten Themenfeld C „Seismizitätsabschätzung vor dem Bohren“ schließlich sollen die Erkenntnisse aus gut verstandenen Anlagen auf neue Standorte übertragen werden. Dieser letzte Schritt soll es ermöglichen, bereits vor dem Abteufen einer Bohrung die zu erwartende Seismizität einzuschätzen. Details, siehe

http://www.magsprojekt.de/MAGS/DE/Downloads/MAGS2_Projektkurzbeschreibung.pdf (02.04.2014)

5.6.6.2 GeneSys-Projekt

Das GeneSys-Projekt stellt sich ebenfalls aktuell mit einer eigenen Homepage dar (http://www.genesys-hannover.de/Genesys/DE/Home/genesys_node.html, 10.07.2013), der die nachfolgende Kurzdarstellung i. W. entnommen ist.

Das Norddeutsche Becken ist aufgrund seiner großen Ausdehnung von wesentlicher Bedeutung für die weitere Entwicklung der Tiefengeothermie in Deutschland. Entscheidend hierfür ist die Entwicklung von geeigneten Erschließungskonzepten für die geringporösen, wenig durchlässigen Sedimentgesteine. Das GeneSys-Projekt der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe hat sich zum Ziel gesetzt, exemplarisch die Nutzung dieser Sedimentgesteine in Hannover aufzuzeigen. Mit der fast 4 km tiefen GeneSys-Bohrung soll Erdwärme gewonnen werden, um die Bürogebäude des Geozentrums Hannover geothermisch zu beheizen.

Zum Erreichen dieses Ziels werden folgende innovative Methoden angewandt:

- Erprobung von Einbohrlochkonzepten
- Übertragung der Wasserfractechnik auf Sedimentgesteine
- Das GeneSys-Projekt wird in zwei Teilprojekten durchgeführt:
- Forschungsprojekt Horstberg: Erprobung von Einbohrloch-Konzepten für die geothermische Nutzung dichter Sedimentgesteine
- Demonstrationsprojekt Hannover: Anwendung der erprobten Konzepte zur Versorgung des Geozentrums mit geothermischer Wärme
- Die Eckdaten des Teilprojektes GeneSys Hannover lauten:
- Zielformation: Mittlerer Buntsandstein
- Temperatur: ca. 160 °C in der Zielformation
- Thermische Leistung: 2 MW
- Förderrate: ca. 25 m³/h
- Bohrungstiefe: 3.901 m

Das GeneSys-Projekt Hannover wird federführend von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe als Pilotvorhaben verwirklicht. Begleitende Forschungsar-

beiten werden am Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik durchgeführt, die vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit finanziert werden.

5.6.6.3 GEISER-Projekt

Das GEISER-Projekt ist auf folgender Website repräsentiert, auf die in nachfolgender Kurzdarstellung Bezug genommen wird:

<http://www.geiser-fp7.eu/default.aspx>

Das GEISER-Projekt (Geothermal Engineering Integrating Mitigation of Induced Seismicity in Reservoirs) wurde auf Europäischer Ebene (7. Rahmenprogramm der EU) zu Anfang des Jahres 2010 begonnen und widmet sich verschiedenen Herausforderungen, die mit der Entwicklung der Nutzung geothermischer Energie verbunden sind. Dazu gehört auch die Begrenzung der induzierten Seismizität auf ein allgemein akzeptiertes Niveau.

Die spezifischen Ziele des GEISER-Projektes sind:

- Verständnis darüber, warum Seismizität in einigen Fällen induziert wird und in anderen nicht
- Beurteilung der Wahrscheinlichkeit seismischer Gefahren je nach geologischer und geografischer Lage
- Vorschlag für Genehmigungs- und Überwachungs-Richtlinien für lokale Behörden (incl. einer Definition akzeptabler Bodenbewegungen)
- Entwicklung von Strategien für „Soft Stimations“, welche die hydraulischen Eigenschaften des geothermische Reservoir ausreichend verbessern, ohne dass Erdbeben gefühlt werden oder Schäden verursachen

Das Projekt wird von GEISER GFZ Potsdam koordiniert und umfasst 12 zusätzliche Partner: BRGM, ISOR, TNO, ETHZ, Statoil GEOWATT, NORSAR, ARMINES, EOST, KNMI, AMRA, INGV.

Das Projekt gliedert sich in 7 Arbeitspakete (WP), jeweils unter der Leitung eines der Partner.

- WP1: Project Management (GFZ)

- WP2: Compilation of induced seismicity data from geothermal sites (ISOR)
- WP3: Analysis of Induced Seismicity (GFZ)
- WP4: Understanding the Geomechanical Causes and Processes of Induced Seismicity (BRGM)
- WP5: Seismic Hazard Assessment (ETHZ)
- WP6: Strategies for EGS operations with respect to Induced Seismicity (TNO)
- WP7: Dissemination (BRGM)

Der Fortschritt des Projektes wird in GEISER-Newsletter veröffentlicht, von denen bislang fünf erschienen sind (zuletzt April 2013). Die Abschlusskonferenz hat am 30. und 31.05.2013 in Neapel stattgefunden, ein Abschlussbericht mit verwertbaren Ergebnissen liegt noch nicht vor (Stand: 10.07.2013). Ein Sonderheft der Zeitschrift *Geothermics* ist für Ende 2013 geplant, das 18 Artikel mit Projektergebnissen umfassen wird.

5.6.7 Risikobewertung für zukünftige Projekte, Empfehlungen

Wesentliche Quellen: /GEO 06/, /GEO 07/, /WIE 13/

Nach /WIE 13/ ist die seismische Reaktion des Untergrundes auf eine Fluidinjektion in Granitgestein in größerer Tiefe sehr variabel und von Natur aus schwer vorherzusagen. Die Autoren haben u. a. untersucht, ob die maximal beobachtete Magnitude mit Key-Parametern wie injiziertes Volumen, Injektionsdruck, Tiefe oder regionale Gefährdung korreliert. Die Ergebnisse zeigen eine erhebliche Streuung der Ergebnisse, die postulierte Korrelation schwächerer Maximal-Ereignisse in Gebieten mit geringerer PGA (peak ground acceleration) wurde durch die vorläufigen Ergebnisse (/WIE 13/) nicht bestätigt. Es deutet sich insgesamt eine starke Tiefenabhängigkeit, eine starke Abhängigkeit von differentiellen Spannungen, eine lineare Abhängigkeit der Seismizität auf injizierte Volumen aber eine nur sehr schwache Korrelation mit dem Injektionsdruck.

Erdbebengefährdung und Erdbebenrisiko mit DHM-Anlagen (/GEO 06/)

Die Erdbebengefährdung bei einem DHM (deep heat mining)-Projekt beruht auf folgenden Ursachen:

- Induzierte Mikrobeben, die während der Stimulation auftreten. Diese Mikrobeben weisen Magnituden von < 2 auf und sind weder spürbar noch verursachen sie Schäden an der Oberfläche. Das mit induzierter Mikroseismizität verbundene Risiko wird in /GEO 06/ als klein beurteilt.
- Getriggerte Beben, die während und nach der Stimulation auftreten können. Derartige getriggerte Beben können mittlere bis hohe Magnituden erreichen und deshalb auch an der Erdoberfläche gespürt werden. Dort können sie im Extremfall auch Schäden verursachen. Für getriggerte Beben gibt es nach /GEO 06/ keine Möglichkeit, Aussagen über die Wahrscheinlichkeit des Auftretens, die Frequenz oder die Magnitude zu machen. Das Risiko kann deshalb nicht abgeschätzt werden.

Veränderung der Gefährdung

Bei einem Geothermie-Projekt stellt sich grundsätzlich die Frage, ob eine durch Poren-druckänderungen induzierte Seismizität einen Einfluss auf den natürlichen Ablauf von tektonischem Spannungsaufbau mit spontanem Spannungsabbau (Erdbeben) am betreffenden Standort zur Folge hat, d. h. ob sich die Erdbebengefährdung und damit das Erdbebenrisiko verändern werden.

Eine eindeutige Antwort auf diese Frage gibt nach /GEO 06/ die Wissenschaft bis heute nicht. Einerseits kann durch die lokale Schwächung von Brüchen und Herabsetzen der Reibung einem vorzeitigen Spannungsabbau Vorschub geleistet und damit ein natürliches stärkeres Beben verhindert werden. Andererseits kann ein Hot-Fractured-Rock-System lokal die seismische Aktivität steigern und darum die Häufigkeit kleinerer bis mittlerer Ereignisse erhöhen, durch die gleichzeitig damit verbundene Verminderung größerer Ereignisse die Gefährdung insgesamt jedoch nicht beeinflussen (Michelet 2002, in /GEO 06/).

Für den Standort Basel geht /GEO 06/ beispielsweise davon aus, dass während der hydraulischen Stimulation die mikroseismische Aktivität kurzfristig erhöht wird. Weiter besteht das Risiko, dass im schlimmsten Fall durch Aktivitäten im Projekt Ereignisse getriggert werden. Nach Meinung /GEO 06/ können diese getriggerten Ereignisse jedoch maximal die Spannung freisetzen, die natürlich bereits vorhanden ist. Im Gegensatz zu einem Staudamm beispielsweise, der eine neue Gefahrenquelle darstellt, erzeugen hydraulische Stimulationen keine neuen Gefährdungen, sondern haben im

schlechtesten Falle eine zeitliche Verschiebung natürlicher Ereignisse zur Folge. Die Erdbebengefährdung insgesamt wird dadurch nicht verändert.

Wichtig ist bei jedem Projekt, dass die seismische Aktivität in der betreffenden Region sowohl vor, während als nach einer Stimulation permanent überwacht wird, so dass von der natürlichen seismischen Aktivität abweichende Ereignisse systematisch erfasst werden (z. B. Gutenberg-Richter Plot) und entsprechend reagiert werden kann.

Beurteilung der Gefährdung: Gutenberg-Richter Gesetz

Das empirische Gutenberg-Richter Exponentialgesetz sagt aus, dass die durchschnittliche Zahl N von Erdbeben mit Magnituden $\geq M$, die pro Jahr registriert werden, eine abnehmende Exponentialfunktion von M ist:

$$\text{Log}_{10}(N) = a - b * M$$

wobei a und b charakteristische Konstanten für ein bestimmtes Gebiet sind. Besonders der b -Wert (entspricht der Steigung) kann als Maß zur Beurteilung der Erdbebengefährdung herangezogen werden. Ein großer b -Wert reduziert die Magnituden von großen Ereignissen, während ein kleiner b -Wert die Magnitude von großen Ereignissen erhöht. Im weltweiten Schnitt liegt der b -Wert ungefähr bei 1. Für die gesamte Schweiz wird ein b -Wert von 0,9 angenommen. Für die Region Basel wird ein tieferer b -Wert vorgezogen (0,66 - 0,9).

Aus Anzahl und Magnitudenverteilung der seismischen Ereignisse können also Prognosen über weitere Entwicklung und das potenzielle seismische Risiko insgesamt gemacht werden, die umso verlässlicher sind, je mehr Messdaten vorliegen.

Das Ampel-System

Die Handlungsanweisungen im Rahmen eines Geothermie-Projektes werden heute in vielen Fällen in ein sogenanntes „Ampelsystem“ gefasst. Dieses geht letztlich auf /BOM 06/ und da Berlin-Geothermie-Projekt in El Salvador zurück. Vereinfacht bedeutet „grün“, dass bei einer hydraulischen Stimulation wie geplant Wasser verpresst wird oder dass man sich im Falle des Dauerbetriebs im Normalzustand befindet. Beim Überschreiten eines bestimmten Grenzwertes gerät man dann in einen „gelben“ Bereich, der mindestens erhöhte Aufmerksamkeit bedeutet. Eventuell können bereits bei „gelb“ Gegenmaßnahmen wie eine Reduktion des Injektionsdrucks eingeleitet werden.

„Rot“ bedeutet im Allgemeinen die Beendigung der hydraulischen Stimulation bzw. die Unterbrechung des Zirkulationsbetriebs. Bei den bisher verwendeten Reaktionsschemen basiert die Abschätzung der seismischen Gefährdung allerdings ausschließlich auf der vergangenen Seismizität. Dies berücksichtigt nicht eine mögliche Nachwirkung durch langsame Porendruckausbreitung, die auch nach Beendigung der Injektion noch andauern kann. Im Beispiel von Basel war die hydraulische Stimulation bereits gestoppt, die Ampel also schon auf „rot“ geschaltet, seismische Ereignisse traten aber noch bis zu 2 Monate später auf. Dieses Phänomen muss bei einer Festlegung von Grenzwerten unbedingt berücksichtigt werden, wobei abgeschätzt werden muss, wie viele Erdbeben noch nach einem Stimulationstopp zu erwarten sind.

Ein Beispiel für einen Stufenplan („Ampel“, hier allerdings 4 Stufen) mit dem Ziel einer Vermeidung starker Erschütterungen bei der Überwachung induzierter Seismizität ist in /FRI 12/ gegeben.

Das "Ampel"-System kann für viele EGS Operationen angebracht sein und bietet eine klare Reihe von Verfahren, die im Falle, dass bestimmte Seismizitäts-Schwellenwerte erreicht werden, beachtet werden müssen. Das Ampelsystem und die Schwellenwerte, die bestimmte Tätigkeiten beim Betreiber des Geothermie-Projektes auslösen, müssen allerdings standortspezifisch im Voraus und für alle Vorgänge definiert werden.

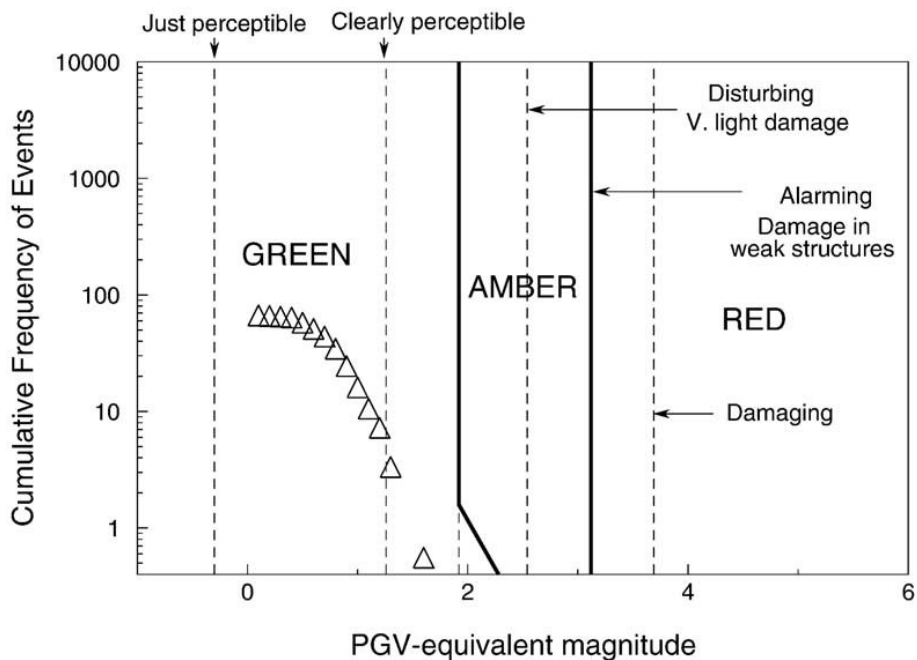


Abb. 5.33 Grenzen des Ampelsystem in /BOM 06/

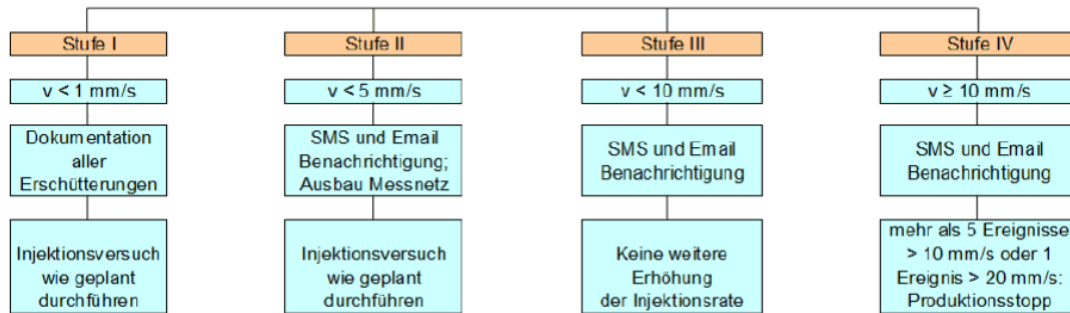


Abb. 5.34 Stufenplan bei der Überwachung induzierter Seismizität (aus /FRI 12/)

Für den Standort Basel schlagen /GEO 06/, /GEO 07/ ebenfalls vor, dass zur Beurteilung der Ereignisse ein Ampel-System herangezogen wird, das von zwei Achsen aufgespannt wird: auf der x-Achse wird die maximale Bodengeschwindigkeit [cm/s] aufgetragen, auf der y-Achse die Anzahl Ereignisse pro 24 h. Dieses System berücksichtigt also nicht nur die maximale Bodengeschwindigkeit, sondern auch die Häufigkeit, mit der diese Ereignisse auftreten. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass die Empfindsamkeit für Erschütterungen steigt, je häufiger sie auftreten.

Richtlinien zur Wahrnehmung von Erschütterungen finden sich für Explosionen und Sprengungen in einem US Army Engineering Manual /USA 72/, für Erschütterungen durch Fahrzeuge bei /BAR 85/, und für hauptsächlich vertikale Erschütterungen z. B. durch Schlagen von Spundwänden bei Athanasopoulos und Pelekis (zitiert in /GEO 06/). Nach /GEO 06/, /GEO 07/ lassen sich die „Ampelphasen“ folgendermaßen definieren:

Grüner Bereich

Der grüne Bereich umfasst maximale Bodengeschwindigkeiten von 0 - 2 cm/s für vereinzelte Ereignisse oder 0 - 1,2 cm/s, wenn mehrere Ereignisse auftreten. Diese Grenzwerte sind folgendermaßen hergeleitet worden: Bodengeschwindigkeiten können ab ca. 1 cm/s deutlich wahrgenommen werden, wobei in ruhigen Situationen Erschütterungen, wie z. B. beim Einschlagen von Spundwänden, selbst schon ab 0,15 cm/s wahrgenommen werden können, aber statistisch frühestens ab 1,2 cm/s als „störend“ empfunden werden. Dieser Wert wird deshalb als Grenzwert von grün nach gelb (bei mehreren Ereignissen pro 24 h) vorgeschlagen. Es ist darauf hinzuweisen, dass hier jeweils die Untergrenzen statistischer Erhebungen genannt werden. Einzeln auftretende Ereignisse mit maximalen Bodengeschwindigkeiten von 2,0 cm/s sind außerhalb

von Gebäuden kaum, in ruhigen Räumen jedoch von vielen Personen wahrnehmbar. Deshalb wird dieser Wert als Grenzwert von grün nach gelb für vereinzelte Ereignisse pro 24 h vorgeschlagen. Liegen die gemessenen maximalen Bodengeschwindigkeiten im grünen Bereich, wird der Betrieb normal weitergeführt.

Gelber Bereich

Der gelbe Bereich umfasst maximale Bodengeschwindigkeiten von 2 - 3,4 cm/s für einzelne Ereignisse pro 24 h bzw. von 1,2 - 2,6 cm/s für mehrere Ereignisse pro 24 h. Quantitativ lässt sich der Grenzwert von gelb nach rot nach /GEO 06/ folgendermaßen herleiten. Gemäß EMS-98 verursacht ein Beben der Intensität V erste geringfügige Schäden an vereinzelten Bauten der Vulnerabilitätsklassen A und B (Lehmhütten - einfache Steinbauten). Intensität V entspricht einem Bereich von PGV 3,4 - 8,1 cm/s. Da Schäden Dritter nicht auftreten sollen, muss eine Bodengeschwindigkeit von 3,4 cm/s als Grenzwert gewählt werden. Dieser Wert entspricht dem Grenzwert von /BAM 06/ für das Berlin-Projekt in El Salvador. Dort wurde dieser Wert allerdings mit einer direkten Beziehung von Magnitude in einem 2 km tiefen Reservoir und der PGV hergeleitet. Treten mehrere Ereignisse pro 24 h auf, wird der Grenzwert auf 2,6 cm/s herabgesetzt. Liegen die gemessenen maximalen Bodengeschwindigkeiten im gelben Bereich, kommt es zu ersten Einschränkungen des Betriebes. Ein ausführlicher Maßnahmenkatalog wird in /GEO 07/, Teil 2, Kapitel 8 vorgestellt (siehe auch Abb. 5.36).

Roter Bereich

Der rote Bereich umfasst maximale Bodengeschwindigkeiten, die grösser als 3,4 cm/s für vereinzelte Ereignisse oder 2,6 cm/s für mehrere Ereignisse pro 24 h sind. In einem solchen Fall werden die Operationen der hydraulischen Stimulation eingestellt.

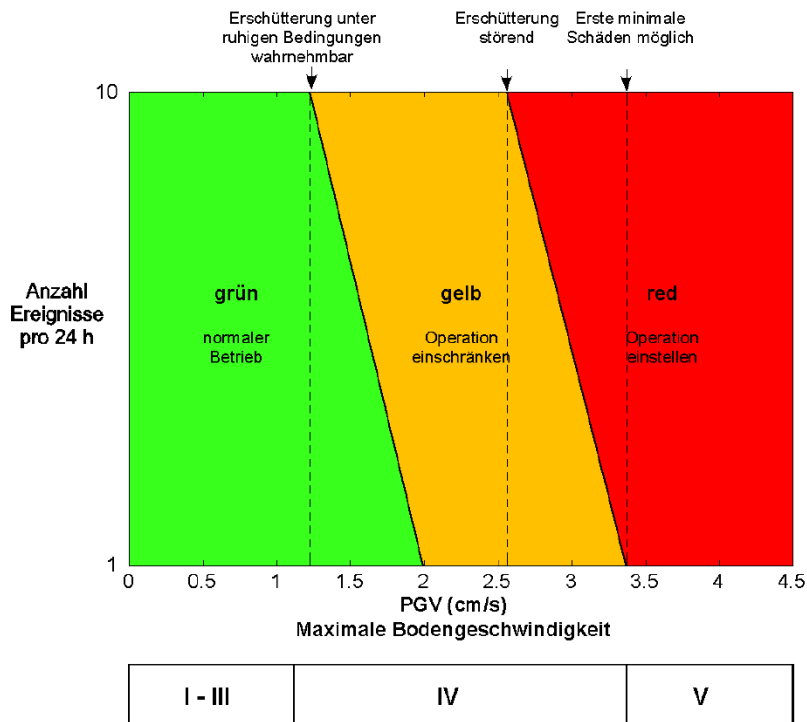


Abb. 5.35 Ampel-System, basierend auf gemessenen maximalen Bodengeschwindigkeiten (PGV) und Rekurrenz innerhalb von 24 Stunden (aus /GEO 06/)

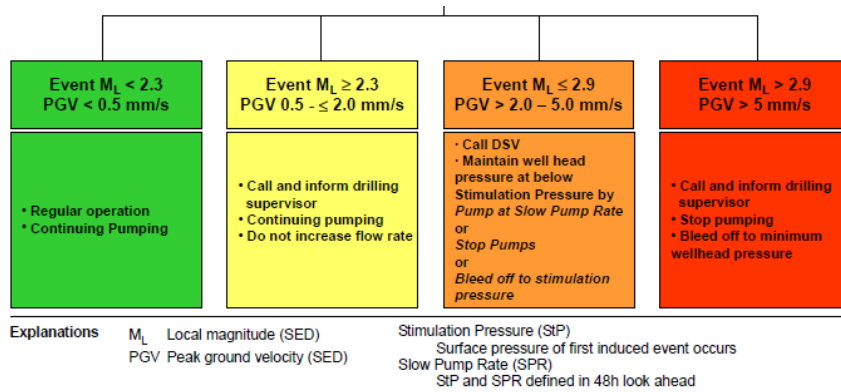


Abb. 5.36 Reaktionsschema für mikroseismische Ereignisse (aus /GEO 07/) [in der Originalabbildung schließen sich oben regionale Behörden bzw. Entscheidungsträger an, die hier nicht dargestellt sind]

Maximale Bodengeschwindigkeiten eignen sich gut zur Kontrolle induzierter Seismizität. Die Werte liegen unmittelbar nach dem Ereignis vor und sie ermöglichen sofortige Maßnahmen, wie z. B. Reduktion oder Unterbrechung von Injektionen. Sie eignen sich hingegen nicht zur Kommunikation in der Öffentlichkeit, da sie keinen direkt sichtbaren Bezug zu feststellbaren Auswirkungen haben. Dazu eignet sich beispielsweise die Eu-

ropäische Makroseismische Skala (EMS-98, /GRÜ 98/) mit ihren deskriptiven Definitionen wesentlich besser. Abb. 5.37 stellt den Bezug zwischen PGV und EMS-98 her. Aus dieser Beziehung wird deutlich, dass der kritische Bereich, bei welchen Einschränkungen im Betrieb angeordnet werden, deutlich unter einer Schadensgrenze liegt. Die kritischen Bodengeschwindigkeiten liegen im Bereich von akzeptierten Bauerschütterungen. Letztere treten allerdings über keine längere Zeitdauer auf und wirken störender. Allerdings sind diese dann auch auf normale Arbeitszeiten beschränkt. Erschütterungen durch hydraulische Stimulationen beschränken sich auf wenige, auf Sekunden beschränkte Ereignisse, die gemäß EMS-98 nur in ruhigen Verhältnissen wahrgenommen werden können.

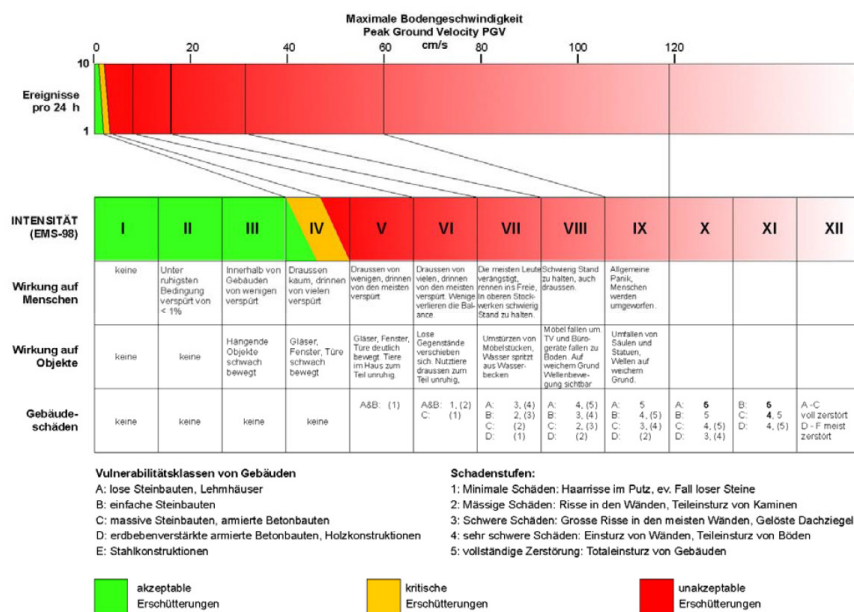


Abb. 5.37 Beziehung der Grenzwerte basierend auf Bodengeschwindigkeiten zur Intensitätsskala EMS-98 (aus /GEO 06/)

Neben dieser, an EMS-98 orientierten Ampelregelungen sind auch andere Grenzwerte für die einzelnen Ampelphasen möglich, z. B. die größte erfasste (vorstellbare) Magnitude an einem Standort als Grenzwert für einen Wechsel von „gelb“ nach „rot“, und eine Magnitudengröße darunter für den Wechsel von „grün“ zu „gelb“.

5.6.8 Zusammenfassung Seismik

Durch die Erschließung geothermischer Lagerstätten und auch durch den Betrieb geothermischer Energiegewinnungsanlagen können seismische Ereignisse im Zielhori-

zont ausgelöst werden, die sich bis an die Erdoberfläche fortsetzen. Derartige Mikrobeben werden in den meisten Fällen nicht gespürt und stellen keine unmittelbare, signifikante Gefahr für die Bevölkerung dar. Im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten treten aber auch immer wieder spürbare Beben auf, die in besonderem Maße zu einer deutlichen Abnahme der öffentlichen Akzeptanz derartiger Projekte führen. Zuletzt ist in den Medien in größerem Umfang über ein Erdbeben berichtet worden, welches am 02.10.2013 im Raum St. Gallen (CH) aufgetreten ist und von dem ein Zusammenhang mit dem dortigen Geothermie-Projekt angenommen wird. Bedeutender Ausgangspunkt für die öffentliche Diskussion um die durch Geothermie-Projekte induzierte Seismizität ist allerdings bereits das Beben vom 08.12.2006 in Basel gewesen, das mit einer Stärke von $M_L = 3,4$ an der Erdoberfläche zu spüren gewesen ist. Aber weltweit ist auch von zahlreichen anderen Geothermie-Standorten das Auftreten induzierter Seismizität bekannt.

Die im Rahmen von Geothermie-Projekten auftretende Induzierte Seismizität ist grundsätzlich auf dieselben physikalischen Ursachen wie bei anderen Fluidinjektionen zurückzuführen. Der Hauptmechanismus besteht darin, dass ein zusätzlich aufgebrachter Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert, in deren Folge dann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung auftreten kann. Beim Betrieb geothermischer Anlagen können darüber hinaus auch thermo-mechanische Effekte eine Rolle spielen. Induzierte Seismizität ist allerdings nicht auf geothermische Projekte beschränkt, sondern auf vielerlei weitere mögliche Ursachen zurückzuführen, wie z. B.:

1. Anlage von Stauseen
2. Bergbauarbeiten
3. Bau von Verkehrstunneln
4. Ausgrabungen
5. Öl-/Gasförderung
6. Bau von Untergrundspeichern (Gas, Druckluft)
7. Flüssigkeitsverpressungen
8. Niederbringung von Mineralwasserbrunnen
9. Hydraulische Stimulation von Öl-/Gaslagerstätten

Das erste, in der Literatur beschriebene Fall-Beispiel fluid-induzierter Seismizität stammt aus den USA, wo in den 1960er Jahren in der Umgebung von Denver (Colorado) flüssiger Abfall in tiefen Bohrlöchern verpresst wurde. Bereits seit dieser Zeit ist

also bekannt, dass Änderungen im Druck des Porenwassers Erdbeben auslösen können.

Bei Geothermie-Projekten wird grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Phasen differenziert, a) der hydraulischen Stimulationsphase und b) der Zirkulations-Phase (dem Dauerbetrieb eines geothermischen Kraftwerkes). Wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes nicht ausreicht, um ein geothermisches Kraftwerk wirtschaftlich zu betreiben, wird ein Fluid (i. W. Wasser) unter hohem Druck über ein Bohrloch in den Untergrund verpresst. Durch dieses Verfahren, die „hydraulische Stimulation“, werden neue Risse im Untergrund erzeugt oder bestehende aufgeweitet. Auch während der Zirkulation, also der Entnahme von heißem Wasser aus dem Untergrund über eine Bohrung und der Verbringung des abgekühlten Wassers über eine zweite Bohrung wieder zurück in den Untergrund, kann eine Druckerhöhung auftreten und Erdbeben verursachen. Die Wechselwirkung zwischen Injektion bzw. Druckaufbau und resultierenden seismischen Ereignissen ist aber nicht immer spontan und unmittelbar zuzuordnen. Unter Umständen breitet sich im Rahmen von Injektionsmaßnahmen in den Untergrund verpresstes Wasser dort nur langsam entlang von existierenden Porenräumen und Kluftzonen aus. In einem solchen Fall stellen sich neue Spannungsverhältnisse im Untergrund auch erst langsam ein und seismische Ereignisse können folglich auch mit einer Verzögerung gegenüber der Stimulations- oder Zirkulationsmaßnahme auftreten. Dieser Effekt lässt sich aber mit einfachen Modellen numerisch simulieren und muss bei der Festlegung von Abbruchkriterien unbedingt berücksichtigt werden.

Induzierte Seismizität wird im Rahmen petrothormaler Geothermie-Projekte von Betreiberseite auch gezielt als Indikator dafür verwendet, wie weit im Rahmen einer hydraulischen Stimulation der Prozess einer „Durchlässigkeitsverbesserung“ im tiefen Untergrund reicht. Mit Hilfe einer räumlichen Darstellung der induzierten Bebenherde ist also eine räumliche Kartierung des künstlich geschaffenen Wärmetauschers möglich.

Injektionsmaßnahmen im Rahmen geothermischer Projekte sind allerdings nicht in der Lage, selbst tektonischen Spannungen im Untergrund aufzubauen, sondern nur, vorhandene natürliche Spannungen lokal abzubauen. Das führt zu induzierter Seismizität, die folglich keine größeren Magnituden am betreffenden Standort erreichen kann, als es ein natürliches, tektonisches Erdbeben. Die anthropogen bedingten Maßnahmen können allerdings zu einer zeitlichen Vorverlagerung eines seismischen Ereignisses führen. Die Vielzahl mikroseismischer Ereignisse im Zuge einer Injektionsmaßnahme

ist im Einzelfall auch geeignet, größere natürliche Beben an einem Standort zu verhindern oder zu verringern.

Obwohl also die Risiken im Zusammenhang mit induzierter Seismizität bei Geothermie-Projekten relativ niedrig sind, wird im Hinblick auf eine höhere öffentliche Akzeptanz dennoch empfohlen, bereits im Vorfeld einen Risikominderungsplan zu entwickeln, der einerseits auf die Operationen selbst abzielt, andererseits auf die Belästigung oder Schäden, die sich aus dem Projekt ergeben könnten. In diesem Zusammenhang hat sich das sogenannte "Ampel"-System etabliert.

Vereinfacht bedeutet „grün“, dass bei einer hydraulischen Stimulation wie geplant Wasser verpresst wird oder dass man sich im Falle des Dauerbetriebs im Normalzustand befindet. Beim Überschreiten eines bestimmten Grenzwertes gerät man dann in einen „gelben“ (je nach Abstufung auch „orangen“) Bereich, der mindestens erhöhte Aufmerksamkeit bedeutet. Eventuell können bereits bei „gelb“ Gegenmaßnahmen wie eine Reduktion des Injektionsdrucks eingeleitet werden. „Rot“ bedeutet im Allgemeinen die Beendigung der hydraulischen Stimulation bzw. die Unterbrechung des Zirkulationsbetriebs. Bei den bisher verwendeten Reaktionsschemen basiert die Abschätzung der seismischen Gefährdung allerdings ausschließlich auf der vergangenen Seismizität. Dies berücksichtigt nicht eine mögliche Nachwirkung durch langsame Porendruckausbreitung, die auch nach Beendigung der Injektion noch andauern kann. Im Beispiel von Basel war die hydraulische Stimulation bereits gestoppt, die Ampel also schon auf „rot“ geschaltet, seismische Ereignisse traten aber noch bis zu zwei Monate später auf. Dieses Phänomen muss bei einer Festlegung von Grenzwerten unbedingt berücksichtigt werden, wobei abgeschätzt werden muss, wie viele Erdbeben noch nach einem Stimulationstopp zu erwarten sind.

Das Ampelsystem und die Schwellenwerte, die bestimmte Tätigkeiten beim Geothermie-Entwickler auslösen, müssen auf alle Fälle im Voraus und für alle Vorgänge definiert werden. Maximale Bodengeschwindigkeiten eignen sich gut zur Kontrolle induzierter Seismizität. Die Werte liegen unmittelbar nach dem Ereignis vor und sie ermöglichen sofortige Maßnahmen, wie z. B. Reduktion oder Unterbrechung von Injektionen. Sie eignen sich hingegen nicht zur Kommunikation in der Öffentlichkeit, da sie keinen direkt sichtbaren Bezug zu feststellbaren Auswirkungen haben. Dazu eignet sich beispielsweise die Europäische Makroseismische Skala (EMS) mit ihren deskriptiven Definitionen wesentlich besser. Neben einer an EMS-98 orientierten Ampelregelungen sind aber auch andere Grenzwerte für die einzelnen Ampelphasen möglich,

z. B. die größte erfasste (vorstellbare) Magnitude an einem Standort als Grenzwert für einen Wechsel von „gelb“ nach „rot“, und eine Magnituden-Größe darunter für den Wechsel von „grün“ zu „gelb“.

Zur Beurteilung einer Erdbebengefährdung wird auch das empirische Gutenberg-Richter Exponentialgesetz (sog. „Gutenberg-Richter Gesetz“) herangezogen, welches besagt, dass die durchschnittliche Zahl N von Erdbeben mit Magnituden $\geq M$, die pro Jahr registriert werden, eine abnehmende Exponentialfunktion von M ist:

$$\log_{10}(N) = a - bM, \text{ bzw. } N = 10^{a-bM},$$

wobei a und b charakteristische Konstanten für ein bestimmtes Gebiet darstellen. Besonders der b -Wert (entspricht der Steigung) kann als Maß zur Beurteilung der Erdbebengefährdung herangezogen werden. Im weltweiten Schnitt liegt der b -Wert ungefähr bei 1. Aus Anzahl und Magnitudenverteilung der seismischen Ereignisse können also Prognosen über weitere Entwicklung und das potenzielle seismische Risiko insgesamt gemacht werden, die umso verlässlicher sind, je mehr Messdaten vorliegen.

Fallbeispiele beleuchten im Bericht insbesondere die Situation der Geothermie-Projekte in Basel (CH), Landau (D), Unterhaching (D) und Soultz-sous-Forêts (F).

Zusammenfassend ergibt sich bzgl. induzierter Seismizität im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten folgender Sachstand:

1. Durch geothermische Projekte induzierte Seismizität stellt ein für den Anlagenbetreiber essentielles Hilfsmittel zur Identifizierung und Charakterisierung des geothermischen Reservoirs am betreffenden Standort dar. Sie ist von daher nahezu unverzichtbar, um die Nutzung der geothermischen Energie im Detail planen zu können.
2. Es gibt bis heute keine aufgezeichneten Beispiel einer erheblichen Gefährdung oder von Schäden, die durch induzierte Seismizität im Zusammenhang mit geothermischer Energieproduktion verbunden sind (siehe dazu auch /MAJ 12/).
3. Demgegenüber stehen die Befürchtungen in der Öffentlichkeit, dass die durch geothermische Projekte induzierte Seismizität zu unvorhergesehenen Schäden an der Erdoberfläche führen kann.
4. Injektionsmaßnahmen im Rahmen von Geothermie-Projekten sind allerdings nicht in der Lage, selbst tektonischen Spannungen im Untergrund aufzubauen, sondern nur, vorhandene natürliche Spannungen lokal abzubauen. Das führt zu

induzierter Seismizität, die folglich keine größeren Magnituden am betreffenden Standort erreichen kann, als ein natürliches, tektonisches Erdbeben. Die anthropogen bedingten Maßnahmen können allerdings zu einer zeitlichen Vorverlagerung eines seismischen Ereignisses führen. Die Vielzahl mikroseismischer Ereignisse im Zuge einer Injektionsmaßnahme ist darüber hinaus auch geeignet, größere natürliche Beben an einem Standort zu verhindern oder zu verringern.

5. Die Tatsache, dass durch Injektionsmaßnahmen induzierte Seismizität einen Abbau natürlicher Spannungen darstellt, bedeutet auch, dass in Festgesteinsarealen - im Gegensatz zu bspw. einem Sedimentbecken - mit höherer induzierter Seismizität zu rechnen ist, da sich im Festgestein höhere Spannungen aufbauen können.
6. Eine exakte Vorausberechnung der Stärke möglicher seismischer Ereignisse im Rahmen eines Geothermie-Projektes ist nicht möglich. Zur Eingrenzung solcher Ereignisse (räumlich, zeitlich und von der Intensität her) hat sich international das so genannte „Ampel-System“ etabliert: VOR Beginn der Aktivitäten an einem Geothermie-Standort muss festgelegt werden, welche durch das Projekt verursachten seismischen Ereignisse noch akzeptabel sind. Dabei spielen sowohl offizielle Grenzwerte in Regelwerken als auch die Sensibilität der Bevölkerung eine Rolle. An diesen Grenzwerten orientieren sich dann (niedrigere) Schwellenwerte, bei deren Erreichen Maßnahmen des Betreibers (z. B. Reduzierung des Injektionsdrucks, des Injektionsvolumens) greifen müssen. Diese Schwellenwerte müssen so ausgelegt sein, dass beispielsweise auch eine weitere Druckausbreitung nach Injektions-Stopp in ihren Auswirkungen mit berücksichtigt ist.
7. Standortunabhängig können konkrete Grenzwerte für eine Ampelregelung auf Grundlager der Europäischen Makroseismischen Skala (EMS-98, siehe /GRÜ 98/) festgelegt werden.

6 Rechtliche Rahmenbedingungen

6.1 Einleitung

6.1.1 Allgemeines

Nicht nur konventionelle Kraftwerke, sondern auch die Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien können mit anderen Rechtsgütern wie z. B. dem Natur- und Denkmalschutz in Konflikt geraten.⁸ Genehmigungen für Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien sind Gegenstand gerichtlicher Auseinandersetzungen. Dies beeinträchtigt insbesondere die Planungssicherheit der entsprechenden Vorhabensträger.

Zu den erneuerbaren Energien wird auch die Geothermie gezählt, obwohl zumindest bei Geothermiekraftwerken in Regionen mit geringem oder durchschnittlichem Wärmestrom möglicherweise mehr Wärmeenergie aus der Erdkruste entnommen wird, als während der Betriebsphase natürlich nachströmen kann. Mithin wird die in der Erdkruste gespeicherte Energie teilweise abgebaut. Es muss daher bei einer konservativen Betrachtung davon ausgegangen werden, dass die Nutzungsdauer eines Kraftwerks bzw. Standortes je nach Rate der entnommenen Energie begrenzt ist.⁹

Die tiefe Geothermie umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie¹⁰ über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie genutzt werden kann. Nach dieser

⁸ Vgl. *Groß*, Die Bedeutung des Umweltstaatsprinzips für die Nutzung erneuerbarer Energien, NVwZ 3/2011, Seite 129.

⁹ Die bisherige Betriebserfahrung deutscher Anlagenbetreiber sowie entsprechende Messungen begründen allerdings die Hoffnung, dass eine Auskühlung deutlich länger dauert, als ursprünglich angenommen. Mit dem Abstand zwischen Förder- und Injektionsbohrung lässt sich die Größe des Systems und damit die Dauer der Abkühlung beeinflussen. Der Abstand zwischen Injektions- und Förderbohrung muss so groß sein, dass innerhalb des vorgesehenen Bewirtschaftungszeitraums (etwa 30 Jahre) keine nachteiligen Temperaturerniedrigungen in der Förderbohrung infolge der Einleitung des abgekühlten Wassers in den Nutzhorizont über die Injektionsbohrung auftreten können (vgl. Broschüre „Tiefe Geothermie“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2. Auflage 2010, Seite 18). Neben der möglicherweise begrenzten Nutzungsdauer des jeweiligen geothermischen Reservoirs bzw. Zielhorizonts der Tiefbohrungen können auch vor allem auch technische bzw. physikalisch-chemische Aspekte an den Anlagenkomponenten die Nutzungsdauer des Primärkreislaufs und damit der Anlage beeinflussen.

¹⁰ Geothermische Energie („Erdwärme“) ist nach dem deutschen Bergrecht (Bundesberggesetz, BBergG, § 3 Abs. 3 Satz 2 Nr. 2b) ein bergfreier Bodenschatz, der dem Grundeigentum entzogen ist und dessen Aufsuchung und Gewinnung nur aufgrund einer Bergbauberechtigung i. S. der §§ 6 ff. BBergG zulässig ist, es sei denn, die Nutzung erfolgt gemäß § 4 Abs. 2 2. HS Nr. 1 BBergG in einem Grundstück aus An-

Definition beginnt die tiefe Geothermie bei einer Tiefe von mehr als 400 m und einer Temperatur über 20 °C. Allgemein üblich ist allerdings, von tiefer Geothermie (im eigentlichen Sinn) erst bei Tiefen über 1000 m und bei Temperaturen größer als 60 °C zu sprechen. Einen Sonderfall stellen Bereiche mit aufsteigenden Thermalwässern dar (z. B. Aachen, Baden-Baden, Wiesbaden).¹¹

Nutzungskonkurrenzen zu anderen Anlagen und Tätigkeiten am (geplanten) Standort des Geothermiekraftwerks sind nicht ausgeschlossen.¹² Es gilt daher auch die im Vergleich zur Energiegewinnung aus fossilen Energieträgern eventuell geringeren Umwelteinwirkungen der erneuerbaren Energien zu untersuchen, um ökologische Binnenkonflikte¹³ soweit wie möglich zu vermeiden.

6.1.2 Potentielle Umwelt- und Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit Anlagen der Tiefengeothermie

Erklärtes Ziel der Förderinitiativen zum Ausbau erneuerbarer Energien ist die Umsetzung nachhaltiger und umweltfreundlicher Konzepte, um im Rahmen der geltenden energiepolitischen und energiewirtschaftlichen Zielstellungen und Rahmenbedingungen in Deutschland einen Beitrag zur Umgestaltung der Energieversorgung zu leisten.

In diesem Zusammenhang war Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen, die in der wissenschaftlichen Literatur¹⁴, behördlichen Leitfäden¹⁵, vielfach aber auch in

lass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung, was in der Regel nur bei Nutzung oberflächennaher Geothermie der Fall sein wird.

¹¹ Vgl. Broschüre „Tiefe Geothermie“ des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), 2. Auflage 2010, Seite 8/9.

¹² Neben Nutzungskonkurrenzen zu der mit der CCS-Technologie verfolgten Verpressung und dauerhaften Speicherung von CO₂ im Untergrund oder zu anderen bergbaulichen Vorhaben, wie z. B. der Förderung und Speicherung von Kohlenwasserstoff und der On-Shore-Förderung von Erdöl und Erdgas, werden mitunter auch Nutzungskonflikte mit den Aufgaben der Trinkwasserversorgung befürchtet.

¹³ Siehe hierzu auch *Gärditz*, Ökologische Binnenkonflikte im Klimaschutzrecht, DVBl. 2010. Seite 214 ff.

¹⁴ Wie z. B. *Frenz/Preuß*e (Hrsg.), Tagungsbeiträge zum 12. Aachener Altlasten- und Berschadenskundliches Kolloquium (ABK) am 21. und 22. Juni 2010: Geothermie – Risikobeherrschung und Stand der Technik, Perspektiven und Fördermöglichkeiten, Heft 123 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik; *Bruns/Ohlhorst/Wenzel/Köppel*, Erneuerbare Energien in Deutschland – eine Biographie des Innovationsgeschehens, Dezember 2009, Seite 320 f.; *Schröder/Hesshaus* (Hrsg.), Abschlussbericht zum BMU geförderten Forschungsvorhaben 0329937A: Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen, Juni 2009, *Frick/Schröder/Rychtyk/Bohnen-schäfer/Kaltschmitt*, Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung, Dezember 2007.

¹⁵ Z. B. Leitfaden Tiefengeothermie des Hessischen Landesamts für Umwelt und Geologie, Stand Juli 2011, abrufbar unter <http://www.energieland.hessen.de/dynasite.cfm?dsmid=17151>, zuletzt aufgerufen am 08.05.2014.

öffentlichen Diskussionen z. B. von Bürgerinitiativen oder in Mediationsverfahren¹⁶ benannten potentiellen Umwelt- und Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit Anlagen der Tiefengeothermie möglichst vollständig¹⁷, sachlich und ergebnisoffen zu analysieren. Soweit in den nachfolgenden Ausführungen von Risiken gesprochen wird, sollen damit in keiner Weise die möglichen Chancen einer Energiegewinnung aus Geothermie in Abrede gestellt werden.

Im vorliegenden Projekt lag dabei der Schwerpunkt auf einer allgemeinen, generischen Analyse der tiefen hydrothermalen Geothermie¹⁸. Für eine fundierte Aussage über eine konkrete Anlage sind allerdings – wie bereits in der Einleitung unter 2. erwähnt – weitergehende Analysen des geologischen Aufbaus des Untergrundes, der eingesetzten Technik, der verwendeten Materialien und Stoffe sowie der jeweiligen Schadensvorsorge am konkreten Anlagenstandort erforderlich.

¹⁶ Wie z. B. Abschlussdokument „Ergebnisse der Mediation Tiefe Geothermie Vorderpfalz“, Mai 2013, Anrufbar unter <http://mediation-tiefe-geothermie-vorderpfalz.de/node/13> (zuletzt aufgerufen am 08.05.2014)

¹⁷ Das Ziel der Vollständigkeit wurde so weit wie im Rahmen des Forschungsprojektes möglich verfolgt. Soweit weitere Aspekte nicht hinreichend berücksichtigt sein sollten, geschah dies ohne nähere Absicht und nicht aus strategischen Überlegungen heraus. Alle Themenbereiche, denen nach Ansicht der Bearbeiter des vorliegenden Berichts, eine besondere Bedeutung zukommt, sind nach bestem Wissen und Gewissen genannt.

¹⁸ Bei der hydrothermalen Geothermie wird ein vorhandenes Aquifer, d. h. eine grundwasserführende Schicht, im Zielhorizont der Bohrung genutzt. Im Gegensatz dazu ist das sog. Hot-Dry-Rock (HDR) - Verfahren eine Variante der tiefen Geothermie in Bereichen, in denen es keine nennenswerte Menge an Grundwasser gibt. Dazu müssen in Festgesteinen in Tiefen über 3.000 m entweder vorhandene Klüfte aufgeweitet werden oder neue Klüfte in Schwächezonen geschaffen werden. Überwiegend wird dazu Hydrofracturing eingesetzt, ein Verfahren, bei dem ein Fluid mit hohem Druck in den Untergrund verpresst wird. Das größte Potenzial für HDR bzw. EGS (Enhanced Geothermal Systems) haben bei Weitem kristalline Gesteine. Da kristalline Gesteine zumindest ab einer gewissen Tiefe überall anzutreffen sind, sind HDR und EGS quasi standortunabhängig bzw. nur durch die Bohrtiefe limitiert. Bei HDR- oder EGS-Systemen wird ein kaltes Fluid über eine Injektionsbohrung in das Gestein gepumpt, über eine Förderbohrung wieder gefördert und das erwärmte Fluid zur Energienutzung verwendet. Als Fluid wurde bislang weltweit bei allen Pilotprojekten Wasser als Wärmedium eingesetzt. In Studien wurden allerdings auch bereits der theoretische Einsatz und die Vorteile der Verwendung von überkritischem CO₂ (scCO₂) als Wärmedium untersucht (siehe u. a. die Studie der TU Bergakademie Freiberg „scCO₂ – Machbarkeitsuntersuchung über den Einsatz von Hot Dry Rock Geothermie zur Elektrizitätserzeugung mit Hilfe von superkritischem CO₂“ aus dem Jahr 2005. HDR-Systeme sind in Deutschland bisher noch nicht erfolgreich realisiert worden.

6.1.3 Aktuelle Entwicklungen mit Bezug zur Geothermie in den Länderparlamenten

6.1.3.1 Allgemein

Abgesehen von sogenannten „*Kleinen Anfragen*“¹⁹ i. d. R. einzelner Abgeordneter, welche insbesondere aktuelle Vorkommnisse, landesbehördliche Entscheidungen oder Fragen des Anlagenbetriebes zum Gegenstand hatten, fanden sich parlamentarische Vorgänge in Bezug auf die Geothermie in den letzten Jahren vor allem in Bayern, Baden-Württemberg und Niedersachsen.²⁰ Dabei fällt auf, dass die Zahl der diesbezüglichen Vorgänge seit 2011 etwas zurückgegangen ist. In Rede stehen neben einer verstärkten finanziellen Förderung vor allem Vereinfachungen des Planungsverfahrens für neue Geothermie-Projekte. In Bezug auf den Einsatz der Fracking-Technik lässt sich Besorgnis bezüglich der Folgen für die Umwelt und der Wunsch nach einer verstärkten staatlichen Kontrolle erkennen.

6.1.3.1.1 Bayern

Im bayerischen Landtag wurde im April 2013 von mehreren Abgeordneten der Freien Wähler ein Vorschlag eingebracht, der vorsah, die Landesregierung aufzufordern, im Landesentwicklungsprogramm die Möglichkeit einzuführen, dass Regionale Planungsverbände Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für die Errichtung von Geothermie- und Wasserkraftanlagen (einschließlich Pumpspeicherkraftwerke) festlegen können. Dieser Vorschlag wurde jedoch abgelehnt.²¹

Im Mai 2011 stellten mehrere SPD-Abgeordnete einen Dringlichkeitsantrag, der vorsah, die Landesregierung aufzufordern, Kommunen bei der Rückabwicklung der Verträge für Geothermie-Claims behilflich zu sein, um so den Ausbau der Geothermie in Bayern zu beschleunigen. Es wurde vorgetragen, die jetzigen privaten Eigentümer von

¹⁹ Als Kleine Anfrage (auch: kleine Anfrage) bezeichnet man eine auf wenige Punkte begrenzte Fragestellung eines Parlamentariers an die Exekutive, beispielsweise eines Abgeordneten an die Regierung. Sie ist ein Instrument der parlamentarischen Kontrolle. Vgl. *Schmidt*, Das politische System Deutschlands, Seite 155.

²⁰ Für die entsprechende Recherche wurde insbesondere das beim Landtag NRW angesiedelte Online-Portal „Parlamentsspiegel“ (<http://www.parlamentsspiegel.de>) genutzt.

²¹ Ds. 16/16301 09.04.2013 „Landesentwicklungsprogramm - Zu Abschnitt 6.2 Erneuerbare Energien - Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für Geothermie und Wasserkraft“ (abgelehnt am 20.06.2013).

Bayerns Geothermie-Claims zeigten zu wenig Bereitschaft, Geothermie-Projekte voranzubringen. Dieser Vorschlag wurde ebenfalls abgelehnt.²²

Weiterhin stellten im Mai 2011 mehrere CSU- und FDP-Abgeordnete einen Dringlichkeitsantrag, der vorsah, die Landesregierung aufzufordern, sich auf Bundesebene für eine Änderung von § 35 Abs. 1 Baugesetzbuch (BauGB) einzusetzen, damit Geothermievorhaben einschließlich der Tiefengeothermie generell als privilegierte Vorhaben im Außenbereich zulässig sein. Dieser Antrag wurde angenommen.²³ Bereits im Februar 2009 forderten Abgeordnete von Bündnis 90/Die Grünen mehr Transparenz über die bergrechtlichen Erlaubnisse bei Geothermiebohrungen. Hierzu stellten sie einen Antrag²⁴, in dem die Staatsregierung aufgefordert wurde, der Öffentlichkeit die Informationen über bergrechtliche Erlaubnisse umfassender und einfacher zur Verfügung zu stellen.

6.1.3.1.2 Baden Württemberg

Bereits im Juni 2011 wurde von der SPD-Abgeordneten Rosa Grünstein beantragt, der Landtag solle die Landesregierung auffordern, zu berichten, inwieweit sie die Erstellung und Umsetzung eines bundesweiten dreidimensionalen Raumordnungsplans für sinnvoll erachte, um Nutzungskonkurrenzen zwischen Geothermie, Untertagedeponierung, Bergbau, Bergversatz, Druckluftspeicherung sowie Gas- und Trinkwasserförderung auszuschließen.²⁵ Die Antwort des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft besagte, die Überlegungen für einen – über das bisherige Planungssystem hinausgehenden – dreidimensionalen Raumordnungsplan, stünden bundesweit noch ganz am Anfang. Im Übrigen sei Gegenstand der Raumordnung, die unterschiedlichen Nutzungsansprüche an den Raum, wie sie sich beispielsweise durch die entsprechenden fachgesetzlichen Regelungen (etwa des Bergrechts) ergeben, in einen planerischen Ausgleich zu bringen. Die Festlegung allein von (dreidimensionalen) Ausschlussgebieten sei daher so nicht möglich.

²² Drs. 16/8772 vom 25.05.2011 „Kommunen bei Geothermie-Projekten unterstützen“ (abgelehnt am 12.07.2011).

²³ Drs. 16/8753 vom 24.05.2011 „Bürokratieabbau für schnelleren Ausbau und mehr Planungssicherheit bei der Geothermie zur erneuerbaren Energieversorgung“ (Zustimmung am 12.07.2011).

²⁴ Drs. 16/409 vom 05.02.2009 „Mehr Transparenz über die bergrechtlichen Erlaubnisse bei Geothermiebohrungen“.

²⁵ Drs. 15/217 vom 07.07.2011 „Unkonventionelle Gasförderung: Fracking im Land verhindern“.

6.1.3.1.3 Niedersachsen

Es wurden von der Partei DIE LINKE in den letzten Jahren wiederholt Anträge gestellt, die Geothermie-Förderung des Landes zu erhöhen, so zuletzt im September 2012. Vorgesehen waren hier u. a. 4 Mio. EUR zusätzlicher Geothermieförderung jährlich (2,0 Mio. EUR für Förderung der Geothermie-Forschung, 2,0 Mio. EUR Investition in konkrete Projekte). Der Antrag wurde jedoch abgelehnt.²⁶

Anfang 2011 stellten Abgeordnete der CDU und FDP einen Antrag mit u. a. dem Inhalt, dass die Landesregierung gebeten werden sollte, auf den Aufbau eines deutschen Zentrums für Tiefengeothermie in Niedersachsen hinzuwirken und dazu insbesondere den Ausbau der Studiengänge im Bereich der Geothermie (Forschung und Technik) zu unterstützen und die dafür erforderlichen Forschungseinrichtungen zu fördern. Der Antrag wurde in einer geänderten Form angenommen, der jedoch die Forderungen bezüglich der Geothermie-Förderung nicht mehr enthielt.²⁷

6.1.3.1.4 Rheinland-Pfalz

Auch in Rheinland-Pfalz wurden wiederholt kleine Anfragen an das Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung gerichtet und von diesem beantwortet. Hierzu gehören insbesondere Fragen zu seismischen Ereignissen und dem Aspekt, dass die Nutzung der Tiefengeothermie hierfür ein möglicher Auslöser sein könnte. Hinsichtlich der bauplanungsrechtlichen Privilegierung von Geothermiekraftwerken im Außenbereich bringt die Landesregierung zum Ausdruck, dass sich diese aus ihrer Sicht nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB richte. Die Gemeinden hätten in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, für den Außenbereich eine Bauleitplanung zu betreiben. Der Ausweisung von kleinen Gebieten im Außenbereich im Wege der Bauleitplanung regelmäßig entgegenstehende Bedenken (z. B. Ansätze für neue Siedlungsbereiche, Splitteransiedlungen) sollen im Falle der Bauleitplanung für Geothermieanlagen aufgrund der besonderen Situation zurückgestellt werden. Aus dem Bereich der Bürgerinitiativen Tiefe Geothermie wurde Ende 2010 gefordert, den § 1 Abs. 2 Nr. 2 der rheinland-pfälzischen Landesbauordnung (LBO) ersatzlos zu strei-

²⁶ Drs. 16/5164 vom 18.09.2012 „Geothermie voranbringen: + 4,0 Mio. Euro“. (am 7.11.2012 abgelehnt).

²⁷ Drs. 16/35263 vom 01.03.2011 „Einsatz für Forschung in den Bereichen Energiespeicherung und Geothermie“ (angenommen am 30.6.2011)

chen. Dieser nimmt Anlagen, die der Bergaufsicht unterliegen, mit Ausnahme von oberirdischen Gebäuden, vom Anwendungsbereich der LBO aus. Damit wurde seitens der Bürgerinitiativen das Ziel verfolgt, das die Stellung der Gemeinden im Rahmen des Einvernehmenserfordernisses nach § 36 Abs. 1 Satz 2 2. HS BauGB zu stärken. Nach Ansicht der Bürgerinitiativen würde den Gemeinden dann ein weitergehendes Mitwirkungsrecht im Verfahren zur Genehmigung von Bergbaubetrieben zustehen. Die Landesregierung verwies in diesem Zusammenhang allerdings auf das Mediationsverfahren „Tiefe Geothermie Vorderpfalz“, wo diese Fragen im Zusammenhang diskutiert würden.²⁸ Daneben gab es auch kleine Anfragen zu den Projektplanungen im Bereich der Tiefengeothermie, den projektbetreibenden Firmen/den Inhabern der Bergbauberechtigungen, dem Zeitpunkt des Auslaufens der Bergbauberechtigungen sowie den jeweiligen Planungsständen.²⁹ Hinsichtlich letzterer Aspekte verweist die Landesregierung darauf, dass die Veröffentlichung der Antworten auf diese Fragen den grundrechtlichen Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen verletzen könnte, und dass die Beantwortung dieser Teilfragen daher nur im Ausschuss in vertraulicher Sitzung erteilt werden könne.

6.1.3.2 Problematik Fracking und Umweltverträglichkeitsprüfung

Rege diskutiert wurde in den Ländern über die Fracking-Problematik und über die Einführung einer generellen Umweltverträglichkeitsprüfung bei Fracking-Vorhaben, was je nach eingesetzter Technik auch Geothermie-Projekte betreffen kann. Insgesamt ist festzustellen, dass es Besorgnis bezüglich der Gefährdung von Trinkwasservorkommen sowie Bergschäden durch nicht ausreichend überprüfte Vorhaben gibt und deshalb stärkere Kontrollen und mehr Transparenz gefordert werden.

6.1.3.2.1 Baden-Württemberg

Die Fraktionen der SPD und der GRÜNEN hat im August 2013 einen Antrag vorgelegt, dass der Landtag beschließen solle, die Landesregierung zu ersuchen, sich im Bundesrat weiterhin aktiv dafür einzusetzen, dass auf der Basis des Bundesratsbeschlusses vom 1. Februar 2013 eine gesetzliche Regelung geschaffen werde, die eine obliga-

²⁸ Vgl. Drs. 15/5099 vom 02.11.2010.

²⁹ Vgl. Drs. 15/3190 vom 09.03.2009.

torisch Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) mit der entsprechenden Bürgerbeteiligung vor jeder Zulassung von Maßnahmen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten mittels Fracking vorsähe.³⁰ Über den Antrag ist noch nicht entschieden.

6.1.3.2.2 Bayern

Im März 2013 stellten mehrere Abgeordnete der GRÜNEN einen Antrag, der unter anderem vorsah, dass der Landtag die Landesregierung auffordern solle, der geplanten Änderung der UVP-Verordnung-Bergbau und der geplanten Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes nicht zuzustimmen, sowie sich für eine Änderung des Bergrechts mit dem Ziel einer deutlichen Steigerung der Transparenz und der Bürgerbeteiligung einzusetzen.³¹ Der Antrag wurde jedoch im Juni abgelehnt.

6.1.3.2.3 Hessen

Die GRÜNEN-Fraktion hat im April 2012 beantragt, der Landtag solle die Landesregierung auffordern, sich für eine Änderung des Bundesbergbaurechts einzusetzen. Dazu zählten die Einführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung für alle bergbaurechtlichen Vorhaben, die generelle Beweislastumkehr im Falle von Bergschäden, die frühzeitige Beteiligung der kommunalen Gebietskörperschaften als Träger öffentlicher Belange sowie die Bildung von sicheren Rücklagen für später eintretende Schäden durch die Unternehmen.³²

6.1.3.2.4 Nordrhein-Westfalen

Im Mai 2013 stellten mehrere Abgeordnete der Piraten den Antrag, die Landesregierung aufzufordern, eine umfassende Beteiligungspflicht für alle Erkundungs- und Fördervorhaben vorzuschreiben. Die bisherige Verordnung zur Durchführung einer Um-

³⁰ Drs. 15/3976 vom 26.08.2013, „Kein trinkwassergefährdendes Fracking in Deutschland“

³¹ Drs. 16/16031 vom 19.03.2013 „Keine Genehmigung für Fracking zur Erschließung unkonventioneller Erdgasvorkommen“ (Ablehnung am 04.06.2013).

³² Drs. 18/5541 vom 24.04.2012 „unkonventionelle Erdgasförderung ("Fracking") in Hessen - Schutz und Sicherheit von Mensch und Umwelt gewährleisten“.

weltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben (UVP) für den Bergbau sei völlig unzureichend, da die Schwellenwerte zu hoch angesetzt seien.³³

Im Dezember 2012 beantragten mehrere Abgeordnete der CDU, der Landtag solle beschließen, die Landesregierung aufzufordern, sich im Rahmen einer Bundesratsinitiative für eine behutsame Reform des Bundesbergrechts und anverwandter Rechte stark zu machen (mit speziellem Augenmerk auf der Verstärkung der Beteiligung der Öffentlichkeit in Bundesberggesetz und der Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben sowie der Einführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung als integrierter Bestandteil von bergbaurechtlichen Planfeststellungsverfahren).³⁴

Bereits im September 2012 hatten sie beantragt zu beschließen, die Landesregierung aufzufordern, sich im Rahmen der anstehenden Änderung des Bergrechtes zur Einführung einer zwingenden UVP ebenfalls dafür einzusetzen, dass eine frühzeitige Beteiligung von Betroffenen und örtlichen Behörden sowie eine frühzeitige Informationspflicht bei Vorhaben dieser Art ins Bergrecht mit aufgenommen werde.³⁵

6.1.3.2.5 Rheinland-Pfalz

Auch in Rheinland-Pfalz ging es in kleinen Anfragen um das Thema „Geothermie und Fracking“³⁶. Hierbei wurde seitens des Ministeriums ausgeführt, dass die Methode des „Hydraulic Fracturing“ bei den hydrothermalen Geothermieprojekten in Rheinland-Pfalz nicht angewendet wurde. Auch wurden Fragen zum Betreiberwechsel und die Zukunft bezogen auf die Anlage in Landau³⁷ gestellt. Die Landesregierung verweist in ihren Antworten dabei regelmäßig auf die Diskussionen und Ergebnisse des Mediationsverfahrens „Tiefe Geothermie Vorderpfalz“. Die Dokumentation des Mediationsverfahrens beinhaltete u. a. konkrete erreichte Ergebnisse und Rahmenbedingungen für einen verantwortungsvollen Betrieb von Geothermiekraftwerken. Damit lägen weit gehende Rahmenbedingungen für ein hohes Sicherheitsniveau für Geothermieprojekte und einen verantwortungs- und maßvollen Ausbau der Nutzung der Tiefengeothermie vor,

³³ Drs. 16/2893 vom 07.05.2013, „Keine Erdgasförderung mit der Hydraulic-Fracturing-Methode (Fracking)“.

³⁴ Drs. 16/1618 04.12.2012 „Reform des Bundesberggesetzes: Bergbau sichern, Anwohner schützen“.

³⁵ Drs. 16/866 11.09.2012 „Kein Fracking in Nordrhein-Westfalen: Trinkwasserschutz hat Vorrang“

³⁶ Drs. 16/2431 vom 11.06.2013

³⁷ Drs. 16/2430 vom 11.06.2013; Drs. 16/2376 vom 29.05.2013.

durch den bis zum Jahr 2030 hinsichtlich der in Rheinland-Pfalz erzeugten Strommenge ein Anteil von 1 % erreicht werden kann. Hinsichtlich der Standorte und der Genehmigungsverfahren für Geothermieranlagen strebt die Landesregierung an, für Vorhaben der Tiefengeothermie verpflichtend eine Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) sowie eine Öffentlichkeitsbeteiligung vorzusehen.³⁸ Die Landesregierung hatte dazu bereits am 9. August 2010 einen Verordnungsantrag (Drucksache 478/10) in den Bundesrat eingebracht. Dieser fand in der Sitzung des Bundesrates am 24. September 2010 allerdings keine Mehrheit. Auch spätere, von mehreren Bundesländern gemachte Vorstöße in diese Richtung führten bislang noch zu keiner Änderung der UVP-V Bergbau. Hinsichtlich der bauplanungsrechtlichen Privilegierung von Geothermiekraftwerken im Außenbereich bringt die Landesregierung mehrfach zum Ausdruck, dass sich diese aus ihrer Sicht nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB richte. Die Gemeinden hätten in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, für den Außenbereich eine Bauleitplanung zu betreiben. Der Ausweisung von kleinen Gebieten im Außenbereich im Wege der Bauleitplanung regelmäßig entgegenstehende Bedenken (z. B. Ansätze für neue Siedlungsbereiche, Splitteransiedlungen) sollen im Falle der Bauleitplanung für Geothermieranlagen aufgrund der besonderen Situation zurückgestellt werden.

6.1.3.2.6 Schleswig-Holstein

Im November 2012 stellten Abgeordnete verschiedener Fraktionen den Antrag, die Landesregierung solle gebeten werden, bei jeder Form der Exploration und der Gewinnung von Erdöl und Erdgas in Schleswig-Holstein eine Umweltverträglichkeitsprüfung durchführen zu lassen und sich im Bundesrat für eine verbindliche Umweltverträglichkeitsprüfung für alle Frackingvorhaben sowie ein bundesweites Verbot umweltgefährdender Substanzen bei Fracking und hydraulischer Stimulation einzusetzen.³⁹ Der Antrag wurde einstimmig angenommen.

³⁸ Vgl. Drs. 16/523 vom 02.11.2011.

³⁹ Drs. 18/386 28.11.2012 „Keine Genehmigung für Fracking in Schleswig-Holstein“ (Annahme am 12.12.2012).

6.1.3.2.7 Thüringen

Im März 2012 beantragte die Fraktion der GRÜNEN, die Landesregierung aufzufordern, sich auf Bundesebene für eine grundsätzliche Reform des deutschen Bergrechtes einzusetzen, in deren Rahmen die überkommene Trennung von Grund- und Berg Eigentum abgeschafft und die generelle Beweislastumkehr im Falle von Bergschäden eingeführt würde, sowie die Erstellung eines bundesweiten Raumordnungsplans für den Untergrund zu unterstützen.⁴⁰

6.1.4 Zielsetzung, Gegenstand der Untersuchung und Vorgehensweise

Im rechtswissenschaftlichen Teil des vorliegenden Forschungsvorhabens wurde entsprechend der naturwissenschaftlich-technischen Schwerpunktsetzung untersucht, welche Regelungen es *de lege lata*⁴¹ gibt, um den zielgerichteten Ausbau der Tiefengeothermie zu lenken und Risiken für Mensch und Umwelt auszuschließen bzw. zu minimieren.

Anhand einer abstrakten systematischen Darstellung werden in Kapitel 6.2 zunächst die allgemeinen Regelungsbereiche, Normen (gesetzlich wie untergesetzlich) und (Genehmigungs-)Verfahren aufgezeigt, die für Planung, Errichtung und Betrieb einer Geothermieanlage relevant sind. Dabei wird auch der Blick auf etwaige europäische Vorgaben gerichtet. So haben z. B. die EU-Mitgliedstaaten nach Artikel 13 Abs. 1 der Richtlinie 2009/28/EG sicherzustellen, dass einzelstaatliche Vorschriften für die Genehmigungs-, Zertifizierungs- und Zulassungsverfahren, die auf Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energiequellen und die angegliederten Infrastrukturen der Übertragungs- und Verteilernetze sowie auf den Vorgang der Umwandlung von Biomasse in Biokraftstoffe oder sonstige Energieprodukte angewandt werden, verhältnismäßig und notwendig sind (Stichwort: „Vereinfachung der Verwaltungsverfahren“).⁴²

⁴⁰ Drs. 05/4160 13.03.2012, „Erkundung und Förderung von unkonventionellem Erdgas in Thüringen - Umweltrechtliche Rahmenbedingungen ändern“.

⁴¹ Der Bearbeitung liegt – soweit nichts anderes angegeben ist – das geltende Recht bis zum 31.12.2013 zugrunde. In einigen Fällen wird darüber hinaus auf sich abzeichnende rechtliche Entwicklungen hingewiesen.

⁴² Im Zusammenhang mit der Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für Anlagen nach BImSchG siehe auch: Bundesministerium des Inneren, Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für Anlagen

Den genehmigungsrechtlichen Rahmen ergänzend enthält das Kapitel 6.3 auf die Tiefengeothermie bezogene Ausführungen zu energiewirtschaftsrechtlichen sowie zu energiepolitischen Fördermaßnahmen. Kapitel 6.4 schließt die allgemeine Analyse des Rechtsrahmens mit Ausführungen zu vergaberechtlichen Aspekten ab.

Diese Form der Darstellung bietet insofern auch Grundlage und Orientierung für eine Systemanalyse in zeitlicher Reihenfolge der jeweiligen Betriebsphasen der Anlage (Erkundung/Aufsuchung, Errichtung der obertägigen Anlage, Gewinnungsbetrieb, Stilllegung/Rückbau). In den Kapiteln 9 und 10 werden die Ergebnisse sowie die Schlussfolgerung und Empfehlungen der einzelnen Kompartimente sodann zusammengefasst.

6.2 Rechtsrahmen für die Planung, die Errichtung und den Betrieb einer Geothermieranlage

Am Anfang jeder Vorhabensplanung steht die (Geschäfts-)Idee, der zur Kalkulation des Aufwands und zur weiteren konzeptionellen Entwicklung eines Businessplans – inklusive der Frage nach der gesellschaftlichen Akzeptanz des Vorhabens – eine Bestandsaufnahme der verfügbaren Daten und Informationen, der rechtlichen Regelungsbereiche und Genehmigungsvoraussetzungen sowie der Fördermöglichkeiten folgt. Hieran orientiert sich die nachfolgende Darstellung des Rechtsrahmens für die Planung, die Errichtung und den Betrieb einer Geothermieranlage.

6.2.1 Informationsrechte, Öffentlichkeitsbeteiligung und Verbandsklagemöglichkeiten

Mit einem Geothermie-Projekt ist eine Vielzahl von Informationsbedürfnissen verknüpft. Zum einen benötigt der Projektträger für eine Wirtschaftlichkeitsprognose und zur Prüfung der Rentabilität bestimmte Daten. Zum anderen benötigen die zuständigen Behörden Daten über konkrete Vorgänge, wie z. B. Bohrungen. Ebenso ist auch die Öffentlichkeit in den verschiedenen Projektstadien an Informationen interessiert. Schließlich ist zu fragen, welche Rechtsbehelfsmöglichkeiten zur Verfügung stehen, wenn Vorschriften des Umweltrechts verletzt wurden. Die folgende Darstellung versucht einen Überblick zu schaffen, wem welche Informationsrechte und Rechtsbehelfsmöglichkeiten zustehen und an welche Voraussetzungen und Einschränkungen diese geknüpft sind.

6.2.1.1 Zugang zu Informationen

Zunehmend setzen sich auch hierzulande Staat und Verwaltung mit dem Begriff *Open Data* bzw. *Open Government Data* auseinander.⁴³ Für potenzielle Projektträger oder Investoren eines Geothermie-Projektes stellt sich vorab die Frage, ob das Projekt an

⁴³ So fand etwa unter dem Titel „*Transparenz, Kooperation, Partizipation – Die digitale Verwaltung neu denken*“ am 11. und 12. April 2013 das 2. Speyerer Forum zur digitalen Lebenswelt statt. Auf Bundes-, Landes- und Kommunalebene entstehen verschiedene Datenplattformen, auf denen Datenbestände des öffentlichen Sektors im Interesse der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden. Auf Bundesebene sei exemplarisch auf die Datenplattform der Bundesregierung, GovData – Das Datenportal für Deutschland, hingewiesen.

einem konkreten Ort wirtschaftlich sinnvoll ist. Für eine sichere Planung, zur Reduzierung des Fündigkeitsrisikos und für eine möglichst genaue Prognose der Entwicklung der Förderraten, der Temperatur und des Wasserchemismus⁴⁴ sind sie auf schon vorliegende Daten angewiesen. Diese können entweder bei den entsprechenden Behörden, z. B. der Bergbehörde⁴⁵, vorhanden sein oder aber anderen privaten Unternehmen direkt vorliegen. Insbesondere das Interesse letzterer an der Geheimhaltung dieser Daten steht jedoch im Konflikt mit dem oben aufgezeigten Informationsinteresse. Durch das Umweltinformationsgesetz (UIG) für Umweltinformationen und das Geodatenzugangsgesetz (GeoZG) für Geodaten hat der Bundesgesetzgeber versucht, einen Interessenausgleich zu schaffen. Für die Länder wurden **entsprechende Landesgesetze erlassen**, die im Wesentlichen den Bundesregelungen entsprechen bzw. auf sie verweisen. Daher konzentriert sich die folgende Darstellung auf die Bundesgesetze.

6.2.1.1.1 Umweltinformationen

Das UIG regelt in Umsetzung der Vorgaben aus der Aarhus-Konvention⁴⁶ und der diese wiederum umsetzenden Richtlinie 2003/4 EG (Umweltinformationsrichtlinie - UIRL)⁴⁷ den Zugang zu Umweltinformationen. Umweltinformationen sind - unabhängig von der Art ihrer Speicherung - unter anderem Daten über den Zustand von Umweltbestandteilen wie Luft und Atmosphäre, Wasser, Boden, Landschaft sowie die Wechselwirkungen der einzelnen Umweltmedien untereinander (§ 2 Abs. 3 UIG). Das BVerwG prägte einen sehr weiten Begriff der Umweltinformationen, so dass es als unerheblich gelten sollte, ob sich eine Maßnahme mittelbar oder unmittelbar auf Umweltbestandteile auswirkt⁴⁸. Im Bereich Geothermie sind vor allem Daten über Bohrungen ein Beispiel für Umweltinformationen.

⁴⁴ *Brumme*, Geodaten für tiefengeothermische Anlagen, Mai 2009, <http://ra-brumme.de/3-Geodaten.pdf>.

⁴⁵ Nach §§ 11 bis 13 BBergG sowie §§ 3 und 5 LagerstättenG ist im bergrechtlichen Genehmigungsverfahren jeder Antragsteller verpflichtet, bestimmte für die betreffende Genehmigung relevante Daten an die Bergbehörden zu übermitteln.

⁴⁶ Convention on Access to Information, Public Participation in Decision-making and Access to Justice in Environmental Matters (Aarhus Convention), beschlossen in Aarhus, Dänemark, am 25. Juni 1998, im Folgenden auch: AK.

⁴⁷ Richtlinie 2003/4/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28.1.2003 über den Zugang der Öffentlichkeit zu Umweltinformationen.

⁴⁸ BVerwG 108, 369, 377.

Jede Person hat nach § 3 Abs. 1 UIG einen **Anspruch auf freien Zugang zu Umweltinformationen, über die eine informationspflichtige Stelle verfügt**. Dabei ist dieser Anspruch ein selbständiger materieller Anspruch, der dem Berechtigten unabhängig von der Durchführung eines Verwaltungsverfahrens selbständig einklagbar zusteht. Somit besteht er als Ausnahme und im Gegensatz zu der Tradition des deutschen Verwaltungsrechts, welches Ansprüche auf Auskunft und Information grundsätzlich nur als Verfahrensrechte gewährt. Das UIG verfolgt vielmehr - wie alle allgemeinen und besonderen Informationsfreiheitsgesetze - das Ziel der Kontrolle der Verwaltung, der Partizipation des Bürgers an Verwaltungsentscheidungen sowie eine größere Akzeptanz im Sinne eines „plébiscite de tous les jours“⁴⁹.

Zur **Geltendmachung des Anspruchs** muss der Berechtigte einen Antrag bei der informationspflichtigen Stelle stellen.

Informationspflichtige Stellen sind nach § 2 Abs. 1 UIG alle Behörden. Auch die Bergbehörde stellt (nach den entsprechenden Umweltinformationsgesetzen der Bundesländer) eine informationspflichtige Stelle dar. Dies soll ausweislich des Wortlauts der Norm grundsätzlich mit Ausnahme der obersten Bundesbehörden (Landesbehörden), soweit diese im Rahmen der Gesetzgebung oder beim Erlass von Rechtsverordnungen tätig werden, gelten. Der EuGH hat in einer jüngeren Entscheidung in diesem Zusammenhang jedoch entschieden, dass nur der parlamentarische Gesetzgeber, nicht jedoch der Ordnungsgeber vom Informationsanspruch des Bürgers freigestellt bleibt.⁵⁰ Bundesbehörden, die als Ordnungsgeber Recht setzen, sind somit nicht von der Informationspflicht befreit. Zudem sind informationspflichtige Stellen aber auch natürliche und juristische Personen des Privatrechts, soweit sie öffentliche Aufgaben wahrnehmen oder öffentliche Dienstleistungen erbringen und dabei der staatlichen Kontrolle unterstehen.

Die antragstellende Person kann Zugang zu den Informationen in Form der Akteneinsicht, der Auskunft oder in sonstiger Weise beantragen. Die informationspflichtige Stelle muss dann die Informationen in der entsprechenden Form zugänglich machen. Lediglich wenn gewichtige Gründe gegen eine bestimmte Art der Bekanntgabe sprechen

⁴⁹ Rossi, Staatliche Daten als Informationsrohstoff, NVwZ 2013, 1263, 1264.

⁵⁰ vgl. EuGH, NVwZ 2013, 1069 – Deutsche Umwelthilfe e.V./Bundesrepublik Deutschland; Ekhardt, Ausnahmen vom Umweltinformationszugang vor dem EuGH: ist Ordnungsgebung Gesetzgebung?, NVwZ 2013, 1591.

- etwa ein deutlich höherer Verwaltungsaufwand - kann die Behörde auch eine andere Form der Bekanntgabe wählen. Grundsätzlich sind die Informationen dem Antragsteller unter Berücksichtigung etwaiger von ihm angegebener Zeitpunkte, spätestens jedoch nach einem Monat zu erteilen. Im Falle eines umfangreichen und komplexen Sachverhalts verlängert sich die Frist auf zwei Monate. Die informationspflichtige Stelle trifft dagegen keine grundsätzliche Informationsbeschaffungs- bzw. Informationsaufbereitungspflicht.⁵¹ Lediglich die Bereitstellung der Daten in einer lesbaren Form kann verlangt werden. Zudem wird weder eine Gewähr für die Richtigkeit der Informationen übernommen noch ist eine individuelle weitergehende Erläuterung der Daten seitens der informationspflichtigen Stellen geschuldet.⁵²

6.2.1.1.2 Geoinformationen

Im Hinblick auf die Verbesserung der Verfügbarkeit, Qualität, Organisation, Zugänglichkeit und gemeinsamen Nutzung von Geodaten⁵³ wurde die sogenannte INSPIRE-Richtlinie⁵⁴ und in deren Umsetzung auf nationaler Ebene das Geodatenzugangsgesetz geschaffen. Die Mitgliedstaaten wurden aufgefordert Zugang zu Geodaten über ein von der Kommission verwaltetes Geoportal⁵⁵ sowie über selbst errichtete Zugangspunkte⁵⁶ zu ermöglichen.

Sowohl die INSPIRE-Richtlinie und inhaltsgleich dazu auch das Geodatenzugangsgesetz (GeoZG) definieren den Begriff der Geoinformationen, bzw. Geodaten. Danach sind Geodaten „alle Daten mit direktem oder indirektem Bezug zu einem bestimmten Standort oder geografischen Gebiet“.⁵⁷ Von besonderer Bedeutung für Geodaten sind Metadaten, also „Daten über Daten“, welche die eigentlichen Geodaten hinsichtlich eines Zeitbezuges oder der Entstehung beschreiben, § 3 Abs. 2 GeoZG. Den Metada-

⁵¹ Rossi, Staatliche Daten als Informationsrohstoff, NVwZ 2013, 1263, 1265.

⁵² Rossi, Staatliche Daten als Informationsrohstoff, NVwZ 2013, 1263, 1265.

⁵³ Im Folgenden werden die Begriffe Geodaten und Geoinformationen synonym verwendet.

⁵⁴ Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14.3.2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft; INSPIRE steht für **I**nfrastructure for **s**patial information in **E**urope.

⁵⁵ www.inspire-geoportal.eu

⁵⁶ www.geoportal.de/DE/Geoportal; Dies ist die gemeinsame Geodaten suchmaschine von Bund und Ländern.

⁵⁷ INSPIRE Richtlinie, Kapitel 1, Artikel 3 Nr. 2, § 3 Abs. 1 GeoZG.

ten liegt die ISO 19115⁵⁸ zugrunde, welche die Metadaten umfangreich definiert. Relevante Geo- bzw. Metadaten im Bereich Geothermie sind z. B. Bohrungsnamen, Bohrzeiten, Koordinaten, Endteufen, Endhorizonte, Auftraggeber, Existenz von Kernen und Kernuntersuchungen, Existenz von Bohrlochmessungen sowie die Lage von seismischen Profilen⁵⁹. Solche Informationen liegen bei den Bergämtern nicht zuletzt aufgrund der Vorgaben des Lagerstättengesetzes (LagerstG) vor. Dieses schreibt z. B. in § 3 vor, dass derjenige, welcher für eigene oder fremde Rechnung geophysikalische Untersuchungen zur Erforschung des Untergrundes ausführt, verpflichtet ist, vor Beginn der Arbeiten das Gebiet und den voraussichtlichen Umfang der Messungen sowie das hierbei anzuwendende Verfahren der zuständigen Anstalt (d.h. den zuständigen Landesämtern/Bergbehörden) anzuzeigen und ihr demnächst das Ergebnis der Untersuchungen unter Beifügung sämtlicher Unterlagen mitzuteilen. Auf Verlangen ist weitere erschöpfende Auskunft zu erteilen. In gleicher Weise ist derjenige, der für eigene oder fremde Rechnung solche Arbeiten bereits ausgeführt hat, verpflichtet, auf Verlangen der zuständigen Anstalt unverzüglich die oben aufgeführten Angaben zu machen.

Sinn und Zweck der INSPIRE-Richtlinie ist es, Geodaten sowie Metadaten im Internet dem interessierten Personenkreis über sogenannte Geodatendienste zugänglich zu machen. Beispiele für solche Dienste im Sinne der Richtlinie sind Suchdienste, Darstellungsdienste, Download-Dienste, Transformationsdienste und Dienste zum Abrufen von Geodatendiensten.

Für den Bereich der Geothermie wurden aus Bündelungszwecken die bei den Behörden bundesweit gespeicherten Geodaten im Rahmen des Projektes „geotis“ als Geodatendienst gespeichert. Das Ziel dieses Geodatendienstes ist der Aufbau eines öffentlich nutzbaren geothermischen Informationssystems für hydrogeothermische Ressourcen in Deutschland. Die Fündigkeitsvorhersage für geothermische Bohrungen soll optimiert und die Erfolgswahrscheinlichkeit für geothermische Projekte verlässlich quantifiziert werden. Das Portal steht seit Juni 2009 jedem Benutzer über das Internet zur Verfügung.

⁵⁸ ISO 19115 Geographic information-Metadaten;

<http://www.iso.org/iso/search.htm?qt=iso+19115&sort=rel&type=simple&published=on>

⁵⁹ Brumme, Geodaten für tiefengeothermische Anlagen, Mai 2009, <http://ra-brumme.de/3-Geodaten.pdf>.

Durch die Änderung des GeoZG⁶⁰ soll der Zugang zu Geodaten nun sowohl für die kommerzielle als auch die nicht kommerzielle Nutzung und Weiterverwendung geldleistungsfrei gewährt werden. Das Geodatenrecht wurde auf den Open-Data Gedanken neu ausgerichtet⁶¹. Damit wurde ein weitreichender Richtungswechsel vollzogen, da das GeoZG in seiner ursprünglichen Fassung als auch die INSPIRE Richtlinie selbst vom Entgeltprinzip ausgingen. Geodatenhaltende Stellen erteilten für die Nutzung von Geodaten(diensten) privatrechtlich ausgestaltete Lizenzen und forderten grundsätzlich eine Geldleistung⁶². Ebenso wie das UIG enthält das GeoZG aber keine Geodatenbeschaffungspflicht⁶³.

Seit März 2013 regelt die Verordnung zur Festlegung der Nutzungsbestimmungen für die Bereitstellung von Geodaten des Bundes (GeoNutzV)⁶⁴ die Modalitäten der Nutzung von Geodaten. Die Ermächtigung zum Erlass dieser Verordnung folgt aus §§ 14 Nr. 2, 11 Abs. 3 GeoZG. Sinn und Zweck der Verordnung ist ein Bürokratieabbau, weil individuelle Nutzungsverträge zukünftig entbehrlich sind. Insbesondere regelt § 2 Abs. 1 der GeoNutzV noch einmal klarstellend, dass die Nutzung von Geodaten, Geodatendiensten und Metadaten, welche dem GeoZG unterfallen, für alle bekannten und zukünftigen Zwecke kommerzieller und nicht kommerzieller Art geldleistungsfrei zulässig ist. Durch die Aufnahme „künftiger“ Zwecke ist eine Anpassung der Verordnung vor dem Hintergrund des technischen Fortschritts entbehrlich. Obwohl § 2 Abs. 1 die Nutzung somit für alle Nutzungszwecke gestattet, zählen die Absätze 2 und 3 des § 2 beispielhaft in einer „Positivliste“ die gängigen Nutzungszwecke zur Klarstellung auf. § 3 stellt Vorgaben auf, wann, unter welchen Voraussetzungen und in welcher Form der Nutzer urheberrechtliche Quellenvermerke beizufügen bzw. zu löschen hat. § 4 beschränkt schließlich die Haftung der geodatenhaltenden Stelle auf Vorsatz und grobe Fahrlässigkeit mit Ausnahme von Schäden bei Verletzung von Leben, Körper oder Gesundheit. Diese Haftungsbeschränkung ist dadurch gerechtfertigt, dass die Daten den Nutzern geldleistungsfrei zur Verfügung gestellt werden.

⁶⁰ Gesetz zur Änderung des Geodatenzugangsgesetzes vom 07.11.2012, BGBl I S. 2289.

⁶¹ Vgl. BT-Drucks. 17/9686, S. 1.

⁶² Martini/Damm, Auf dem Weg zum Open Government: Zum Regimewechsel im Geodatenrecht, DVBl. 1/2013, 1, 4.

⁶³ Martini/Damm, Auf dem Weg zum Open Government: Zum Regimewechsel im Geodatenrecht, DVBl. 1/2013, 1, 2, so auch Art. 4 Abs. 4 und Erwägungsgrund 13 der INSPIRE Richtlinie..

⁶⁴ BGBl, 2013-I Nr. 14, S. 547.

Durch diese Änderung des Zugangsregimes auf Bundesebene entsteht eine Zersplitterung des Geodatenzugangsrechtes, da die Länder bislang ihre Geodatenzugangsgesetze nicht geändert haben. Auf Landesebene sind Geodaten noch Teil eines privatrechtlichen (entgeltlichen) Angebotes⁶⁵.

Ebenso können für Geodaten auf Bundesebene, welche nicht von der INSPIRE-Richtlinie erfasst werden, nach wie vor privatrechtliche Verträge ausgehandelt sowie Gebühren verlangt werden⁶⁶. Solche und weitere Problemstellungen diskutiert und koordiniert seit 1998 der Interministerielle Ausschuss für Geoinformationswesen (IMAGI)⁶⁷.

6.2.1.1.3 Abgrenzung Umweltinformationen - Geoinformationen

Durch die obige Definition und Beschreibung von Umweltinformationen einerseits und Geoinformationen andererseits wird deutlich, dass sich die beiden Informationen inhaltlich nicht zwingend entsprechen müssen, dies aber praktisch oft der Fall ist. Auch der Europäische Richtliniengeber hat bereits ausgeführt, dass gewisse Überschneidungen möglich sind, die Richtlinien aber unabhängig voneinander gelten sollen⁶⁸. Im Bereich Verfügbarkeit, Qualität, Organisation und gemeinsamer Nutzung von Geodaten ist das GeoZG allerdings *lex specialis*⁶⁹.

Die zwei wesentlichen Unterschiede zwischen Umwelt- und Geoinformationen bestehen darin, dass Umweltinformationen im Gegensatz zu Geoinformationen nicht nur in elektronischer Form vorliegen müssen und eine Prüfung des Informationszugangs zu Umweltinformationen erst auf Antrag hin erfolgt. Der Zugang zu Geoinformationen wird hingegen ausschließlich über das Internet und andere geeignete Telekommunikationsmittel eröffnet. Die Beschränkungen des Informationszugangs unterliegen einer Vorabprüfung⁷⁰.

⁶⁵ Martini/Damm, Auf dem Weg zum Open Government: Zum Regimewechsel im Geodatenrecht, DVBl. 1/2013, 1, 6.

⁶⁶ Martini/Damm, Auf dem Weg zum Open Government: Zum Regimewechsel im Geodatenrecht, DVBl. 1/2013, 1, 6.

⁶⁷ Siehe hierzu auch die Webseite des Ausschusses (<http://www.imagi.de>).

⁶⁸ Erwägungsgrund 7 der Richtlinie 2007/2/EG.

⁶⁹ Martini/Damm, Auf dem Weg zum Open Government: Zum Regimewechsel im Geodatenrecht, DVBl. 1/2013, 1, 2.

⁷⁰ Polenz, Aufbau einer Geodateninfrastruktur, NVwZ 2010, 485, 486; siehe hierzu nachfolgend Punkt 6.2.1.1.4.

6.2.1.1.4 Beschränkungen des Zugangs für Umwelt- und Geoinformationen

Der Zugang zu Umwelt- und Geoinformationen wird nicht schrankenlos gewährt. §§ 8, 9 UIG enthalten Ablehnungsgründe für den Zugang zu Umweltinformationen. Für Geodaten sind die Beschränkungsgründe der § 8 Abs. 1 sowie § 9 nach dem UIG gemäß § 12 Abs. 2 GeoZG entsprechend anzuwenden. Diese nur eingeschränkte Verweisung auf die Beschränkungsgründe ist der Tatsache geschuldet, dass einige Beschränkungsgründe für Geodaten begrifflich schon nicht anwendbar sind. Die Beschränkung, dass ein Antrag abgelehnt werden kann, wenn die gewünschte Information nicht bei der Behörde vorhanden ist, gilt insofern nicht für Geodatensätze, da es sich bei nicht „vorhandenen“ Daten rein begrifflich schon nicht um Geodatensätze handelt. Ebenfalls greifen die Ablehnungsgründe der missbräuchlichen Antragstellung, der fehlenden Antragskonkretisierung und der Antragstellung im Hinblick auf noch nicht vervollständigtes Material nicht, da Geodaten(sätze) bereits ohne Antragstellung zugänglich sind.

Im Folgenden soll nur auf solche Ablehnungsgründe näher eingegangen werden, bei welchen sich zu erläuternde Besonderheiten ergeben. Auf die eingeschränkte Verweisung für Geodaten wird im Folgenden nicht extra hingewiesen. Es ist anzumerken, dass die Prüfung der Ablehnungsgründe für Geodaten in einer Vorfeldprüfung, also vor Einstellen in das entsprechende Portal im Internet, erfolgt, da es gerade keinen Antrag gibt, welcher dann erst abgelehnt werden kann.

6.2.1.1.4.1 § 8 UIG

Nach § 8 Abs. 2 UIG ist ein Anspruch auf Zugang zu Umweltinformationen ausgeschlossen, wenn ein Antrag auf Mitteilung der Daten offensichtlich missbräuchlich gestellt wurde, es sei denn, das öffentliche Interesse an der Bekanntgabe überwiegt.

Der Ablehnungsgrund für den Fall, dass ein Antrag *offensichtlich missbräuchlich* gestellt wurde, entspricht Art. 4 Abs. 1 lit. b) UIRL. Er ist zwar ein wichtiger Ausgleich zu dem weitgehend voraussetzungslosen Informationsanspruch nach § 3 Abs. 1 UIG, jedoch wegen der an ihn zu stellenden strengen Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf das Gebot, Ablehnungsgründe eng auszulegen (Art. 4 Abs. 2 Satz 2 UIRL), letztlich nur selten einschlägig. Zudem dürfen die tatbestandlichen Voraussetzungen der anderen gesetzlich geregelten Ablehnungsgründe nicht durch einen Rückgriff auf den Missbrauchsfall unterlaufen werden. § 8 Abs. 2 Nr. 1 UIG kommt daher im We-

sentlichen nur in den Fällen Bedeutung zu, die nicht bereits speziell von anderen Ablehnungsgründen erfasst sind.⁷¹

Missbräuchlich ist ein Antrag dann, wenn das Informationsbegehren nicht den Zwecken des UIG und der UIRL dient.⁷² Zweck des UIG ist es, den Umweltschutz zu stärken, indem der Öffentlichkeit Umweltinformationen zugänglich gemacht werden. Nicht den Zwecken des UIG dient ein Auskunftsverlangen dann, wenn dieser Zweck noch nicht einmal teilweise erfüllt ist. Man kann im Zusammenhang mit Missbrauchsmöglichkeiten unterscheiden zwischen einem behördenbezogenen Missbrauch⁷³ und einem verwendungsbezogenen Missbrauch.⁷⁴ Ein verwendungsbezogener Missbrauch liegt allerdings noch nicht bereits dann vor, wenn der Antragsteller die begehrten Informationen möglicherweise auch kommerziell (zum Nachteil Dritter) nutzen möchte, etwa bestimmte technische Daten der Industrieanlage eines Konkurrenten. Denn gerade derartige Zielsetzungen eines Antragstellers sind Gegenstand der in § 9 Abs. 1 zusammengefassten Ablehnungsgründe.⁷⁵

Begehrt ein privates Unternehmen die Daten zur rein kommerziellen Nutzung, konkret um einen geothermischen Betrieb aufzubauen, spielt eine Information der Öffentlichkeit über beispielsweise den Zustand des Bodens und eine Verbesserung des Bodenschutzes bei diesem Auskunftsverlangen keine Rolle.⁷⁶ Dennoch ist der Tatbestand der missbräuchlichen Antragstellung nicht automatisch erfüllt.

In einem zweiten Schritt ist im Falle eines missbräuchlichen Antrags zu prüfen, ob das öffentliche Interesse an der Bekanntgabe dennoch überwiegt. Allerdings ist auch hier das öffentliche Interesse mit Blick auf den Zweck des UIG zu bestimmen. Dieser ist wie erwähnt die Förderung des Umweltschutzes durch Information der Öffentlichkeit. Es wird argumentiert, dass eine Förderung des Umweltschutzes darin liege, dass durch Förderung eines Geothermie-Projektes der Ausbau erneuerbarer Energien gefördert

⁷¹ *Reidt/Schiller* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht, UIG § 8 Rn. 53.

⁷² VGH Kassel, Urteil vom 20.03.2007, Az. 11 A 1999/06, in: DÖV 2007, S. 1019.

⁷³ Für den behördenbezogenen Missbrauch nennt die Gesetzesbegründung den Fall, dass der Antragsteller bereits über die beantragten Informationen verfügt (BT-Drs. 15/3406, S. 29). Es geht also um Fälle, in denen Arbeitszeit und Arbeitskraft der informationspflichtigen Stelle missbräuchlich in Anspruch genommen werden sollen.

⁷⁴ *Reidt/Schiller* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht, UIG § 8 Rn. 55.

⁷⁵ *Reidt/Schiller* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht, UIG § 8 Rn. 55.

⁷⁶ Siehe *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefegeothermischer Anlagen“, S. 33 unter Verweis auf VGH Kassel, Beschluss vom 16.03.2006, Az. 12 Q 590/06, NVwZ 2006, S. 951.

werde. Es ist jedoch zweifelhaft, ob ein solch mittelbarer Effekt ausreichend ist, da er vom unmittelbaren Gesetzeszweck des UIG nicht erfasst wird.⁷⁷ Im Übrigen ist zu berücksichtigen, dass die Übermittlung der Umweltinformationen bzw. Geodaten im Wesentlichen dem privaten Interesse des Unternehmers am Aufbau seiner geothermischen Anlage dient und der Ausbau einer umweltgerechten Energieversorgung aus Sicht des Unternehmers lediglich ein Nebeneffekt ist. Ein überwiegendes öffentliches Interesse dürfte mithin zu verneinen sein.

Mithin würde ein entsprechender Antrag auf Zugang Umweltinformationen aus den oben aufgeführten Gründen nach § 8 Abs. 2 UIG wohl abgelehnt werden.

6.2.1.1.4.2 § 9 UIG

Nach § 9 Abs. 1 Nr. 1 UIG kann der Zugang abgelehnt werden, soweit dadurch personenbezogene Daten offenbart und dadurch Interessen der Betroffenen erheblich beeinträchtigt würden. Grundsätzlich können nach der Rechtsprechung Umwelt- und Geoinformationen personenbezogene Daten sein, da es sich bei den Daten um den Grundstückseigentümern zuzuordnende wertbildende Faktoren handele, so dass deren Veröffentlichung Einfluss auf den Wert des Grundstücks haben könne und diese Daten damit den Grundstückseigentümern zuzuordnen seien⁷⁸. Ungeachtet dessen, ob man dieser Auffassung folgen mag, wird der Schutz personenbezogener Daten häufig aus einem anderen Grund nicht als Ausschlussgrund greifen. Regelmäßig beziehen sich die bei den Bergbehörden gespeicherten Daten auf Grundstücke im Eigentum von Unternehmen und Unternehmen fallen als juristische Personen nicht unter den Schutz von personenbezogenen Daten⁷⁹. Falls es sich um Daten von natürlichen Personen handeln sollte und man den Schutzbereich der personenbezogenen Daten bejaht, ist auch hier zu prüfen, ob der Betroffene entweder der Zugänglichmachung zugestimmt hat oder ob das öffentliche Interesse an der Bekanntgabe überwiegt⁸⁰.

⁷⁷ In diesem Sinne verneinend *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefegeothermischer Anlagen“, S. 33

⁷⁸ VG Arnsberg, Urteil vom 29.11.2007, Az.: 7 K3982/06 (unveröffentlicht).

⁷⁹ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefegeothermischer Anlagen“, S. 34.

⁸⁰ Dies ist eine Einzelfallprüfung, die aber im Bereich der Daten zur Geothermie häufig zu einer Verneinung des öffentlichen Interesses führen wird, siehe 2.1.1.4.1.

Nach § 9 Abs. 1 Nr. 2 UIG kann der Zugang abgelehnt werden, soweit dadurch Rechte am geistigen Eigentum, insbesondere Urheberrechte, durch das Zugänglichmachen von Umweltinformationen verletzt würden. Für Umwelt- sowie Geoinformationen im Bereich der Geothermie ist daher zu prüfen, ob das die Daten erhebende Unternehmen daran ein Urheberrecht hat. Durch das Urheberrecht sollen persönliche geistige Schöpfungen, also Gedankenäußerungen des Menschen, welche von seiner Persönlichkeit geprägt sind, geschützt werden. Daran fehlt es jedoch bei lediglich gesammeltem und systematisiertem Tatsachenmaterial, wie z. B. Altlasten- bzw. Biotopkartierungen oder bloßen tabellarischen Zusammenfassungen von Messwerten⁸¹. Somit sind Umwelt- und Geoinformationen im Bereich der Geothermie zumindest im Regelfall nicht vom Urheberrecht geschützt und ein Zugang kann nicht über § 9 Abs. 1 Nr. 2 UIG verweigert werden.

Nach § 9 Abs. 1 Nr. 3 UIG kann der Zugang abgelehnt werden, wenn durch das Bekanntgeben Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse zugänglich gemacht würden.⁸² Daher ist zu prüfen, ob es sich bei den begehrten Informationen um Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse handelt. Nach Literatur⁸³ und Rechtsprechung⁸⁴ sind dies alle Umstände, die in Zusammenhang mit dem wirtschaftlichen Geschäftsbetrieb stehen, nur einem engen Personenkreis bekannt und damit nicht offenkundig sind, nach dem ausdrücklichen oder konkludenten Willen des Unternehmers geheim gehalten werden sollen und Gegenstand eines berechtigten wirtschaftlichen Geheimhaltungsinteresses sind. Geschäftsgeheimnisse beziehen sich dabei auf den kaufmännischen Bereich, Betriebsgeheimnisse auf den technischen Bereich eines Unternehmens. Umwelt- und Geoinformationen sind dabei den Betriebsgeheimnissen zuzuordnen. Man wird auch in einigen Fällen einen zumindest konkludenten Willen des Unternehmers bejahen können, dass er diese Daten geheim halten möchte. Wenn er selbst die Daten durch erheblichen finanziellen, technischen und zeitlichen Aufwand erworben hat, stellen Um-

⁸¹ *Fluck*, Der Schutz von Unternehmensdaten im Umweltinformationsgesetz, in: NVwZ 1994, S. 1048, 1051.

⁸² Zu den Anforderungen an die Darlegung von Betriebs- oder Geschäftsgeheimnissen durch ein Unternehmen, das von einem Begehren auf Zugang zu Umweltinformationen betroffen ist siehe OVG Koblenz, Urteil vom 6. September 2012 – 8 A 10096/12.OVG. In diesem Verfahren ging es um einen Antrag auf Zurverfügungstellung des aktuellen, auf eine Anlage bezogenen Sicherheitsberichts nach der Störfallverordnung (12. BImSchV). Die informationspflichtige Stelle hatte die in den Anhängen 5 („Verzeichnis der Anlagen und Stoffe“) und 6 („Einzelfallbetrachtungen“) zum Sicherheitsbericht enthaltenen Angaben in größerem Umfang geschwärzt.

⁸³ *Cosack/Tomerius*, Betrieblicher Geheimnisschutz und Interesse des Bürgers an Umweltinformationen bei der Aktenvorlage im Verwaltungsprozess, in: NVwZ 1993, S. 841, 842.

⁸⁴ BVerfG, Beschluss vom 14. März 2006, Az.: 1 BvR 2087, 2111/03, in BVerfGE 115, S. 205 ff.

welt- und Geodaten geldwertes Know-how dar, weil sie über die wirtschaftliche Nutzbarkeit von Grundstücken Auskunft geben. Das Geheimhaltungsinteresse besteht entweder deshalb, weil der Unternehmer die Daten selbst wirtschaftlich nutzen möchte oder aber, weil er sie an Dritte verkaufen möchte. Fraglich ist jedoch, ob die Daten nicht offenkundig sind. Man könnte argumentieren, dass die Daten von jedermann durch Messung ermittelt werden könnten und somit als offenkundig gelten könnten. Jedoch wird Offenkundigkeit nur dann angenommen, wenn die Daten ohne größeren Zeit- und Arbeitsaufwand und nicht unter nur erheblichen Mühen und Schwierigkeiten ermittelt werden können⁸⁵. Die Ermittlung von Umwelt- und Geoinformationen ist dagegen regelmäßig nur unter Einsatz von erheblichem technischem Aufwand möglich. Daher ist die Offenkundigkeit zu verneinen. Auch wenn durch die Rechtsprechung noch nicht entschieden wurde, ob Umwelt- und Geodaten im Bereich der Geothermie unter die Definition der Betriebsgeheimnisse fallen, wird dies wohl mit dem obigen Ausführungen bejaht werden können. Auch hier wird in einem zweiten Schritt eine einzel-fallabhängige Abwägung mit dem öffentlichen Interesse an der Bekanntgabe vorzunehmen sein. Insoweit wird auf das oben Gesagte verwiesen.

6.2.1.1.5 Zwischenergebnis und Ansätze zur Weiterentwicklung

Auch wenn die Bewertung des Vorliegens von Ablehnungsgründen immer im Rahmen einer Einzelfallprüfung zu erfolgen hat, so wird aufgrund der besonderen Interessen- und Ausgangslage nach dem oben Gesagten häufig ein Zugang zu den Daten abgelehnt werden können. Wenn man jedoch die Investitionen in ein Geothermie-Projekt und insgesamt den Ausbau erneuerbarer Energien fördern möchte, ist es wirtschaftlich geboten, den privaten Unternehmen einen größeren Zugang zu den schon existierenden Daten zu ermöglichen als es nach jetziger Rechtslage nach dem UIG möglich ist. Andererseits kann ein unbegrenzter Zugang schon allein aufgrund des verfassungsrechtlichen Schutzes von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen nicht erfolgen⁸⁶. De lege ferenda käme eine Ergänzung der Beschränkungsvorschriften in Betracht, welche die Begrenzungen im Einzelfall abmildert, sie aber nicht vollständig aufhebt.

⁸⁵ *Fluck*, Der Schutz von Unternehmensdaten im Umweltinformationsgesetz, in: NVwZ 1994, S. 1048, 1052.

⁸⁶ Auf der Ebene des Grundgesetzes bestehen hinsichtlich der genauen verfassungsrechtlichen Verortung des Schutzes des betriebs- und Geschäftsgeheimnisses immer noch divergierende Auffassungen. Die Anbindung an die Berufsfreiheit (Art. 12 Abs. 1 GG) wird ebenso diskutiert wie an die Eigentums-garantie (Art. 14 Abs. 1 GG).

6.2.1.1.5.1 Fristenregelung

Eine Möglichkeit wäre, den Zugang zu den Daten nach Ablauf einer bestimmten Frist seit Übermittlung an die Behörde zu gewährleisten. Die Idee dahinter ist, dass die verfassungsrechtliche Schutzwürdigkeit des ursprünglichen Inhabers an den Daten mit fortschreitender Zeit abnimmt. In diesem Zeitraum hatte der Unternehmer, der die Daten erhoben hat selbst die Möglichkeit die Daten wirtschaftlich zu nutzen, sei es durch eigenen Abbau von Bodenschätzen, sei es durch kommerzielle Veräußerung der Daten an ein anderes Unternehmen⁸⁷. Dies gilt im Bergbau umso mehr, da der Unternehmer zeitnah an die Aufsuchungsphase Bodenschätze wie Erdwärme aufsuchen wird, da die bergrechtliche Erlaubnis in rechtlicher Sicht nur befristet ist und aus wirtschaftlicher Sicht die Kosten der Aufsuchungsphase relativ hoch sind. Der Einwand von Kritikern, dass eine Fristenregelung den Anreiz zur Aufsuchung mindert, greift zu kurz. In der Praxis wird ein Unternehmen, welches den ohnehin sehr kapitalintensiven Plan zur Aufsuchung und Gewinnung von Bodenschätzen hat, den Abbau des Bodenschatzes nicht deswegen zurückstellen, weil die Erwartung besteht, dass die Daten eines anderen Unternehmens in Kürze zur Verfügung stehen werden.⁸⁸ Auch das Vorbild anderer europäischer Staaten zeigt, dass eine Fristenregelung eine Lösung im Spannungsfeld von Informationsbedürfnis und Geheimhaltungsinteresse sein kann und nicht zur Minderung des Anreizes der Rohstoffförderung führt. Hervorzuheben ist, dass selbst rohstoffreiche Länder wie Norwegen und Großbritannien, wo die Erhebung von Geodaten folglich große Relevanz hat, eine Offenlegung nach einer Frist vorsehen.

Wichtige Punkte bei der Ausgestaltung einer Fristenregelung sind Beginn und Länge der Frist. Ein gut bestimmbarer Zeitpunkt für den Beginn der Frist ist der Zeitpunkt der ursprünglichen Übermittlung der Daten an die Behörde. Dies erfolgt regelmäßig am Ende der Aufsuchungsphase, sodass der datenerhebende Unternehmer theoretisch sogar schon vor Beginn der Frist die Möglichkeit hätte, über eine wirtschaftliche Verwertung der Daten zu entscheiden. Zur Vermeidung von Verzögerungen bei der Datenübermittlung, etwa auch um den Fristbeginn hinauszuzögern, schlagen *Altrock/Große/Lehnert* vor, hinsichtlich des Fristbeginns eine Klausel aufzunehmen,

⁸⁷ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen“, S. 46.

⁸⁸ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen“, S. 46.

wonach die Frist spätestens mit dem Ablauf der Aufsuchungsgenehmigung beginnt⁸⁹. Bezüglich der Länge der Frist wird eine relativ kurze Frist für vorzugswürdig gehalten⁹⁰. Zum einen seien für investierende Unternehmen gerade neue Daten von besonderem Interesse, zum anderen ist die Aufeinanderfolge von Aufsuchung und Gewinnung grundsätzlich zügig, sodass das die Daten innehabende Unternehmen diese bereits wirtschaftlich genutzt hat. Jedoch müsse die Frist wiederum so lang sein, dass sie die Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse ausreichend schützt. Die Erfahrungen anderer europäischer Staaten könnten zur Fristbestimmung als Ausgangsgrundlage herangezogen werden. Ob diese Regelungen auf die deutsche Situation übertragbar sind und wie lange dementsprechend eine Frist konkret zu sein hat kann im Rahmen dieser Zusammenstellung allerdings nicht abschließend beurteilt werden.

6.2.1.1.5.2 Entschädigungsregelung

Ebenfalls könnte ein Interessenausgleich beim Zugang zu den Daten über eine Entschädigungsregelung erfolgen. Danach müsste das Unternehmen, welches Zugang zu den Daten verlangt, dem Unternehmen, das die Daten erhoben hat, für die Nutzung eine Entschädigung zahlen⁹¹. Eine Entschädigungsregelung hätte zunächst einmal den Vorteil, dass sie nicht im Konflikt mit den verfassungsrechtlich geschützten Geschäfts- und Betriebsgeheimnissen steht. Ein ausreichender Schutz der Geschäfts- und Betriebsgeheimnisse erfolgt automatisch über die entsprechende Ausgleichszahlung. Jedoch ist die große Schwäche einer solchen Regelung die praktische Ausgestaltung. Zum einen ist fraglich, wie man die Höhe der Entschädigung bemessen soll. Dazu müsste der Wert der Daten bestimmbar sein, an welchem sich die Ausgleichszahlung orientieren könnte. Dies wird ebenfalls schwer greifbar und gesetzlich festzuschreiben sein. Jedenfalls würden umfangreiche Berechnungen mit vielen Variablen wie Alter der Daten, Preisentwicklung, technische Entwicklung, etc. notwendig, was einen erheblichen gesetzgeberischen Aufwand bedeuten würde⁹². Auch die Durchsetzung und praktische Abwicklung des Anspruchs wären schwierig. Wenn man das Unternehmen, wel-

⁸⁹ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefergeothermischer Anlagen“, S. 47.

⁹⁰ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefergeothermischer Anlagen“, S. 47.

⁹¹ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefergeothermischer Anlagen“, S. 49.

⁹² *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefergeothermischer Anlagen“, S. 49

ches die Daten erhoben hat mit einbezieht, könnte es zu nicht überschaubaren zeitlichen Verzögerungen kommen. Ließe man die Zahlungen über die Behörde laufen, bliebe das Problem, wie man das finanzielle Risiko für die Behörde eliminiert für den Fall, dass ein Beteiligter nicht zahlt⁹³.

6.2.1.1.5.3 Kombination aus Fristen- und Entschädigungsregelung

Eine weitere Alternative wäre es, eine Fristenregelung mit einer Entschädigungsregelung zu kombinieren. Danach werden die Daten grundsätzlich nach Ablauf einer bestimmten Frist freigegeben. Will ein Unternehmen schon vorher Zugriff auf die Daten erhalten, kann es dies gegen Zahlung einer Entschädigung. Eine solche Ausgestaltung brächte die größtmögliche Flexibilität in der Handhabung mit sich. Jedoch stellen sich hier die gleichen praktischen Probleme bei der Abwicklung in Bezug auf den Entschädigungsteil. Alternativ könnte man überlegen, vor Fristablauf eine Bestimmung der Entschädigung den Verhandlungen zwischen den Parteien zu überlassen und lediglich gewisse Rahmenbedingungen für die Verhandlungen festzusetzen.

6.2.1.1.5.4 Zwischenergebnis

Eine Lösung über eine Fristenregelung dürfte im Ergebnis vorzugswürdig sein, da sie am besten praktisch umsetzbar scheint und den gesetzgeberischen Aufwand bei einem vertretbaren Maß belassen würde. Einen Schwerpunkt in der Ausarbeitung müsste bei der Bestimmung der Länge der Frist gesetzt werden. Dies ist essentiell um den verfassungsrechtlich gewährleisteten Schutz der Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse zu gewährleisten und gleichzeitig dennoch den Informationsinteressen des auskunftsuchenden Unternehmens gerecht zu werden. Auch die Effektivität des Zugangs wird durch die Fristenregelung besser gewährleistet. Zur Orientierung könnten die Regelungen einzelner europäischer Länder näher betrachtet werden. Ebenfalls könnten gesetzliche Rahmenbedingungen abgesteckt werden, die es ermöglichen Zugang zu Daten vor Ablauf der Frist durch eine Entschädigungszahlung zu erhalten, wobei die Bestimmung der Höhe der Entschädigung den Parteien aufgrund besserer praktischer Handhabung selbst überlassen werden sollte.

⁹³ *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU, „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefergeothermischer Anlagen“, S. 49

6.2.1.2 Öffentlichkeitsbeteiligung, Betroffenenbeteiligung

Im Vorfeld und während laufender Genehmigungs- und Planungsverfahren im Rahmen eines Geothermie-Projektes ist es von großer Bedeutung, sowohl die einzelnen Bürger als auch Umweltverbände durch bestimmte Informations- und Beteiligungsrechte mit einzubeziehen. Nicht zuletzt soll durch die Beteiligung die allgemeine **Akzeptanz** der Geothermie gefördert werden. In der politischen Diskussion wurde in der Vergangenheit mitunter auch eine Änderung des Bundesberggesetzes gefordert, da durch die aktuelle Gesetzeslage den öffentlichen Interessen am Bergbau immer noch weitgehend Vorrang vor gegenläufigen öffentlichen und privaten Interessen eingeräumt werde.⁹⁴ Der Koalitionsvertrag von CDU/CSU und SPD für die 18. Legislaturperiode macht allerdings zu einer Novelle des BBergG keine Aussage. Lediglich zu der ebenfalls im Zusammenhang mit einer verbesserten Beteiligung von Betroffenen und Öffentlichkeit vorgebrachten Forderung, die nach UVP-V Bergbau bestehende UVP-Pflicht auszuweiten, enthält der Koalitionsvertrag – bezogenen auf den Einsatz der Fracking-Technologie bei der unkonventionellen Erdgasgewinnung – die Aussage, dass die Koalition kurzfristig entsprechende Vorschläge zur Änderung der UVP-V Bergbau vorlegen werde.⁹⁵

Für die Frage, welchen konkreten Beitrag das Bergrecht zur Minimierung von Konflikten zwischen Bergbautreibenden und Betroffenen sowie der Öffentlichkeit leistet, bedarf es zunächst einer rechtlichen Bestandsaufnahme.⁹⁶

6.2.1.2.1 Funktionen der Öffentlichkeitsbeteiligung

Wie *Beckmann* (a.a.O) darlegt, bezwecken Verwaltungsverfahren die Durchsetzung und Wahrung des materiellen Verwaltungsrechts und darüber hinaus die Wahrung individueller Rechte der Vorhabensträger und von Drittbetroffenen. Die am Ende des Verwaltungsverfahrens stehende Behördenentscheidung soll der Durchsetzung und

⁹⁴ Siehe dazu u. a. die Anträge der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die GRÜNEN vom 14.12.2011 (BT-Drs. 17/8133), der SPD-Bundestagsfraktion zur Anpassung des deutschen Bergrechts vom 09.05.2012 (BT-Drs. 17/9560) sowie der Bundestagsfraktion Die Linke vom 21.03.2012 (BT-Drs. 17/9034).

⁹⁵ Vgl. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, „Deutschlands Zukunft gestalten“, Seite 44.

⁹⁶ Eine solche bietet u. a. *Beckmann*, Öffentlichkeitsbeteiligung in bergrechtlichen Genehmigungsverfahren, in: Öffentlichkeitsbeteiligung im Bergrecht, Heft 134 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft der Metallurgen und Bergleute e.V., Seite 9ff.

Verwirklichung des materiellen Rechts dienen.⁹⁷ Das Verfahren einschließlich der Öffentlichkeitsbeteiligung daran hat insoweit lediglich Hilfsfunktionen.⁹⁸ Es geht um eine möglichst effiziente Durchsetzung des materiellen Rechts in einem rechtsstaatlichen Verfahren durch die dafür zuständige Behörde.

Für den Individualrechtsschutz bedarf es keiner Öffentlichkeitsbeteiligung, sondern einer Beteiligung der Betroffenen, deren Rechte durch die Zulassung von Betriebsplänen beeinträchtigt werden. Je weiter der Kreis der Betroffenen zu ziehen ist, desto mehr nähert sich das Verfahren zur Beteiligung der Betroffenen einer Öffentlichkeitsbeteiligung an.

6.2.1.2.2 Begriff der „Öffentlichkeit“

Im Falle der Durchführung eines Umweltverträglichkeitsprüfungsverfahrens (UVP-Verfahrens) stehen den Bürgern weitere Informationsrechte zu. Das Öffentlichkeitsbeteiligungsgesetz⁹⁹, welches auf der Richtlinie 2003/35/EG beruht, änderte u. a. das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) und andere Fachgesetze. Danach kann die interessierte Öffentlichkeit Einsicht in die Planungsunterlagen nehmen und Stellungnahmen abgeben.

Öffentlichkeit im Sinne des UVPG sind nach der Definition in § 2 Abs. 6 UVPG einzelne oder mehrere natürliche oder juristische Personen sowie deren Vereinigungen. Betroffene Öffentlichkeit im Sinne dieses Gesetzes ist für die Beteiligung in Verfahren nach Absatz 1 Satz 1 und Absatz 4 jede Person, deren Belange durch eine Entscheidung im Sinne des Absatz 3 oder einen Plan oder ein Programm im Sinne des Absatz 5 berührt werden; hierzu gehören auch Vereinigungen, deren satzungsmäßiger Aufgabenbereich durch eine Entscheidung im Sinne des Absatz 3 oder einen Plan oder

⁹⁷ Die Formel von der „dienenden Funktion“ des Verfahrens gehört in Deutschland, in der verwaltungsrechtlichen Forschung ebenso wie in Gesetzgebung und Judikatur, zu den klassischen Argumentationsmustern des Verwaltungsrechts. Mit dem Topos wird, so das BVerfG, „im allgemeinen zum Ausdruck gebracht, dass das Verwaltungsverfahrensrecht kein ‚Wert an sich‘ sei, sondern zum Erlass materiell rechtmäßiger und zweckmäßiger Verwaltungsakte beitragen soll“ (vgl. BVerfGE 105, 48 (60)).

⁹⁸ Lediglich bei Planungsentscheidungen, zu denen bergrechtliche Planfeststellungsbeschlüsse und sonstige Betriebsplanzulassungen trotz der Verwendung des Planbegriffs als gebundene Entscheidungen ohne Ermessensvorbehalt gerade nicht zählen (es besteht ein Rechtsanspruch auf Zulassung, wenn alle Zulassungsvoraussetzungen vorliegen!), dient das Verfahren nicht nur der Durchsetzung des materiellen Rechts.

⁹⁹ „Gesetz über die Öffentlichkeitsbeteiligung in Umweltangelegenheiten nach der EG-Richtlinie 2003/35/EG (Öffentlichkeitsbeteiligungsgesetz)“ vom 9. Dezember 2006, BGBl. I Seite 2819.

ein Programm im Sinne des Absatz 5 berührt wird, darunter auch Vereinigungen zur Förderung des Umweltschutzes.

6.2.1.2.3 Öffentlichkeitsbeteiligung in bergrechtlichen Verfahren

Die Akzeptanz bergbaulicher Verfahren hängt unter anderem auch von der Transparenz der Verfahren ab, die vor einer Entscheidung über ihre Zulassung geführt werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass eine Beteiligung der Öffentlichkeit auf unterschiedlichen Wegen stattfinden und bei unterschiedlichen Verfahrensschritten ansetzen kann. Wie näher unter **Abschnitt 6.2.5 „Bergrecht“** beschrieben, gehen der Freigabe eines bergbaulichen Geothermievorhabens, regelmäßig in Form der Zulassung entsprechender Betriebspläne durch die zuständige Bergbehörde, verschiedene Verfahrensschritte voran.

6.2.1.2.3.1 Verfahren zur Verleihung einer Bergbauberechtigung

Da die Erdwärme nach § 3 Abs. 3 Satz 2 Nr. 2 b) BBergG als bergfreier Bodenschatz gilt, bedarf die Aufsuchung und Gewinnung einer entsprechend behördlich zu verleihenden Berechtigung. § 6 Satz 1 BBergG sieht dafür bei bergfreien Bodenschätzen eine Berechtigung in Gestalt einer Erlaubnis, Bewilligung oder des Bergwerkeigentums vor. Allerdings berechtigen diese nicht zur Führung eines konkreten Bergwerksbetriebs. Dafür bedarf es einer weiteren öffentlich-rechtlichen Zulassung der dem zuständigen Bergamt vorzulegenden Betriebspläne.

Im Verfahren zur Verleihung einer Aufsuchungs- und Gewinnungsberechtigung ist eine Öffentlichkeitsbeteiligung nicht vorgesehen. § 15 BBergG schreibt lediglich vor, dass die zuständige Behörde vor der Entscheidung über den Antrag den **Behörden Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben** hat, zu deren Aufgaben die Wahrnehmung öffentlicher Interessen im Sinne des § 11 Nr. 10 BBergG gehört. **Nach der Rspr. des BVerwG gehören hierzu auch die Gemeinden.**¹⁰⁰ Das bedeutet aber nicht, dass über

¹⁰⁰ Ob in dem Verfahren zur Verleihung einer Aufsuchungs- und Gewinnungsberechtigung auch die Gemeinden zu beteiligen sind, ist umstritten. Teilweise (z. B. von *Pienschulte/Graf Vitzthum*, Kommentar zum BBergG, 2. Aufl., 2013, § 15 Rn 8) wird dies mit der Begründung abgelehnt, dass die Gemeinden keine Behörden seien und ihre Beteiligung ausdrücklich erst im Betriebsplanverfahren (§ 54 S. 2 BBergG) stattfinden solle. Nach Auffassung des BVerwG gehören jedoch auch Gemeinden zu den Be-

die Gemeinden eine mittelbare Öffentlichkeitsbeteiligung stattfindet. Die Gemeinden sind nicht berechtigt im Rahmen ihrer Beteiligung Individualinteressen einzelner Bürger geltend zu machen. Das Beteiligungsrecht dient insbesondere der umfassenden Information der Verwaltungsbehörde und gewährt der Gemeinde keine eigene, selbständig durchsetzbare Rechtsposition im Sinne eines subjektiv-öffentlichen Rechts. Wird das Beteiligungsrecht der Gemeinde missachtet, können Gemeinden nach der bisherigen Rspr. des BVerwG daher auch keine Verletzung eigener Rechte im Sinne des § 42 Abs. 2 VwGO herleiten. Die Annahme, dass der Gesetzgeber eine so weitreichende Rechtsposition hat einräumen wollen, liegt nach Ansicht des BVerwG schon deshalb gänzlich fern, weil eine Gemeinde durch eine bergrechtliche Bewilligung materiell-rechtlich nicht in einer Weise betroffen sein könne, dass die Wahrung ihrer Rechte gegenüber einer künftigen Ausübung der Bergbauberechtigung ausgeschlossen oder erheblich erschwert wäre.¹⁰¹ Fragwürdig erscheint an dieser Ansicht, dass damit eine isolierte bergrechtliche Betrachtungsweise befördert wird. Das sinnvolle Zusammenwirken mit anderen Planungsträgern (mit der Gemeinde z. B. im Bereich der Bauleitplanung nach BauGB) könnte damit auf der Zeitachse nachteilig verschoben und die Rechtsposition der Gemeinde geschwächt werden. Dass diese dann ihrerseits auf andere Weise und mit anderen Mitteln versucht, den mit entsprechenden Bergbauberechtigungen ausgestatteten Vorhabensträgern eines Geothermieprojektes entgegenzutreten, ist nicht auszuschließen.

6.2.1.2.3.2 Verfahren zur Zulassung von Betriebsplänen

Im Verfahren zur Zulassung von Betriebsplänen ist nach der Art der Betriebspläne zu unterscheiden. Das BBergG unterscheidet zwischen Rahmenbetriebsplänen, Hauptbetriebsplänen, Sonderbetriebsplänen, gemeinschaftlichen Betriebsplänen und Abschlussbetriebsplänen.

Besondere Bedeutung haben im vorliegenden Zusammenhang die Vorschriften des § 52 Abs. 2a BBergG und des § 57c BBergG zum obligatorischen Rahmenbetriebsplan. Die Aufstellung eines Rahmenbetriebsplanes ist zu verlangen und für dessen

hörden, zu deren Aufgaben die Wahrnehmung öffentlicher Interessen im Sinne des § 11 Abs. 10 BBergG gehört und denen deshalb gemäß § 15 BBergG vor der Entscheidung über die Bergbauberechtigung Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben ist (vgl. BVerwG, Beschluss vom 15.10.1998 – 4 B 94/98, NVwZ 1999, 876).

¹⁰¹ Beckmann, a. a. O., Seite 15 u. a. unter Verweis auf BVerwG 7 C 23.89 – BVerwGE 85, 54.

Zulassung ein Planfeststellungsverfahren nach Maßgabe der §§ 57a und 57b BBergG durchzuführen, wenn ein Vorhaben nach § 57c BBergG einer **Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP)** bedarf. Der Rahmenbetriebsplan hat die Funktion, die vielfältigen bergbaulichen Tätigkeiten, für die Hauptbetriebspläne und Sonderbetriebspläne vorzulegen sind, zu koordinieren.

Für die Vorhaben, die einer UVP unterliegen, ist das als **Planfeststellungsverfahren** betriebene Rahmenbetriebsplanverfahren das Trägerverfahren für die UVP. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Verfahrensregelungen nicht ausschließlich aus dem UVPG ergeben, denn die §§ 5 bis 14 (inkl. § 9 UVPG Beteiligung der Öffentlichkeit) finden gemäß §§ 18 Satz 2 UVPG keine Anwendung. Die Verfahrensregelungen ergeben sich aus § 57a BBergG, nach § 5 BBergG aus §§ 72 ff. VwVfG und aus §§ 1 bis 4 und 15 bis 25 UVPG. Dies bedeutet vor allem, dass das **Anhörungsverfahren nach § 73 VwVfG** durchzuführen ist, welches die Bekanntmachung, die Auslegung des Plans in den Gemeinden, in denen sich das Vorhaben voraussichtlich auswirken wird, die Möglichkeit, fristgerecht Einwendungen gegen den Plan zu erheben, sowie den entsprechenden Erörterungstermin beinhaltet.

Welche bergbaulichen Vorhaben UVP-pflichtig sind, bestimmt sich nach der auf der Grundlage des § 57 c Satz 1 Nr. 1 BBergG erlassenen **UVP-V Bergbau**¹⁰². Die UVP-V Bergbau stellt in Verbindung mit den §§ 4, 18 UVPG eine Sonderregelung für die UVP in bergbaulichen Vorhaben dar, die der unmittelbaren Abwendung des UVPG vorgeht.

Eine UVP-Pflicht besteht derzeit gemäß § 1 Nr. 8 UVPV Bergbau für Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme ab 1000 m Teufe, sofern sie in ausgewiesenen Naturschutzgebieten, europäischen Vogelschutzgebieten oder FFH-Gebieten liegen. Bemühungen diese Vorschrift so zu ändern, dass diese Bohrungen zur Gewinnung von Erdwärme ab 1000 m Teufe unabhängig davon, ob sie in den vorgenannten Gebieten stattfinden, der UVP-Pflicht zu unterwerfen, haben bislang keinen Erfolg gehabt.¹⁰³

Zu den weiteren Details bergrechtlicher Betriebspläne sowie zur UVP-Pflichtigkeit von Vorhaben der Tiefengeothermie siehe Kapitel 6.2.5.3.

¹⁰² Basierend auf der Ermächtigungsgrundlage des § 57 c Satz 1 Nr. 1 BBergG wurde die Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben vom 13. 7. 1990 erlassen, zuletzt geändert durch Artikel 8 der Verordnung zur Neufassung und Änderung von Vorschriften auf dem Gebiet des Energiewirtschaftsrechts sowie des Bergrechts vom 3. September 2010 (BGBl. I S. 1261).

¹⁰³ Siehe dazu u. a. den Antrag des Landes Rheinland-Pfalz (BR-Drs. 478/10).

6.2.1.2.4 Gesetz zur Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung und Vereinheitlichung von Planfeststellungsverfahren (PIVereinHG)

Durch das Gesetz zur Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung und Vereinheitlichung von Planfeststellungsverfahren (PIVereinHG) vom 31.5.2013¹⁰⁴ wurde unter anderem im Verwaltungsverfahrensgesetz (VwVfG) ein neuer Absatz 3 zur frühen Öffentlichkeitsbeteiligung in § 25 eingefügt. Die Vorschrift, welche am 7.6.2013 in Kraft getreten ist lautet:

¹Die Behörde wirkt darauf hin, dass der Träger bei der Planung von Vorhaben, die nicht nur unwesentliche Auswirkungen auf die Belange einer größeren Zahl von Dritten haben können, die betroffene Öffentlichkeit frühzeitig über die Ziele des Vorhabens, die Mittel, es zu verwirklichen, und die voraussichtlichen Auswirkungen des Vorhabens unterrichtet (frühe Öffentlichkeitsbeteiligung). ²Die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung soll möglichst bereits vor Stellung eines Antrags stattfinden. ³Der betroffenen Öffentlichkeit soll Gelegenheit zur Äußerung und zur Erörterung gegeben werden. ⁴Das Ergebnis der vor Antragstellung durchgeführten frühen Öffentlichkeitsbeteiligung soll der betroffenen Öffentlichkeit und der Behörde spätestens mit der Antragstellung, im Übrigen unverzüglich mitgeteilt werden. ⁵Satz 1 gilt nicht, soweit die betroffene Öffentlichkeit bereits nach anderen Rechtsvorschriften vor der Antragstellung zu beteiligen ist. ⁶Beteiligungsrechte nach anderen Rechtsvorschriften bleiben unberührt.

Diese Regelung gilt ausweislich des Wortlauts für Vorhaben ab einer gewissen Bedeutung. Der Begriff „Vorhaben“ ist dabei weit zu verstehen als Projekte, welche „die Errichtung oder Änderung von Infrastruktureinrichtungen, Anlagen oder sonstigen Bauwerken, die der Genehmigung oder Planfeststellung bedürfen“¹⁰⁵. Da im Bereich der Tiefengeothermie regelmäßig bergrechtliche Genehmigungsverfahren durchzuführen sind, ist ein Geothermie-Projekt ein solches „Vorhaben“. Regelmäßig wird ein solches Vorhaben auch nicht nur unwesentliche Auswirkungen haben, da es als Vorhaben der Energieversorgung Interessen der Allgemeinheit berührt¹⁰⁶, sodass der Anwendungsbereich des § 25 Abs. 3 VwVfG regelmäßig eröffnet sein wird.

¹⁰⁴ BGBl. I S. 1388.

¹⁰⁵ Schmitz/Prell, Planungsvereinheitlichungsgesetz, NVwZ 2013, 745, 746.

¹⁰⁶ Beispielhaft seien hier Einwirkungen durch Immissionen (z.B. mögliche seismische Ereignisse) genannt.

Hintergrund der Neuschaffung dieser Regelung ist, dass die Öffentlichkeit schon zu einem Zeitpunkt beteiligt werden soll, in welchem ein Vorhaben noch nicht derart konkretisiert und fortgeschritten ist, dass Änderungen und Einflussnahmen praktisch und wirtschaftlich nicht oder nicht in ausreichendem Maße realisierbar sind. Vielmehr sollen relevante Einwände, Hinweise auf technische oder sonstige praktische Umsetzungsprobleme, aber auch Verbesserungsvorschläge zu einem Zeitpunkt vorgebracht werden, in welchem die wesentlichen Entscheidungen, insbesondere solche über die Auswahl zwischen mehreren Verwirklichungsvarianten, noch nicht getroffen worden sind¹⁰⁷. Neben der Vermeidung von Konflikten und Herstellung von Akzeptanz für die Öffentlichkeit soll eine frühe Öffentlichkeitsbeteiligung auch der wirtschaftlichen Optimierung der Planung von Großvorhaben dienen¹⁰⁸. Die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung dient somit anderen Zwecken als die (formelle) Beteiligung im späteren Verfahren¹⁰⁹.

Nach der Regelung hat die zuständige Behörde eine „Hinwirkungspflicht“ dahingehend, dass sie auf den Vorhabensträger einwirkt eine solche frühe Öffentlichkeitsbeteiligung durchzuführen und dies möglichst vor Stellung des entsprechenden Antrags. Zudem ist nach § 25 Abs. 3 Satz 4 VwVfG das Ergebnis der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung sowohl der Behörde als auch der betroffenen Öffentlichkeit mitzuteilen. Die Behörde berücksichtigt die Ergebnisse im jeweiligen Prüfprogramm, allerdings besteht weder eine Bindungswirkung im positiven noch im negativen Sinn¹¹⁰.

Ein Verstoß der Behörde gegen die Hinwirkungspflicht stellt einen Verfahrensfehler dar, der jedoch in der Regel nach § 46 VwVfG unbeachtlich sein wird. Für den Vorhabensträger selbst ist die Öffentlichkeitsbeteiligung ohnehin keine einklagbare Pflicht als vielmehr eine Obliegenheit. Die Nichtdurchführung hat rein rechtlich keine Konsequenzen im späteren Genehmigungsverfahren¹¹¹. Allerdings wird ein Verweigern der Öffentlichkeitsbeteiligung den Vorhabensträger gegenüber der Öffentlichkeit in Erklärungsnot bringen. Des Weiteren kann eine Öffentlichkeitsbeteiligung - wie bereits dargestellt - auch für den Vorhabensträger eine Optimierung des Vorhabens bedeuten.

¹⁰⁷ *Ziekow*, Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung, NVwZ 2013, 754, 754.

¹⁰⁸ *Schmitz/Prell*, Planungsvereinheitlichungsgesetz, NVwZ 2013, 745, 747.

¹⁰⁹ Vgl. BT-Dr 17/9666, S. 18.

¹¹⁰ *Schmitz/Prell*, Planungsvereinheitlichungsgesetz, NVwZ 2013, 745, 747

¹¹¹ *Ziekow*, Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung, NVwZ 2013, 754, 759.

Die Regelungen des Verwaltungsverfahrensgesetzes (VwVfG) des Bundes gelten regelmäßig auch für bergbauliche Vorhaben. Nach § 5 BBergG ist auf die Ausführung des BBergG und der aufgrund des BBergG erlassenen Rechtsverordnungen, soweit dort nichts anderes bestimmt ist, das Verwaltungsverfahrensgesetz anzuwenden. Nach § 1 Abs. 3 VwVfG des Bundes gilt das Gesetz jedoch für die Ausführung von Bundesrecht durch die Länder nicht, wenn die öffentlich-rechtliche Verwaltungstätigkeit der Behörden landesrechtlich durch ein eigenes VwVfG geregelt ist. In den Bundesländern, die ein eigenes VwVfG erlassen haben, ist deshalb grundsätzlich das Landesverwaltungsverfahrensgesetz anzuwenden. Dementsprechend kommt es hinsichtlich der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung darauf an, ob und inwieweit die einzelnen Bundesländer die Bundesregelung in ihre eigenen Verwaltungsverfahrensgesetze übernehmen bzw. auf diese verweisen.

Inwieweit eine frühe Öffentlichkeitsbeteiligung im Rahmen eines bergrechtlichen Planfeststellungsverfahrens für die Zulassung eines Rahmenbetriebsplans sinnvoll und insbesondere akzeptanzfördernd ist, bleibt abzuwarten. Die frühe Bürgerbeteiligung macht nur Sinn, wenn wesentliche Entscheidungen, insbesondere über die Auswahl zwischen unterschiedlichen Alternativen bzw. über den Bedarf noch nicht getroffen sind.¹¹² Es darf in diesem Zusammenhang nicht verkannt werden, dass es sich bei dem bergrechtlichen Planfeststellungsbeschluss um eine gebundene Entscheidung handelt, ein Ermessen der Behörde mithin regelmäßig nicht besteht. Gleichwohl besteht z. B. im Rahmen der Interessenabwägung nach § 48 Abs. 2 BBergG sowie im Rahmen der behördlichen Beurteilung der Zulassungsvoraussetzungen nach § 55 Abs. 1 BBergG eine (wenn auch begrenzte) Möglichkeit, die Ergebnisse der frühen Öffentlichkeitsbeteiligung im Zulassungsverfahren zu berücksichtigen.

6.2.1.2.5 Mediation

Um eine Information und Beteiligung der breiten Öffentlichkeit zu gewährleisten, haben sich bislang sogenannte Mediationsverfahren im Rahmen von Geothermie-Projekten etabliert. Mediation bezeichnet allgemein ein strukturiertes freiwilliges Verfahren zur konstruktiven Beilegung eines Konfliktes. Im Bereich der Geothermie bedeutet dies, dass sich eine Gruppe von Bürgern mit den Betreibern von Geothermie-Kraftwerken

¹¹² Beckmann, a. a. O., Seite 18 unter Hinweis auf Ziekow, NVwZ 2013, 754.

treffen kann und durch Klärung von Fragen und Einreichung von Empfehlungen aktiv am Projekt beteiligt wird. Geleitet wird die Mediation von einem sogenannten Moderator. Ein Beispiel für ein durchgeführtes Mediationsverfahren im Bereich der Geothermie ist das Verfahren „Tiefe Geothermie Vorderpfalz“. Dieses Verfahren wurde Ende 2010 von der rheinland-pfälzischen Landesregierung ins Leben gerufen, da es sowohl bei bestehenden Standorten von Geothermie-Kraftwerken als auch bei der Planung weiterer Projekte zu negativen Reaktionen in der Bevölkerung gekommen war¹¹³. Im Zusammenhang mit diesem Verfahren traf sich eine Mediationsgruppe mehrmals, um strittige Fragen zu klären, Informationen zusammenzustellen und Empfehlungen zu erarbeiten. Die Mediation hat sich die *„Schaffung von Transparenz und Information (...) sowie Ermittlung und objektive Bewertung von Risiken und Dokumentation von Chancen und Risiken und deren Verteilung zur Aufgabe gesetzt. Weiterhin sollen Grundlagen für eine Abwägung des ökonomischen und potenziellen ökologischen Nutzens der tiefen Geothermie zu deren ökologischen Risiken gelegt werden“*¹¹⁴.

6.2.1.2.6 Informationen nach UIG, Unterrichtung der Öffentlichkeit

Gemäß § 10 UIG haben die nach dem UIG informationspflichtigen Stellen die Pflicht, die Öffentlichkeit in angemessenem Umfang **aktiv und systematisch** über die Umwelt zu unterrichten. Bestimmte Umweltinformationen müssen veröffentlicht und verbreitet werden (sogenannte aktive Informationspflicht).

Zu den zu verbreitenden Umweltinformationen gehören nach § 10 Abs. 2 UIG zumindest:

1. *der Wortlaut von völkerrechtlichen Verträgen, das von den Organen der Europäischen Gemeinschaften erlassene Gemeinschaftsrecht sowie Rechtsvorschriften von Bund, Ländern oder Kommunen über die Umwelt oder mit Bezug zur Umwelt;*
2. *politische Konzepte sowie Pläne und Programme mit Bezug zur Umwelt;*
3. *Berichte über den Stand der Umsetzung von Rechtsvorschriften sowie Konzepten, Plänen und Programmen nach den Nummern 1 und 2, sofern solche Be-*

¹¹³ <http://www.guck-emol.de/bigf/Mediation-Geothermie-Schlussdokument-120312.pdf>

¹¹⁴ Ergebnisse der Mediation Tiefe Geothermie Vorderpfalz, S. 2, Zitat aus der Arbeitsvereinbarung Mediation.

richte von den jeweiligen informationspflichtigen Stellen in elektronischer Form ausgearbeitet worden sind oder bereitgehalten werden;

4. *Daten oder Zusammenfassungen von Daten aus der Überwachung von Tätigkeiten, die sich auf die Umwelt auswirken oder wahrscheinlich auswirken;*
5. *Zulassungsentscheidungen, die erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt haben, und Umweltvereinbarungen sowie*
6. *zusammenfassende Darstellung und Bewertung der Umweltauswirkungen nach den §§ 11 und 12 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. September 2001 (BGBl. I S. 2350), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 24. Juni 2004 (BGBl. I S. 1359) geändert worden ist, und Risikobewertungen im Hinblick auf Umweltbestandteile nach § 2 Abs. 3 Nr. 1.*

Die Unterrichtungspflicht ist gegenständlich beschränkt auf die bei der informationspflichtigen Stelle vorhandenen bzw. für sie bei einer anderen Stelle aufbewahrten Umweltinformationen.¹¹⁵ Damit geht die Unterrichtungspflicht nicht weiter als der passive Informationsanspruch nach § 3 Abs. 1 UIG.

Unter **Zulassungsentscheidungen** im Sinne des § 10 Abs. 2 Satz 1 Nr. 5 UIG sind alle vorhabenbezogenen Behördenakte zu verstehen, die nach deutschem Recht notwendig sind, um ein Einzelvorhaben verwirklichen zu können. Erfasst werden sowohl Genehmigungen aller Art (Errichtungs- und Betriebsgenehmigungen, Teilgenehmigungen, Änderungsgenehmigungen, Vorbescheide usw.) als auch Planfeststellungsbeschlüsse (BT-Drs. 15/3406, S. 21).¹¹⁶ Die Zulassungsentscheidung muss **erhebliche Auswirkungen** auf die Umwelt haben. Wann die Auswirkungen die Erheblichkeitsschwelle überschreiten, wird nicht näher festgelegt. Auch aus den Gesetzesmaterialien ergibt sich hierzu nichts. Auswirkungen auf die Umwelt sind alle Veränderungen der menschlichen Gesundheit oder der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit einzelner Bestandteile der Umwelt oder der Umwelt insgesamt, die von einem Vorhaben verursacht werden können. Als Indiz für das Vorliegen erheblicher Umweltauswirkungen ist die UVP-Pflichtigkeit des Vorhabens anzusehen. Diese kann

¹¹⁵ *Reidt/Schiller* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht Kommentar, UIG, § 10 Rn. 5.

¹¹⁶ *Reidt/Schiller* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht Kommentar, UIG, § 10 Rn. 18.

sich sowohl aus der Regelpflicht gemäß § 3b UVPG oder infolge einer Vorprüfung gemäß § 3c UVPG ergeben.¹¹⁷

Allerdings wird in § 10 Abs. 6 UIG auch auf die **Ausschlussgründe der §§ 8 und 9 UIG** verwiesen. Soweit Umweltinformationen unter die dort genannten Ausschlussgründe fallen (z. B. Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen), besteht auch keine Unterrichtungspflicht nach § 10 Abs. 1 UIG. Auch hieraus könnte sich ein entsprechendes Spannungsfeld ergeben und es wäre abzuwägen, ob das öffentliche Interesse an der Bekanntgabe überwiegt.

6.2.1.2.7 Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Bauleitplanung

Bei der Aufstellung der Bauleitpläne, welche weichenstellend sind für die konkreten Standorte von Geothermieranlagen¹¹⁸, ist gemäß § 3 BauGB die Öffentlichkeit zu beteiligen. Dies geschieht in zwei Phasen. Die erste Phase nach § 3 Abs. 1 Satz 1 BauGB umfasst die öffentliche Unterrichtung über Ziel, Zwecke, Auswirkungen der Planung und etwaige Alternativen und die Anhörung der Öffentlichkeit. Außer den beiden Verfahrensstrukturen „Darlegung und Anhörung“ schreibt Abs. 1 nur die das Verfahren charakterisierende Frühzeitigkeit vor. Die konkrete Art und Ausgestaltung wird der Gemeinde überlassen¹¹⁹. In Phase 2 soll der Öffentlichkeit durch Auslegung der Entwürfe der Bauleitpläne Gelegenheit zur Stellungnahme gegeben werden, § 3 Abs. 2 BauGB. Zu diesem Zweck hat die Gemeinde nach § 3 Abs. 2 Satz 2 BauGB Ort und Dauer der Auslegung sowie Angaben darüber, welche Arten umweltbezogener Informationen verfügbar sind, mindestens eine Woche vor Auslegung ortsüblich bekannt zu machen. Das Bundesverwaltungsgericht hat jüngst entschieden, dass diese Verpflichtung konkret bedeutet, dass die Gemeinden die in den vorhandenen Stellungnahmen und Unterlagen behandelten Umweltthemen nach Themenblöcken zusammenfassen und diese in der Auslegungsbekanntmachung schlagwortartig charakterisieren müssen¹²⁰. Das Bekanntmachungserfordernis erstreckt sich auch auf solche Arten verfügbarer Umweltinformationen, die in Stellungnahmen enthalten sind, die die Gemeinde für unwesentlich hält und deshalb nicht auszulegen beabsichtigt. Durch diese Ent-

¹¹⁷ *Reidt/Schiller* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht Kommentar, UIG, § 10 Rn. 19.

¹¹⁸ Dazu siehe Kapitel 6.2.2.

¹¹⁹ *Battis/Krautzberger/Löhr*, Baugesetzbuch BauGB, § 3 Rn. 1

¹²⁰ BVerwG, Urteil vom 18.7.2013, NVwZ 2013, 1413.

scheidung wurde den Vorgaben des Art. 6 II lit. d der Aarhus-Konvention bzw. Art. 3 Nr. 4 der Öffentlichkeitsbeteiligungsrichtlinie, welche § 3 Abs. 2 Satz 2 BauGB umsetzt, Ausdruck verliehen und die Beteiligungsrechte der Öffentlichkeit im Vorfeld umweltbezogener Entscheidungsverfahren gestärkt.

6.2.1.3 Umweltrechtsbehelfe

Die oben dargestellten Informationsansprüche werden vor allem im Vorfeld (bei der wirtschaftlichen Planung) eines Geothermie-Projektes relevant. Im Folgenden soll nun aufgezeigt werden, welche Rechte einzelnen Personen oder Gruppen zustehen, wenn ein Geothermie-Projekt schon fortgeschritten oder realisiert worden ist und der Verdacht besteht, dass umweltrechtliche Vorschriften verletzt wurden. Dies könnten im Rahmen eines Geothermie-Projektes, um nur einige Beispiele zu nennen, Vorschriften nach dem WHG oder dem BBodSchG im Rahmen einer Bohrung sein oder aber immissionsschutzrechtliche Vorgaben durch die Errichtung eines Geothermie-Kraftwerkes.

Mit dem Gesetz über ergänzende Vorschriften zu Rechtsbehelfen in Umweltangelegenheiten nach der EG-Richtlinie 2003/35/EG (Umweltrechtsbehelfsgesetz - UmwRG) wurde im deutschen Recht erstmals die erweiterte Vereins- oder Verbandsklage gegen umweltrechtliche Zulassungsentscheidungen geschaffen. Dies ist insoweit außergewöhnlich, als dass die deutsche Verwaltungsgerichtsordnung grundsätzlich vom System des Individualrechtsschutzes ausgeht. Nach § 42 Abs. 2 VwGO ist grundsätzlich nur derjenige klagebefugt, welcher geltend macht, durch den Verwaltungsakt in eigenen subjektiv-öffentlichen Rechten verletzt zu sein. Gegen eine Genehmigung eines Geothermie-Kraftwerkes war bislang nur ein Nachbar klagebefugt.¹²¹

Hintergrund des UmwRG ist die Richtlinie 2003/35/EG¹²² (Öffentlichkeitsbeteiligungsrichtlinie), welche die UVP-Richtlinie¹²³ (insbesondere Einführung des Art. 10 a) abän-

¹²¹ Eine Ausnahme bildet insoweit § 64 BNatSchG, nach welchem auch schon vor Einführung des UmwRG eine begrenzte Möglichkeit der Verbandsklage bestand.

¹²² RICHTLINIE 2003/35/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 26. Mai 2003 über die Beteiligung der Öffentlichkeit bei der Ausarbeitung bestimmter umweltbezogener Pläne und Programme und zur Änderung der Richtlinien 85/337/EWG und 96/61/EG des Rates in Bezug auf die Öffentlichkeitsbeteiligung und den Zugang zu Gerichten.

¹²³ RICHTLINIE 85/337/EWG DES RATES vom 27. Juni 1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten.

dert und ihrerseits die Vorgaben der Aarhus-Konvention¹²⁴ umsetzt. Die Richtlinie hat das Ziel die Umweltqualität zu erhalten, zu sichern und zu verbessern sowie die menschliche Gesundheit zu schützen, indem sie die Beteiligung der Öffentlichkeit - gerade auch die von Vereinigungen - und deren Rechtsschutz fördern und ausbauen will.

Das UmwRG eröffnet Vereinigungen, welche vorwiegend das Ziel des Umweltschutzes fördern (Umweltvereinigungen), die Möglichkeit, gegen Umweltrechtsverstöße mit einem Rechtsbehelf, d. h. Widerspruch oder Klage, vorzugehen. Um jedoch einen solchen Rechtsbehelf einlegen zu können, brauchen die Umweltvereinigungen eine Anerkennung. Für die Anerkennung muss der Verein (in Anlehnung an das alte BNatSchG) folgende Kriterien erfüllen:

- Ideelle und vorwiegende Förderung der Ziele des Umweltschutzes
- Mindestens dreijähriges Bestehen und Tätigkeit zur Förderung des Umweltschutzes
- Sachgerechte Aufgabenerfüllung
- Gemeinnützigkeit
- Jedermann-Prinzip

Zunächst hat sich mit Inkrafttreten des UmwRG jedoch lediglich der Kreis der Klageberechtigten auf die anerkannten Umweltvereinigungen erweitert. Inhaltlich konnte nur das geltend gemacht werden, was auch eine Individualperson rügen konnte, nämlich ein subjektiv-individuelles Recht. Grundlage war § 2 Abs. 1 Nr. 1 UmwRG, welcher bis Anfang 2013¹²⁵ lautete:

„(1) Eine nach § 3 anerkannte inländische oder ausländische Vereinigung kann, ohne eine Verletzung in eigenen Rechten geltend machen zu müssen, Rechtsbehelfe nach Maßgabe der Verwaltungsgerichtsordnung gegen eine Entscheidung nach § 1 Abs. 1 Satz 1 oder deren Unterlassen einlegen, wenn die Vereinigung

- 1. geltend macht, dass eine Entscheidung nach § 1 Abs. 1 Satz 1 oder deren Unterlassen Rechtsvorschriften, die dem Umweltschutz dienen, **Rechte Einzelner***

¹²⁴ Insbesondere Art. 9 Abs. 2 AK.

¹²⁵ Änderung durch das Gesetz zur Änderung des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes und anderer umweltrechtlicher Vorschriften vom 21. Januar 2013, BGBl. I S. 95.

begründen und für die Entscheidung von Bedeutung sein können, widerspricht,..“

Dies bleibt allerdings hinter den Vorgaben der Aarhus-Konvention und den EU-Richtlinien zurück, sollten diese doch den Zweck haben, Einzelpersonen sowie Vereinigungen zu ermutigen, sich verstärkt für den Umweltschutz einzusetzen. Gerade aber Aspekte des Umwelt- und Klimaschutzes, konnten auch weiterhin – soweit sie kein subjektiv-individuelles Recht darstellen – z. B. beim Bau eines Geothermie-Kraftwerkes von anerkannten Umweltvereinigungen nicht gerichtlich überprüft werden.

Am 12. Mai 2011 hat der EuGH in einer wegweisenden Entscheidung, dem sogenannten „Trianel-Verfahren“¹²⁶ entschieden, dass das deutsche Recht die Vorgaben des europäischen Rechts nicht ausreichend umsetzt und dass § 2 Abs. 1 Nr. 1 UmwRG insoweit gegen EU-Recht verstößt. Das Urteil erging im Vorabentscheidungsverfahren, nachdem das OVG NRW dem EuGH drei Fragen zum Klagerecht von Umweltverbänden vorgelegt hatte. Die Frage des OVGs ging dahin, ob die Verletzung aller für die Zulassung eines Vorhabens maßgeblichen Umweltvorschriften gerichtlich geltend gemacht werden kann (also auch solche, die allein den Interessen der Allgemeinheit zu dienen bestimmt sind). Der EuGH entschied ausgehend vom Wortlaut des Art. 10 a Abs. 1 der Richtlinie 85/337/EWG¹²⁷, dass die Zulässigkeit eines Rechtsbehelfs davon abhängt, dass der Rechtsbehelfsführer entweder ein „ausreichendes Interesse“ oder eine „Rechtsverletzung“ geltend macht. Mit Verweis auf die Ziele der Aarhus-Konvention und das Ziel der Richtlinie, der betroffenen Öffentlichkeit „einen weiten Zugang zu Gerichten zu gewähren“ sei eine weite Auslegung der Begriffe geboten. Da die Umweltverbände nach Art 10 a Abs. 3 Sätze 2 und 3 der Richtlinie 85/337/EWG als „Träger von Rechten [gelten], die verletzt werden können“, darf der Begriff der Rechtsverletzung in diesem Fall nicht auf eine Verletzung eines subjektiv-öffentlichen Rechts beschränkt sein. Unterstützt wird diese Argumentation durch die praktischen Vorteile einer solchen Verbandsklage, da eine einzige Klage, die von einer nichtstaatlichen Umweltorganisation erhoben werden wird, eine Vielzahl entsprechender Klagen ersetzen kann, die sonst Einzelpersonen erhoben hätten. Mit anderen Worten wird so das Verfahren rationalisiert, die Zahl gerichtlich anhängiger Klagen verringert und die Effek-

¹²⁶ EuGH, Urteil vom 12. Mai 2011, C-115/09, Rechtssache Trianel. Der Name „Trianel“ geht insoweit zurück auf die Trianel AG, einem Zusammenschluss von Stadtwerken, die im streitgegenständlichen Verfahren ein Steinkohlekraftwerk bauen wollten.

¹²⁷ Jetzt Art. 11 UVP-Richtlinie 2011/92/EU.

tivität der Rechtsprechung und des Rechtsschutzes gesteigert¹²⁸. Schließlich argumentierte der EuGH auch mit dem europarechtlichen Effektivitätsgrundsatz („effet utile“). Wenn ein Umweltverband nur die Verletzung der Rechte eines Einzelnen rügen könne, wäre ihm weitgehend gänzlich die Möglichkeit der Überprüfung von Rechtsnormen aus dem Unionsrecht genommen, da diese Normen in den meisten Fällen auf das allgemeine Interesse und nicht auf den alleinigen Schutz Einzelner gerichtet seien¹²⁹.

Konsequenz dieser Entscheidung war die zeitweilig unmittelbare Anwendung der Art. 10 a Abs. 3 Sätze 2 und 3 der Richtlinie 85/337 EWG, bis der deutsche Gesetzgeber das UmwRG entsprechend geändert hat. Die Voraussetzungen für die unmittelbare Anwendung waren insoweit erfüllt: Der nationale Gesetzgeber hatte eine Richtlinie nicht bzw. nicht ausreichend umgesetzt. Weiterhin muss die Richtlinie inhaltlich unbedingt und hinreichend genau sein. Auch dies war laut EuGH erfüllt, da die Regelung den Mitgliedstaaten keinen Spielraum bei der Umsetzung der Rechtsbehelfsmöglichkeiten von Umweltverbänden ließe. Da auch eine europarechtskonforme Auslegung des UmwRG angesichts des klaren Wortlauts nicht mehr möglich war, war der deutsche Gesetzgeber verpflichtet, das UmwRG zu ändern.

Dies ist durch das Gesetz zur Änderung des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes und anderer umweltrechtlicher Vorschriften¹³⁰ geschehen, dessen Artikel 1 das UmwRG novelliert. Wesentlich ist vor allem die Streichung der Wörter „Rechte Einzelner begründen“ in § 2 Abs. 1 Nr. 1 UmwRG, wodurch die unionsrechtswidrige Schutznormakzessorietät der Verbandsklage beseitigt wurde. Die geänderten Vorschriften des UmwRG sind folglich eine „andere gesetzliche Bestimmung“ im Sinne des § 42 Abs. 2 VwGO, der im Grundsatz die Betroffenheit in eigenen Rechten fordert. Das Gesetz zur Änderung des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes und anderer umweltrechtlicher Vorschriften geht sogar über die vom EuGH geforderten Vorgaben hinaus, indem durch die Streichung sämtliche umweltbezogene Vorschriften nun rüge- und kontrollfähig sind, unabhängig davon, ob sie im Unionsrecht wurzeln oder ausschließlich nationalen Ursprungs sind¹³¹. Eine solche „große Lösung“ ist zu begrüßen, da Auslegungs- und Abgrenzungsunsicherheiten

¹²⁸ SCHLUSSANTRÄGE DER GENERALANWÄLTIN ELEANOR SHARPSTON vom 16. Dezember 2010, Rechtssache C-115/09, Rn. 51.

¹²⁹ EuGH, Urteil vom 12. Mai 2011, C-115/09, Rn. 43, 46.

¹³⁰ Gesetz zur Änderung des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes und anderer umweltrechtlicher Vorschriften, BGBl.-I-2013, S. 95.

¹³¹ Der EuGH hat lediglich eine ausdrückliche Aussage für Rechtsvorschriften getroffen, die auf Unionsrecht beruhen, siehe auch: *Schlacke*, Die Novelle des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes-EuGH ante portas?, ZUR 4/2013, 195, 198.

ten sowie eine Zweigleisigkeit von rügefähigen, auf Unionsrecht beruhenden und nicht rügefähigen, nationalen Umweltvorschriften vermieden werden¹³².

In jüngerer Zeit war allerdings erneut ein Verfahren beim EuGH zur Auslegung der Öffentlichkeitsbeteiligungs-Richtlinie anhängig. Hintergrund war ein Revisionsverfahren vor dem Bundesverwaltungsgericht gegen einen wasserrechtlichen Planfeststellungsbeschluss des Landes Rheinland-Pfalz, der die Errichtung einer großflächigen Wasserrückhaltung am Oberrhein in Waldsee/Altrip/Neuhofen zum Gegenstand hat¹³³. Das BVerwG hatte das Verfahren ausgesetzt und dem EuGH zur Vorabentscheidung vorgelegt. Er sollte unter anderem klären, ob es mit dem Unionsrecht vereinbar ist, dass das UmwRG nicht anwendbar ist, wenn das Verwaltungsverfahren wie vorliegend bereits vor dem 25.06.2005 – dem äußersten Zeitpunkt der Umsetzung der Richtlinie – eingeleitet worden ist, die Genehmigungen aber erst nach diesem Zeitpunkt erteilt wurden. Des Weiteren musste entschieden werden, ob es mit dem Unionsrecht in Einklang steht, dass bloße Mängel bei der Durchführung einer Umweltverträglichkeitsprüfung nicht zur Aufhebung einer Verwaltungsentscheidung berechtigen, sondern diese Folge nur dann eintritt, wenn die Umweltverträglichkeitsprüfung vollständig unterblieben ist¹³⁴. Am 07.11.2013 hat der EuGH Stellung zu diesen Fragen bezogen¹³⁵. Danach stellt der EuGH klar, dass die europäischen Regelungen über den erweiterten Zugang zu den Gerichten für alle Verfahren Geltung beanspruchen, die nach dem Umsetzungsstichtag noch nicht abgeschlossen waren, auch dann, wenn die Verfahren bereits vor diesem Stichtag eingeleitet worden waren. Weiterhin wurde entschieden, dass nicht nur eine insgesamt fehlende, sondern auch eine mangelnde Umweltverträglichkeitsprüfung zur Überprüfbarkeit der Entscheidung führen müsse. Allerdings führe nicht jeder Verfahrensfehler automatisch zu einer Aufhebung einer Genehmigungs- oder Planungsentscheidung. Es könne zumindest eine mögliche Rechtsverletzung des Klägers/der Kläger gefordert werden. Zudem sei auf die Schwere des Verfahrensmanagements abzustellen.

Allerdings bestehen auch nach wie vor gegen die Neufassung des UmwRG von Januar 2013 Bedenken in Bezug auf die Vereinbarkeit mit Unionsrecht. Im Oktober 2013 hat

¹³² So auch: *Schlacke*, Die Novelle des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes-EuGH ante portas?, ZUR 4/2013, 195, 198.

¹³³ BVerwG, Beschluss vom 10.01.2012, Az.: 7 C 20/11.

¹³⁴ Pressemitteilung des BVerwG Nr. 1 v. 10.01.2012.

¹³⁵ EuGH, Urteil vom 07.11.2013, C-72/12.

die Europäische Kommission gegen die Bundesrepublik Deutschland Klage wegen einer Vertragsverletzung erhoben¹³⁶. Das Verfahren richtet sich gegen zeitliche Beschränkungen der Anwendbarkeit des Gesetzes mit Blick auf bereits vor Inkrafttreten des deutschen Gesetzes eingeleitete Verfahren. Wenn Umweltvereinigungen mangels entsprechender Rechte aus dem UmwRG zu dem damaligen Zeitpunkt ihre Rechte nicht geltend gemacht haben, so sind sie nach nationalem Recht nun damit präkludiert¹³⁷. Ob eine solche Präklusionsregelung europarechtskonform ist, hat der EuGH nun zu prüfen. Schließlich bestehen auch Bedenken gegen die nationalen Regelungen, nach denen bei der Beanstandung von Verfahrensfehlern der Antragssteller die Beweislast für die Ergebniserheblichkeit der Fehler trägt.

Auch die nationalen Gerichte beschäftigen sich intensiv mit der Auslegung des UmwRG sowie der Auslegung der entsprechenden europa- und völkerrechtlichen Vorschriften. So wurden innerhalb eines Monats zwei divergierende Beschlüsse zweier Senate des OVG Koblenz erlassen. Der 1. Senat entschied¹³⁸, dass sich die Antragsbefugnis eines Naturschutzvereins, welcher sich gegen einen Hauptbetriebsplan für einen Tagebau wandte, direkt aus Art. 9 Abs. 3 Aarhus-Konvention (welcher bisher weder im Unionsrecht noch im nationalen Recht umgesetzt wurde) in der durch den EuGH in seinem Urteil vom 8.3.2011¹³⁹ geforderten Auslegung ergebe. Keine vier Wochen später entschied der 8. Senat¹⁴⁰, dass eine Auslegung des deutschen Rechts, die Umweltverbänden Rechtsbehelfe über die im UmwRG geregelten Tatbestände hinaus zubillige, die Grenzen richterlicher Rechtsfortbildung überschreite und nicht zulässig sei.

Allerdings hat das BVerwG¹⁴¹ in einem Urteil nun klargestellt, dass Art. 9 Abs. 3 Aarhus-Konvention generell anerkannten Umweltvereinigungen subjektive Klagerechte einräumt. Das deutsche Recht stehe der durch den EuGH geforderten „weitestmöglichen“ Auslegung zur Gewährung überindividueller Rechtsschutzes von Umweltver-

¹³⁶ Pressemitteilung der Europäischen Kommission vom 17.10.2013.

¹³⁷ Eine Präklusion (lat. Ausschluss) bezeichnet in der juristischen Fachsprache den Ausschluss bestimmter Rechtshandlungen oder Rechte. Dies kann vertraglich festgelegt sein oder geschehen, wenn die Rechte nicht innerhalb der gesetzlichen Frist vor- oder wahrgenommen werden. Die Präklusion ist von der Verjährung zu unterscheiden.

¹³⁸ OVG Koblenz, Beschluss vom 6.2.2013- 1 B 11266/12.

¹³⁹ EuGH, Urteil vom 8.3.2011, C-240/09.

¹⁴⁰ OVG Koblenz, Beschluss vom 27.2.2013- 8 B 10254/13.

¹⁴¹ BVerwG, Urteil vom 05.09.2013, 7 C 21.12.

bänden gegen Verletzungen von Umweltrecht nicht entgegen¹⁴². Die Entscheidung zeigt die Grundrichtung auf, dass künftig Umweltvereinigungen – über die Rechte aus dem BNatSchG und dem UmwRG hinaus - andere, bisher gerichtlichen Überprüfungen entzogene Genehmigungen, für umweltrelevante Vorhaben angreifen können.

6.2.1.4 Zusammenfassung und Fazit

Größtmögliche Information sowohl auf Seiten der Unternehmer als auch auf Seiten der Öffentlichkeit ist der Schlüssel zur erfolgreichen Durchführung eines Projektes der Tiefengeothermie. Daher sollte an der Optimierung der Zugangsrechte zu Informationen mit Relevanz für ein Tiefengeothermie-Projekt gearbeitet werden, ohne jedoch den Ausgleich entgegenstehender Interessen aus den Augen zu verlieren.

Im Bereich des Zugangs zu Umweltinformationen und Geodaten für private Unternehmen kommt eine Modifikation der in §§ 8, 9 UIG enthalten Ablehnungsgründe in Betracht. Dabei kommt zum einen eine Fristenregelung oder eine Entschädigungsregelung oder eine Kombination aus beiden Regelungen in Betracht, welche den verfassungsrechtlichen Anforderungen an den Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen als entgegenstehende Interessen gerecht werden. Eine Fristenregelung ist dabei vorzuziehen, da sie praktisch besser handhabbar ist und somit einen effektiveren Zugang zu den Daten gewährleistet.

Die Einführung des UmwRG und nicht zuletzt die Trianel-Entscheidung des EuGH und die darauffolgenden Änderungen durch den nationalen Gesetzgeber haben Umweltverbänden weitgehende Rechtsbehelfsmöglichkeiten eingeräumt. Dass in diesem Bereich eine Ausnahme vom Grundsatz des deutschen Verwaltungsrechts, welches Popularklagen ausschließt, gemacht wird, ist begrüßenswert. Nicht zuletzt dienen Klagen von nach § 3 UmwRG anerkannten Umweltverbänden, wie bereits erwähnt, auch der Verfahrensvereinfachung und der Kostenreduzierung.

Schließlich runden die Information und Einbindung der Öffentlichkeit, sei es des einzelnen Bürgers oder von Verbänden, den Informationsfluss in einem Geothermie Verfahren ab. Informations-, Beteiligungs- und Einflussnahmemöglichkeiten sind wichtige

¹⁴² *Klinger*, *Erweiterte Klagerechte im Umweltrecht*, NVwZ 13/2013, 850, 852.

Instrumente, um die Akzeptanz eines konkreten Geothermie Projektes im Speziellen, und des Ausbaus erneuerbarer Energien im Allgemeinen, zu fördern.

6.2.2 Planungsrecht

Im Zusammenhang mit der Nutzung tiefer Geothermie, der Speicherung von Energieträgern (Wärme, Erdgas, Elektrizität, Wasserstoff, Methan) und CO₂ sowie der Gewinnung lebenswichtiger Ressourcen (z. B. Grundwasser) steigen die Nutzungsansprüche an den Raum, speziell an den Raum unter der Erdoberfläche. Aus der Vielfalt der steigenden Ansprüche an die Nutzung des unterirdischen Raums können sich Konflikte um Raum, Zuständigkeiten und Prioritäten ergeben.

Aus rechtlicher Sicht stellt sich damit die Frage, ob und wie sich die Ansiedlung der verschiedenen Vorhaben steuern lässt. Es existieren bereits verschiedene gesetzliche Regelungen (im Raumordnungs-, Berg-, Kohlendioxid-Speicherungs-, Bau- und Wasserrecht), die genutzt werden können, um unterschiedliche unterirdische Nutzungen aufeinander abzustimmen. Besondere Relevanz kommt hierbei auch dem Raumplanungsrecht zu, welches – im Gegensatz zum unterschiedlichen Fachrecht – die überfachliche und überörtliche, zusammenfassende (integrierende) Gesamtplanung zum Gegenstand hat und regelmäßig mit einem Koordinierungs-, Ordnungs- und Entwicklungsauftrag verbunden ist.¹⁴³ Aber auch die energiepolitischen Szenarien und Ziele, die sich etwa in den Netzentwicklungs- sowie Erzeugungsentwicklungsplänen der Bundesnetzagentur (BNetzA)¹⁴⁴ oder in den Landesklimaschutzgesetzen der Bundesländer¹⁴⁵ widerspiegeln, sind zu berücksichtigen.

Eine gleichermaßen vorausschauende und integrative Raum- und Siedlungsentwicklung steuert in den unterschiedlichen Ebenen des Planungssystems – je nach Raum- und Wirtschaftsstruktur differenziert – einen signifikanten Beitrag zur Begrenzung von THG-Emissionen (und damit zum Klimaschutz) bei.¹⁴⁶ Eine erfolgreiche Koordination der verschiedenen Raumnutzungsansprüche setzt ein integratives Zusammenwirken von Raum- und Fachplanung bei der Realisierung einer effizienten Energieversorgung

¹⁴³ Zur Kraftwerkssteuerung durch räumliche Gesamtplanung siehe beispielsweise *Erbguth*, NVwZ–Extra 15/2013, Seite 1 ff; *Spannowsky*, UPR 2009, Seite 201 ff.

¹⁴⁴ Zur planungsrechtlichen Sicherung einer Energiebedarfsplanung siehe *Hermes*, Vortrag beim 18. Leipziger Umweltrechtlichen Symposiums „Versorgungssicherheit in der Energiewende – Anforderungen des Energie-, Umwelt- und Planungsrechts“ am 18./19. April 2013 in Leipzig, abrufbar unter <http://www.uni-leipzig.de/umweltrecht/institut/hermesppt.pdf> (zuletzt abgerufen am 20.04.2014).

¹⁴⁵ Hinsichtlich der Regelungsmöglichkeiten der Bundesländer im Klimaschutz siehe z.B. *Schink*, UPR 2011, Seite 91 ff.

¹⁴⁶ Klimaschutz in der räumlichen Planung - Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung - Praxishilfe - Studie im Auftrag des UBA (Förderkennzeichen 3709 16 136), Abschlussbericht, Seite 10.

und der Transformation städtischer Infrastrukturen voraus. Zudem sollte das Raumplanungsrecht bereits absehbare Schutzgutkonflikte soweit wie möglich berücksichtigen und nicht ohne weiteres auf nachfolgende Planungsstufen und Verfahren verlagern. Aufgabe des Genehmigungsverfahrens ist demgegenüber die Prüfung der Zulässigkeit einer konkreten Anlage an einem konkreten Standort anhand der einschlägigen gesetzlichen Vorschriften und Planungen. In der Praxis erscheint es manchmal so, dass manche (der möglichen) Instrumente der Raumplanung (siehe dazu die nachfolgende Darstellung) in Bezug auf die Tiefengeothermie nur sehr zurückhaltend genutzt werden.

6.2.2.1 Überblick

Raumplanung ist die räumliche Planung der öffentlichen Hand auf allen Ebenen und Sachgebieten¹⁴⁷. Bei raumbezogenen Planungsarten wird zwischen Gesamtplanung und Fachplanung unterschieden. Die Gesamtplanung will den jeweiligen Planungsraum zielorientiert vollständig erfassen, die Fachplanung bezieht sich hingegen nur auf ein spezielles fachliches Ziel im Gesamtplanungsraum.¹⁴⁸ Letztere, d. h. die Fachplanung, findet entweder mit einer umweltspezifischen Zielsetzung (z.B. Landschaftsplanung nach §§ 9 ff. BNatSchG, Ausweisung von Natur- und Landschaftsschutzgebieten nach § 22 BNatSchG, Pläne zur Luftreinhaltung sowie Lärminderungspläne nach §§ 47 ff. BImSchG, Abfallwirtschaftsplanung nach § 30 KrWG sowie die Festsetzung von Wasserschutzgebieten nach §§ 51 WHG¹⁴⁹) oder ohne eine solche z. B. im Rahmen von Planfeststellungsverfahren statt. Jedoch müssen auch hier die sie tangierenden Umweltbelange bei der Umsetzung beachtet werden.

Zum raumbezogenen Gesamtplanungsrecht zählt auf der überörtlichen Ebene das Recht der Raumordnung (insbesondere durch Aufstellung von landesweiten Raumordnungsplänen und Regionalplänen) und auf der örtlichen Ebene das Recht der Bauleitplanung (insbesondere durch Aufstellung von Flächennutzungsplänen und Bebauungsplänen).

¹⁴⁷ *Brohm*, Öffentliches Baurecht, § 2 Rn. 23.

¹⁴⁸ *Peters*, Umweltrecht, Rn. 107.

¹⁴⁹ Vgl. *Kluth/Schmeddinck*, Umweltrecht, Seite 46 Rn. 144.

Seit der Föderalismusreform (I) im Jahre 2006, bei der die Gesetzgebungskompetenzen zwischen Bund und Ländern grundlegend umgestaltet wurden, fällt das Raumordnungsrecht in die konkurrierende Gesetzgebungskompetenz des Bundes (Art. 74 Abs. 1 Nr. 31 GG). Hiervon hat der Bund mit dem Raumordnungsgesetz vom 22.12.2008¹⁵⁰ Gebrauch gemacht. Art. 72 Abs. 3 GG gibt den Ländern allerdings das Recht, u. a. im Bereich der Raumordnung von Bundesgesetzen durch Gesetz abweichende Regelungen zu treffen. Hiervon haben die Länder nach dem Inkrafttreten des Raumordnungsgesetzes Gebrauch gemacht. Dies kann zu einer für den Rechtsanwender komplexen und mitunter unübersichtlichen Rechtslage führen.¹⁵¹

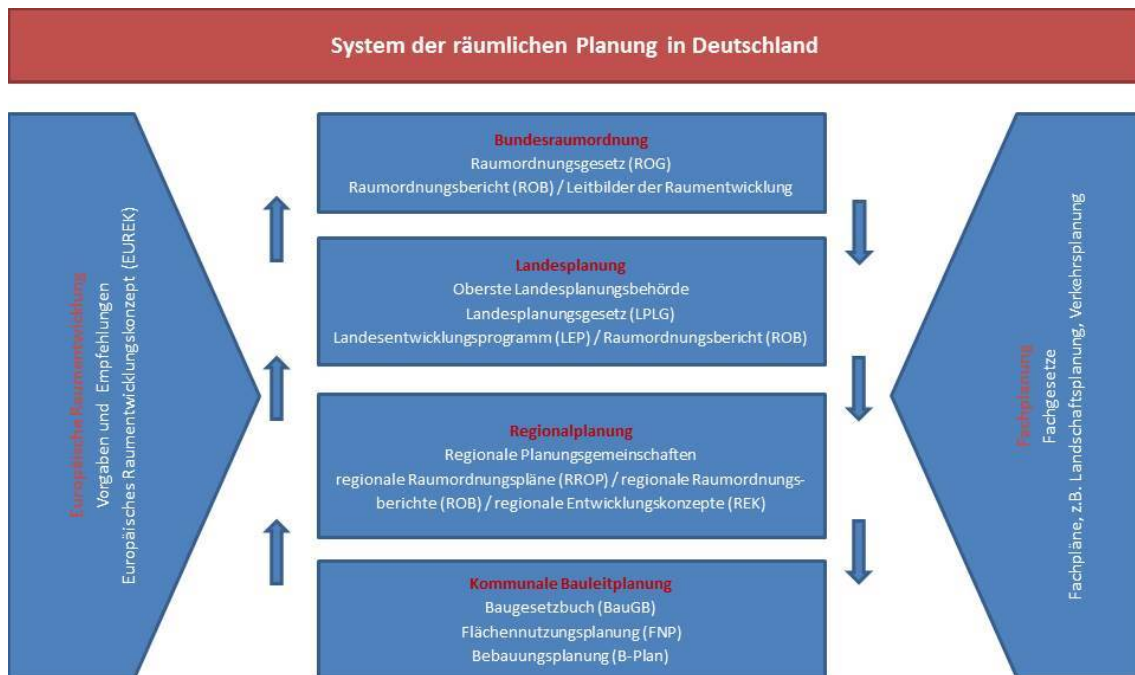


Abb. 6.1 Übersicht - System der räumlichen Planung in Deutschland

¹⁵⁰ Vgl. BGBl. I S. 2986.

¹⁵¹ Die Probleme und Tücken der sogenannten „Abweichungsgesetzgebung“ zeigen u. a. *Schmitz/Jornitz*, am Beispiel des neuen Bayerischen Landesplanungsgesetzes auf, DVBl. 2013, Seite 741 ff.

6.2.2.2 Raumordnung

6.2.2.2.1 Allgemeines

Raumordnung ist die zusammenfassende, überörtliche und überfachliche Planung des Raumes aufgrund von vorgegebenen oder erst zu entwickelnden Leitvorstellungen¹⁵². Aufgabe der Raumordnung ist es, den Gesamttraum der Bundesrepublik Deutschland und seine Teilräume durch zusammenfassende, übergeordnete Raumordnungspläne und durch Abstimmung raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern (vgl. § 1 Abs. 1 Raumordnungsgesetz - ROG). Dabei sind unterschiedliche Anforderungen an den Raum aufeinander abzustimmen und die auf der jeweiligen Planungsebene auftretenden Konflikte auszugleichen und Vorsorge für einzelne Nutzungen und Funktionen des Raumes zu treffen.¹⁵³ Die Schaffung der räumlichen Voraussetzungen für die vorsorgende Sicherung sowie für die geordnete Aufsuchung und Gewinnung von standortgebundenen Rohstoffen zählt nach § 2 Abs. 2 ROG ebenso zu den bundesgesetzlich geregelten Grundsätzen der Raumordnung wie die Berücksichtigung der räumlichen Erfordernisse für die Energieversorgung. Daraus lassen sich Hinweise darauf ableiten, dass auch unterirdische Vorhaben relevante Gegenstände raumordnerischer Planungen sein können.¹⁵⁴ Insbesondere *Erbguth*¹⁵⁵ leitet diese These systematisch, detailliert und schlüssig her. Auf dessen Ausführungen, denen sich hier angeschlossen wird, wird insofern verwiesen.

Gegenstand des Raumordnungsrechts ist somit nicht nur die oberirdische Verortung von Raumnutzungen und Raumfunktionen, sondern umfasst auch Nutzungen des Raums in der Tiefe. Dies erlaubt raumordnerische Festlegungen, um Nutzungskonkur-

¹⁵² BVerfGE 3, 407 (427).

¹⁵³ Zum Erfordernis des Handels auf ungewisser Tatsachengrundlage hinsichtlich späterer Nutzungskonflikte siehe u. a. *Kment*, Raumplanung unter Ungewissheit, ZUR 2011 S. 127 m. w. N.

¹⁵⁴ Gleichwohl ist dieses Thema nicht zuletzt aufgrund unterschiedlicher behördlicher Zuständigkeiten, planerischer Instrumente, raumplanerisch-methodischer Kriterien und Wechselwirkungen der verschiedenen Instrumente und Rechtsvorschriften höchst komplex. Zu den aktuellen Diskussionen siehe unter anderem *Hirschfeld*, Aktuelle Aktivitäten des Bund-Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA GEO) zur Raumordnung im Untergrund, Vortrag im Rahmen des Geoforums 2013 in Hannover, abrufbar unter http://www.arl-net.de/system/files/geoforum-2013_hirschfeld.pdf. Das Umweltbundesamt (UBA) hat hierzu unter anderem das Forschungsvorhaben „Unterirdische Raumplanung - Vorschläge des Umweltschutzes zur Verbesserung der über- und untertägigen Informationsgrundlagen, zur Ausgestaltung des Planungsinstrumentariums und zur nachhaltigen Lösung von Nutzungskonflikten (Teilvorhaben 2: planerische und rechtliche Aspekte)“, FKZ 3711161032, Laufzeit 01.10.2011 - 31.07.2013 finanziert.

¹⁵⁵ *Erbguth*, „Unterirdische Raumordnung – zur raumordnungsrechtlichen Steuerung untertägiger Vorhaben“ in ZUR 2011, 121.

renzen im Untergrund planerisch zu lösen. Eine dreidimensionale Raumplanung im Sinne einer gleichzeitigen Nutzung übereinander liegender Gesteinsschichten für unterschiedliche Zwecke (Stockwerksnutzung) ist gleichwohl im Raumordnungsrecht bisher nicht vorgesehen.¹⁵⁶

Die Raumordnung soll von der Leitvorstellung einer nachhaltigen Raumentwicklung bestimmt sein, die die sozialen und wirtschaftlichen Ansprüche an den Raum mit seinen ökologischen Funktionen in Einklang bringt und zu einer dauerhaften, großräumig ausgewogenen Ordnung mit gleichwertigen Lebensverhältnissen in den Teilräumen führt (vgl. § 1 Abs. 2 Raumordnungsgesetz (ROG)). Sie findet ihre rechtlichen Grundlagen im Raumordnungsgesetz des Bundes und in den Landesplanungsgesetzen der Länder. Außerhalb des ROG und der Landesplanungsgesetze finden sich Bestimmungen mit raumordnungsrechtlichem Inhalt noch in einzelnen Gesetzes- und Verordnungsvorschriften (z. B. §§ 1 Abs. 4, 35 Abs. 3 BauGB, § 11 Abs. 3 Satz 1 Nr. 2 BauNVO) sowie in zahlreichen Fachplanungsgesetzen.

6.2.2.2 Erfordernisse der Raumordnung

Mithilfe des Raumordnungsrechts sollen Entscheidungen in nachfolgenden Verwaltungsverfahren gesteuert werden.¹⁵⁷ Die Raumordnung hat verschiedene Möglichkeiten, Aussagen hinsichtlich der Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raumes zu treffen. Die verschiedenen Aussagetypen, die für nachfolgende Planungen und Maßnahmen Bindungswirkungen entfalten, fasst § 3 Abs. 1 Nr. 1 ROG unter dem Begriff der „Erfordernisse der Raumordnung“ zusammen und benennt sie als Ziele, Grundsätze und sonstige Erfordernisse der Raumordnung.

6.2.2.3 Grundsätze der Raumordnung

Grundsätze der Raumordnung sind nach der Begriffsbestimmung des § 3 Abs. 1 Nr. 3 ROG Aussagen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums als Vorgaben für nachfolgende Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen. Sie können durch Gesetz oder als Festlegungen in Raumordnungsplänen aufgestellt werden. Inhaltlich

¹⁵⁶ *Hellriegel*, NVwZ 2013, 111.

¹⁵⁷ *Kohls* in Danner/Theobald, Energierecht Kommentar, Band 4, XIII BauR, Rn, 195.

treffen die Raumordnungsgrundsätze grundlegende raumordnungsrechtliche Entscheidungen, die als abstrakte Richtlinien materieller Art der räumlichen Entwicklung dienen¹⁵⁸. Sie sind vornehmlich darauf ausgerichtet, im Wege der raumplanerischen Konkretisierung in Raumordnungsziele umgesetzt zu werden¹⁵⁹.

Nach § 4 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 ROG sind die Grundsätze von den öffentlichen Stellen des Bundes und der Länder (vgl. § 3 Abs. 1 Nr. 5 ROG) bei raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen in Abwägungs- und Ermessensentscheidungen zu berücksichtigen. „**Raumbedeutsam**“ sind Planungen, Vorhaben und sonstige Maßnahmen, durch die Raum in Anspruch genommen oder die räumliche Entwicklung oder Funktion eines Gebietes beeinflusst wird, einschließlich des Einsatzes der hierfür vorgesehenen öffentlichen Finanzmittel (vgl. § 3 Abs. 1 Nr. 6 ROG). Hiervon erfasst sind typischerweise die Planungen für bauliche Großvorhaben, wie etwa Windparks oder Solarparks, aber auch raumerhebliche signifikante Bodennutzungsveränderungen, wie Sand- oder Kiesabbau¹⁶⁰. Stellt man bei Anlagen der Tiefengeothermie allein auf die Größe der oberirdischen Anlagen und ihre Auswirkungen auf den oberirdischen Raum ab, dürften entsprechende Vorhabensplanungen nicht „raumbedeutsam“ im Sinne des Raumordnungsgesetzes sein.¹⁶¹ Geht man allerdings - wie zuvor dargelegt - davon aus, dass auch unterirdische Vorhaben relevante Gegenstände raumordnerischer Planungen sein können¹⁶², könnte ein Vorhaben der Tiefengeothermie durchaus als „raumbedeutsam“ anzusehen und eine (grundsätzliche) Steuerung durch Raumordnungspläne möglich sein. Die Konkurrenz zwischen geothermischen und anderen Nutzungen des Untergrunds ist – wie im Übrigen bei vielen anderen oberirdischen Vorhabensplanungen auch – gleichwohl nicht abschließend raumordnerisch lösbar, sondern bedarf der fachrechtlichen Regelung durch die Weiterentwicklung des Bergrechts.¹⁶³

Eine Zusammenstellung von Raumordnungsgrundsätzen findet sich in § 2 Abs. 2 Nr. 1 bis 8 ROG. Wie sich dem Wort „insbesondere“ im Einleitungssatz der Vorschrift entnehmen lässt, ist der Katalog nicht abschließend. Ein Großteil der dort genannten Grundsätze der Raumordnung ist mittelbar für den Umweltschutz relevant. So sind

¹⁵⁸ *Grooterhorst*, NuR 1986, 276 (277).

¹⁵⁹ *Steiner*, in: *Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht*, 8. Aufl. 2006, V Rn. 12.

¹⁶⁰ *Runkel*, in: *Spannkowsky/Runkel/Goppel, ROG-Kommentar*, 2010, § 3 Rn. 109.

¹⁶¹ So z. B. *Jansen*, in *Klimaschutz in der räumlichen Planung - Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung - Praxishilfe - Studie im Auftrag des UBA (Förderkennzeichen 3709 16 136)*, Abschlussbericht, Seite 35/36

¹⁶² So etwa *Hellriegel*, NVwZ 2013, 111 und *Erbguth*, ZUR 2011, 121.

¹⁶³ Siehe hierzu Kapitel 6.2.5.

zum Beispiel nach § 2 Abs. 2 Nr. 1 ROG im Gesamttraum der Bundesrepublik Deutschland ausgeglichene soziale, infrastrukturelle, wirtschaftliche, ökologische und kulturelle Verhältnisse anzustreben. Dabei ist die nachhaltige Daseinsvorsorge zu sichern, nachhaltiges Wirtschaftswachstum und Innovation sind zu unterstützen, Entwicklungspotenziale sind zu sichern und Ressourcen nachhaltig zu schützen. Nach Grundsatz Nr. 4 ist den Erfordernissen für eine kostengünstige, sichere und umweltverträgliche Energieversorgung einschließlich des Netzausbaus Rechnung zu tragen. Dieser Grundsatz gebietet es unter anderem, dass der Ausbau der Strom- und Fernwärmenetze durch Festlegungen in den Raumordnungsplänen nach Möglichkeit zu fördern ist.¹⁶⁴ Grundsatz 6 betont Maßnahmen gegen den Klimawandel und umfasst die räumliche Vorsorge für einen raumverträglichen Ausbau erneuerbarer Energien.¹⁶⁵ Gemäß Grundsatz Nr. 8 ist der Raum in seiner Bedeutung für die Funktionsfähigkeit der Böden, des Wasserhaushalts, der Tier- und Pflanzenwelt sowie des Klimas einschließlich der jeweiligen Wechselwirkungen zu entwickeln, zu sichern oder, soweit erforderlich, möglich und angemessen, wiederherzustellen.

Die Grundsätze der Raumordnung sind als Abwägungsdirektiven in ihrer Wirksamkeit für den Umweltschutz dadurch eingeschränkt, dass sie im Rahmen der den planenden Behörden zustehenden planerischen Abwägung mit anderen, auch mit den dem Umweltschutz tendenziell entgegenstehenden Belangen abzuwägen sind.¹⁶⁶ Dabei genießen weder wirtschaftliche und infrastrukturelle Förderungsziele Vorrang vor dem Umweltschutz, noch können Umweltschutzbelange eine prinzipiell stärkere Gewichtung beanspruchen.¹⁶⁷ Die unterschiedlichen gegebenenfalls konkurrierenden Grundsätze der Raumordnung sind vielmehr abstrakt gleichwertig.¹⁶⁸

6.2.2.2.3.1 Ziele der Raumordnung

Zentrales Steuerungsinstrument der Raumordnungsplanung sind die Raumordnungsziele, die in Raumordnungsplänen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums festgelegt werden (§ 7 Abs. 2 ROG). Hierbei handelt es sich gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 2 ROG um verbindliche Vorgaben in Form von räumlich und sachlich bestimmten

¹⁶⁴ Kohls in Danner/Theobald, Energierecht Kommentar, Band 4, XIII BauR, Rn, 198.

¹⁶⁵ Kohls in Danner/Theobald, Energierecht Kommentar, Band 4, XIII BauR, Rn, 199.

¹⁶⁶ Hoppe/Beckmann/Kauch, Umweltrecht, 2. Aufl. 2000, § 7 Rn. 58.

¹⁶⁷ Hoppe/Beckmann/Kauch, Umweltrecht, 2. Aufl. 2000, § 7 Rn. 58.

¹⁶⁸ Hoppe/Beckmann/Kauch, Umweltrecht, 2. Aufl. 2000, § 7 Rn. 58.

oder bestimmbar, vom Träger der Raumordnung abschließend abgewogenen textlichen oder zeichnerischen Festlegungen in Raumordnungsplänen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raumes. Ziele der Raumordnung finden sich ausschließlich in den Raumordnungsplänen der Länder.¹⁶⁹ Sie dienen dazu, die Raumordnungsgrundsätze in konkret raumbezogene Festsetzungen für die nachfolgenden Planungsebenen der Regional- und der Bauleitplanungen sowie für die Fachplanungen umzusetzen.¹⁷⁰ Im Unterschied zu den Grundsätzen der Raumordnung und den sonstigen Erfordernissen der Raumordnung ordnet das Gesetz in § 4 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 ROG an, dass Ziele der Raumordnung nicht nur zu berücksichtigen, sondern grundsätzlich bei raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen als zwingendes Recht zu beachten sind. Sie können also nicht durch Abwägung oder Ermessensausübung an deren Stelle überwunden werden.¹⁷¹ Das Bundesverwaltungsgericht beschreibt Raumordnungsziele daher auch als „landesplanerische Letztentscheidungen“.¹⁷² Die Vorschrift des § 1 Abs. 4 BauGB ordnet eine Anpassungspflicht speziell für die Bauleitplanung an.

6.2.2.3.2 Sonstige Erfordernisse der Raumordnung

Die sonstigen Erfordernisse der Raumordnung sind gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 4 ROG erst in der Aufstellung befindliche Ziele oder Ergebnisse eines für einen konkreten Fall durchgeführten Raumordnungsverfahrens. Ihnen soll, sobald sie eine bestimmte, aber noch nicht rechtlich verbindliche Gestalt angenommen haben, bereits eine den Grundsätzen entsprechende rechtliche Relevanz zukommen.¹⁷³

6.2.2.4 Vorgaben des ROG

Das ROG enthält in den §§ 8 bis 16 zahlreiche organisatorische und verfahrensrechtliche Vorgaben für die Raumordnung in den Ländern. Zunächst schreibt § 8 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 ROG vor, dass in den Ländern Raumordnungspläne für die Landesgebiete

¹⁶⁹ Steiner, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Aufl. 2006, V Rn. 15.

¹⁷⁰ Hoppe/Beckmann/Kauch, Umweltrecht, 2. Aufl. 2000, § 7 Rn. 63.

¹⁷¹ Steiner, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Aufl. 2006, V Rn. 46.

¹⁷² BVerwGE 90, 329 (334).

¹⁷³ Brohm, Öffentliches Baurecht, 3. Aufl. 2002, § 37 Rn. 5.

(landesweite Raumordnungspläne) aufzustellen sind.¹⁷⁴ Darüber hinaus sind nach § 8 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 ROG Raumordnungspläne für die Teilräume der Länder (Regionalpläne) aufzustellen. Regionalpläne sind gemäß § 8 Abs. 2 Satz 1 ROG aus dem Raumordnungsplan für das Landesgebiet zu entwickeln und stellen damit eine weitere planerische Konkretisierungsstufe dar¹⁷⁵. Weiter schreibt das ROG die gesetzliche Verankerung eines Raumordnungsverfahrens vor, in dem raumbedeutsame Planungen und Maßnahmen untereinander und mit den Erfordernissen der Raumordnung abzustimmen sind (vgl. § 15 Abs. 1 Satz 1 ROG).

6.2.2.2.5 Gebietsfestlegungen

Das ROG eröffnet die Möglichkeit, in Raumordnungsplänen bestimmte Raumordnungsgebiete festzulegen. In Betracht kommt hierbei insbesondere die Festlegung von Vorrang-, Vorbehalts- und Eignungsgebieten.

6.2.2.2.5.1 Vorranggebiete

Vorranggebiete sind Gebiete, die für bestimmte raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen vorgesehen sind und andere raumbedeutsame Nutzungen ausschließen, soweit diese mit den vorrangigen Nutzungen, Funktionen oder Zielen der Raumordnung nicht vereinbar sind (vgl. § 8 Abs. 7 Satz 1 Nr. 1 ROG). Die Festlegung solcher Vorranggebiete erfolgt als Ziel der Raumordnung, das andere konkurrierende Raumnutzungen ausschließt.¹⁷⁶ Ein solches Ziel ist nicht in den weiteren Verwirklichungsstufen (z. B. auf der Ebene der Bauleitplanung) durch Abwägung „überwindbar“.¹⁷⁷ In der

¹⁷⁴ Hiervon ausgenommen sind die Stadtstaaten Berlin, Bremen und Hamburg, in denen Flächennutzungspläne im Sinne des § 5 BauGB die Aufgabe eines Raumordnungsplans für das Landesgebiet übernehmen können. Die übrigen Länder haben mit unterschiedlicher Bezeichnung („Landesentwicklungsprogramm“, „Landesentwicklungsplan“, „Landesraumordnungsprogramm“, „Landesraumordnungsplan“) entsprechende Gesamtpläne aufgestellt. Grund für die unterschiedliche Bezeichnung ist, dass das Raumordnungsgesetz in der damaligen Fassung begrifflich nicht zwischen Programmen und Plänen differenzierte, wohingegen es heute in § 8 ROG ausschließlich den Begriff des Raumordnungsplans verwendet.

¹⁷⁵ *Brohm*, Öffentliches Baurecht, 3. Auflage 2002, § 37 Rn. 16.

¹⁷⁶ *Steiner*, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Auflage 2006, V Rn. 56.

¹⁷⁷ *Steiner*, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Auflage 2006, V Rn. 56. Allerdings enthalten einige Landesplanungsgesetze (LPIG) Regelungen, nach denen bspw. die obere Landesplanungsbehörde im Benehmen mit den fachlich berührten Stellen der oberen Verwaltungsebene und der jeweiligen Planungsgemeinschaft die Abweichung von einem Ziel des regionalen Raumordnungsplans zulassen kann, wenn diese aufgrund veränderter Tatsachen oder Erkenntnisse unter raumordnerischen Gesichtspunkten vertretbar ist und der regionale Raumordnungsplan in seinen Grundzügen nicht be-

Praxis erfolgt die Festlegung solcher Gebiete insbesondere bei standortgebundenen Rohstoffen (z. B. Kies, Lehm oder Ton) aber auch als Instrument der Raumplanung zur langfristigen Sicherung der Trink- und Brauchwasserversorgung der Bevölkerung („Grundwasservorranggebiet“). Die Festlegung eines Vorranggebietes zugunsten geothermischer Anlagen ist zwar ebenfalls denkbar, dürfte aber ob der bisherigen Bedeutung der Tiefengeothermie in der Strom- und Wärmebereitstellung (derzeit) eher fern liegen.

6.2.2.2.5.2 Vorbehaltsgebiete

Hierbei handelt es sich um Gebiete, in denen bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Nutzungen besonderes Gewicht beizumessen ist (vgl. § 8 Abs. 7 Satz 1 Nr. 2 ROG). Vorbehaltsgebiete stellen eine gegenüber den Vorranggebieten abgeschwächte Form der Sicherung von Flächen für Nutzungen dar, die ihrer Eigenart nach auch für eine Festlegung als Vorranggebiet in Frage kommen.¹⁷⁸ Die Festlegung eines Vorbehaltsgebietes erfolgt nicht als Ziel der Raumordnung sondern lediglich als ein räumlich konkreter Grundsatz, der durch entsprechend gewichtige öffentliche und private Belange in der Abwägung überwindbar ist.¹⁷⁹ Aufgrund der geringeren Bindungswirkung, die ein Vorbehaltsgebiet entfaltet, stellt sich die Frage, ob eine entsprechende Ausweisung für Geothermie-Kraftwerke im Vergleich zu anderen Gebietsfestlegungen sinnvoll(er) ist.

6.2.2.2.5.3 Eignungsgebiete

Hierunter sind Gebiete zu verstehen, in denen bestimmten raumbedeutsamen Maßnahmen oder Nutzungen, die städtebaulich nach § 35 BauGB zu beurteilen sind, andere raumbedeutsame Belange nicht entgegenstehen, wobei diese Maßnahmen oder Nutzungen an anderer Stelle im Planungsraum ausgeschlossen sind (vgl. § 8 Abs. 7

rührt wird (Beispiel § 10 Abs. 6 LPIG in Rheinland-Pfalz). In dem Urteil des OVG RP vom 15.02.2012 – 8 A 10965/11 ging es um eine solche Zielabweichung vom raumordnerischen Ziel „Vorranggebiet für die Landwirtschaft“. Von diesem sollte zwecks Errichtung eines Geothermiekraftwerks abgewichen werden. Hierbei sah sich die Gemeinde in ihren Rechten (Selbstverwaltungsrecht bzw. Planungshoheit nach § 28 Abs. 2 GG, Einvernehmensefordernis nach § 36 BauGB) verletzt. Nach Auffassung des Gerichts berührt die Zulassung einer solchen Abweichung von einem Ziel der Raumordnung im Regelfall aber keine Rechte der Belegenheitsgemeinde.

¹⁷⁸ Steiner, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Auflage 2006, V Rn. 57.

¹⁷⁹ BVerwG, NVwZ 2003, 738 (742).

Satz 1 Nr. 3 ROG). Vorrangiges Ziel der Festlegung eines Eignungsgebietes ist die Konzentration der ausgewiesenen Nutzung in dem als geeignet befundenen Eignungsgebiet, mithin der Ausschluss der Nutzung an anderer Stelle des Plangebiets.¹⁸⁰ Soweit die Festlegung die Nutzung im Außenbereich außerhalb des Eignungsgebietes ausschließt, ist sie als Raumordnungsziel zu qualifizieren.¹⁸¹ Innerhalb des Eignungsgebietes beschränkt sich die Eignungsaussage hingegen auf die Feststellung, dass eine bestimmte Nutzung raumordnerisch möglich ist.¹⁸² Dies ist in nachfolgenden Abwägungsprozessen als ein konkreter Raumordnungsgrundsatz entsprechend zu berücksichtigen.¹⁸³ Um Windkraftanlagen auf geeignete Gebiete zu konzentrieren und überörtlich zu steuern, werden in der Praxis insbesondere Eignungsgebiete für die Nutzung der Windenergie festgelegt. Mit dem Instrument des Eignungsgebietes könnte ebenfalls eine frühzeitige thematische Beschäftigung mit dem Thema „Bau einer Anlage der Tiefengeothermie“ in Regionen mit einem hohen geothermischen Potential stattfinden und so im Vorfeld konkreter Anlagenplanungen erste Rückschlüsse auf die Akzeptanz innerhalb der Bevölkerung gezogen werden

6.2.2.2.6 Abgrenzung der Raumordnung zur Fachplanung

Die Abgrenzung von Raumordnung und Fachplanung ist mitunter nicht einfach. Wie bereits dargestellt, haben nach § 4 Abs. 1 Satz 1 ROG öffentliche Stellen bei raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen die Ziele der Raumordnung zu beachten. Die Zieladressaten müssen also ihre raumbedeutsamen Planungen und Maßnahmen in Übereinstimmung mit den Zielen der Raumordnung bringen.¹⁸⁴ Von dieser Zielbeachtungspflicht werden auch die Träger der Fachplanung erfasst.¹⁸⁵ Entsprechendes gilt für die Grundsätze der Raumordnung, die von den Fachplanungsträgern im Rahmen von Ermessens- und Abwägungsentscheidungen zu berücksichtigen sind.

Die zunächst weiträumig erscheinenden Einwirkungsmöglichkeiten der Raumordnung auf die Fachplanung werden jedoch ganz maßgeblich durch den Aufgaben- und den Funktionsbereich der Raumordnung relativiert, welcher zugleich den raumordnungs-

¹⁸⁰ *Erbguth*, DVBl. 1998, 209 (213).

¹⁸¹ *Steiner*, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Auflage 2006, V Rn. 58.

¹⁸² *Steiner*, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Auflage 2006, V Rn. 58.

¹⁸³ *Erbguth*, DVBl. 1998, 209.

¹⁸⁴ BVerwGE 90, 329 (332 f.).

¹⁸⁵ *Dafft/Grotfels/Kment et al.*, Zentralinstitut für Raumplanung an der Universität Münster, DVBl. 2005, 1149 (1156).

rechtlichen Kompetenzrahmen definiert.¹⁸⁶ Der Aufgabenbereich der Raumordnung ist gemäß § 1 Abs. 1 ROG auf die zusammenfassende, überörtliche und fachübergreifende Raumplanung beschränkt. Durch das **Kriterium der „Überfachlichkeit“** wird klar gestellt, dass die Raumordnung Sachbereiche nur derart weitgehend regeln darf, wie aus überfachlichen Gründen ein Bedarf nach überörtlicher Abstimmung der unterschiedlichen Nutzungsansprüche an den Raum besteht.¹⁸⁷ Sie darf hingegen keine Ersatzfachplanung betreiben, sondern muss sich auf ihre Gesamtplanungskompetenz beschränken.¹⁸⁸ Festlegungen, die gleichwohl den Bereich der Fachplanung betreffen (z. B. Vorgaben zum Anlagenbetrieb), sind aufgrund der Überschreitung des raumordnungsrechtlichen Kompetenzrahmens grundsätzlich nichtig.¹⁸⁹

Klärungsbedürftig ist das Rangverhältnis insbesondere dann, wenn die Raumordnung gegenüber der Fachplanung verbindlich festschreiben will, welchen Standort die Fachplanungsbehörde für ein konkretes Vorhaben zu wählen hat. Wie oben dargestellt, ist die Raumordnung dazu befugt, für ein Gebiet, welches für die Verwirklichung eines Fachplanungsprojekts vorgesehen ist, eine abweichende Raumnutzung festzuschreiben und die Fachplanung über Zielfestlegungen an den Festsetzungsinhalt zu binden.¹⁹⁰ Auf diese Weise kann der fachplanerische Entscheidungsspielraum erheblich eingeschränkt werden, da die Fachplanung dann nur die verbleibenden Freiflächen für die Verwirklichung ihrer Planung in Betracht ziehen kann.¹⁹¹

Diese Kompetenz der Raumordnung hat durch die Entscheidung des Bundesverwaltungsgerichts zum Flughafen Berlin-Schönefeld im Jahr 2006 insoweit eine deutliche Aufwertung erfahren, als hiernach die Raumordnung sogar letztverbindlich einen Standort für ein bestimmtes Projekt festschreiben und damit zugleich der Planfeststellungsbehörde die Suche nach alternativen Positionen verwehren kann.¹⁹² In seiner Entscheidung führt der erkennende Senat hierzu aus, es sei weder Aufgabe der Planfeststellungsbehörde noch sei diese dazu befugt, die vorangegangene raumordnerische Abwägung durch eine eigene ergebnisoffene Abwägung der nach ihrer Auffas-

¹⁸⁶ *Kment*, NuR 2010, 392 (392 f.).

¹⁸⁷ *Kment*, NuR 2010, 392 (393).

¹⁸⁸ BayVerfGH, Urteil vom 15.07.2002 – Vf. 10-VII-00, Rn 90 m. w. N.

¹⁸⁹ *Daff/Grotefels/Kment et al.*, Zentralinstitut für Raumplanung an der Universität Münster, DVBl. 2005, 1149 (1156).

¹⁹⁰ *Daff/Grotefels/Kment et al.*, Zentralinstitut für Raumplanung an der Universität Münster, DVBl. 2005, 1149 (1157).

¹⁹¹ BVerwGE 125, 116 (139).

¹⁹² BVerwGE 125, 116 (137 f.).

sung maßgeblichen Standortanforderungen zu ersetzen, zu bestätigen oder zu korrigieren, wenn der Vorhabenträger die Zulassung eines Flughafenvorhabens an dem von der Landesplanung festgelegten Standort beantrage. Die Planfeststellungsbehörde habe das Ergebnis des landesplanerischen Standortvergleichs als solches hinzunehmen. Diese Feststellungen stützt das Gericht darauf, dass die Wahl eines Standorts vorrangig eine raumordnerische Entscheidung darstelle. Die Standortwahl habe weiträumige Auswirkungen auf die Siedlungs- und Freiraumstrukturen des Planungsraums und schaffe Nutzungskonflikte, die in der Regel bereits auf der übergeordneten Ebene der Landesplanung ein öffentliches Planungsbedürfnis auslösen würden.

Diese Erwägungen dürften sich – wenn auch sicherlich nur teilweise¹⁹³ – auf etwaige Gebietsausweisungen für geothermische Anlagen übertragen lassen. Hierfür spräche, dass auch diese als Anlagen zur Strom-/Wärme-Erzeugung mit der Notwendigkeit des Anschlusses an entsprechende Versorgungsnetze weiträumige Auswirkungen auf die Siedlungs- und Freiraumstrukturen des Planungsraums haben können und Nutzungskonflikte im Untergrund schaffen können.

6.2.2.3 Fachplanung

Während die Gesamtplanung querschnittsorientiert die Raumannsprüche und Belange koordiniert, steht bei der Fachplanung ein bestimmtes fachliches Ziel, z. B. die Verwirklichung eines raumbeanspruchenden Vorhabens oder die Verbesserung der Boden-, Luft- oder Gewässerqualität im Vordergrund.¹⁹⁴ Für die behördliche Feststellung eines Planes zur Errichtung bestimmter raumbeanspruchender Anlagen enthalten die speziellen Fachplanungsgesetze Planfeststellungsverfahren. Für den Fall, dass die betreffenden Spezialgesetze keine diesbezüglichen Regelungen enthalten, sind die allgemeinen Vorschriften der §§ 72 ff. VwVfG ergänzend anzuwenden.

Zu den Fachplanungen mit umweltspezifischer Zielsetzung gehören solche Planungen, die ausschließlich zu Umweltschutzzwecken aufgestellt werden. Beispiele sind die Landschaftsplanung nach §§ 9 ff. BNatSchG, Ausweisung von Natur- und Landschaftsschutzgebieten nach §§ 22 ff. BNatSchG, Pläne zur Luftreinhaltung sowie

¹⁹³ Zu den Kompetenzkonflikten zwischen Raumordnung und Fachplanung siehe auch *Deutsch*, NVwZ 2010, S. 1520.

¹⁹⁴ *Hoppe/Beckmann/Kauch*, Umweltrecht, 2. Aufl. 2000, § 7 Rn. 82.

Lärminderungspläne nach §§ 47 ff. BImSchG, die Abfallwirtschaftsplanung nach § 30 KrWG sowie die Festsetzung von Wasserschutzgebieten nach § 51 WHG.

Besonders die Festsetzung von Wasserschutzgebieten ist für die Frage der (wasserrechtlichen) Zulässigkeit von geothermalen Tiefbohrungen besonders relevant und wird nachfolgend betrachtet.

6.2.2.3.1 Festsetzung von Wasserschutzgebieten nach § 51 WHG

6.2.2.3.1.1 Allgemeines

Das Wasserhaushaltsgesetz unterstellt Gewässer (§§ 2, 3 WHG) zur Sicherung einer funktionsfähigen Wasserbewirtschaftung – insbesondere zur Sicherung der öffentlichen Wasserversorgung – einer vom Grundstückseigentum getrennten öffentlich-rechtlichen Benutzungsordnung¹⁹⁵, zu der etwa die in § 5 WHG geregelten allgemeinen Sorgfaltspflichten und die Erlaubnis- bzw. Bewilligungspflicht des § 8 Abs. 1 WHG gehören. Im Rahmen dieser öffentlich-rechtlichen Benutzungsordnung werden durch die Festsetzung von Wasserschutzgebieten ausgewählte Areale einer verstärkten wasserwirtschaftlichen Aufsicht, Lenkung und Pflege unterstellt.¹⁹⁶ Durch die Wasserschutzgebietsverordnung selbst oder durch eine an die Schutzgebietsfestsetzung anknüpfende behördliche Entscheidung können insbesondere bestimmte Handlungen verboten oder für nur eingeschränkt zulässig erklärt (§ 52 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 WHG) sowie die Eigentümer und/oder Nutzungsberechtigten zur Vornahme oder Duldung bestimmter Maßnahmen verpflichtet werden (§ 52 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 lit a–c WHG). Das durch eine Wasserschutzgebietsverordnung statuierte Sonderrecht verdrängt die allgemeinen wasserrechtlichen Regelungen dabei nicht, sondern normiert zusätzliche Anforderungen.¹⁹⁷

¹⁹⁵ Vgl. BVerfGE 58, 300, 301.

¹⁹⁶ *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 1.

¹⁹⁷ *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 1 mit weiteren Nachweisen.

6.2.2.3.1.2 Verhältnis zur Bauleitplanung

Bei der Aufstellung von Bauleitplänen sind gemäß § 1 Abs. 6 Nr. 7 BauGB die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege, darunter die Auswirkungen auf das Wasser (lit a) zu berücksichtigen. Soweit die in § 1 Abs. 6 Nr. 7 BauGB bezeichneten Belange den Gegenstand anderweitiger gesetzlicher Regelungen bilden, ergeben sich aus ihnen Bindungen für die Bauleitplanung; dies gilt auch für den Gewässerschutz.¹⁹⁸ Gebote und Verbote, die sich aus den Festsetzungen einer Wasserschutzgebietsverordnung ergeben, wirken sich in der Bauleitplanung als Planungsschranke aus; sie stellen zwingendes Recht dar, über das die Gemeinde sich nicht hinwegsetzen darf.¹⁹⁹

6.2.2.3.1.3 Zuständigkeit, Verfahren und Form sowie Festsetzungsvoraussetzungen

Gemäß § 51 Abs. 1 Satz 1 WHG können die Wasserschutzgebiete von den Landesregierungen durch Rechtsverordnung festgesetzt werden. Die Landesregierungen können die Ermächtigung nach § 51 Abs. 1 Satz 3 WHG auf andere Landesbehörden übertragen. Im Übrigen gelten die jeweiligen landesrechtlichen Regelungen²⁰⁰, die teilweise voneinander abweichen.

Eine Festsetzungsverordnung, die die Nutzungsrechte der Grundstückseigentümer einschränkt, muss im Hinblick auf das aus dem Rechtsstaatsprinzip (Art 20 Abs. 3 GG) abgeleitete Gebot der Normbestimmtheit und Normklarheit aus sich heraus verständlich sein. Nach § 51 Abs. 1 Satz 2 WHG ist in der Rechtsverordnung die begünstigte Person zu benennen. Begünstigte Person ist regelmäßig das Wasserversorgungsunternehmen, zu dessen Gunsten das Wasserschutzgebiet festgesetzt wird (vgl. BT-Drs 16/12275, Seite 67). Durch die Nennung der begünstigten Person wird geklärt, wer im Fall der Nutzungseinschränkungen von Grundstücken gegebenenfalls die Entschädigung nach § 52 Abs. 4 bzw. den Ausgleich nach § 52 Abs. 5 WHG zu leisten hat.

¹⁹⁸ *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 3 mit Verweis auf BVerwG ZfW 1994, 275.

¹⁹⁹ *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 3 mit Verweis auf BVerwG ZfW 1994, 275.

²⁰⁰ Landeswassergesetze und Verwaltungsvorschriften zum Vollzug des Wasserrechts

In § 51 Abs. 1 Satz 1 WHG sind eine Reihe von **Festsetzungsvoraussetzungen** geregelt, die für jede einzelne, in das Wasserschutzgebiet einzubeziehende Teilfläche gegeben sein müssen.²⁰¹ Im Rahmen der Prüfung der Festsetzungsvoraussetzungen ist jeweils in einem ersten Schritt zu klären, ob die in Rede stehende Wasserschutzgebietsfestsetzung bzw. die Einbeziehung einer bestimmten Teilfläche in das Wasserschutzgebiet einem der in § 51 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 bis 3 WHG abschließend aufgezählten Zwecke dient (z. B. nach § 51 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 WHG dem Festsetzungszweck „Gewässer im Interesse der derzeit bestehenden oder künftigen öffentlichen Wasserversorgung vor nachteiligen Einwirkungen zu schützen“). Ist dies zu bejahen, stellt sich in einem zweiten Schritt die Frage, ob das Wohl der Allgemeinheit die Festsetzung eines Wasserschutzgebietes bzw. die Einbeziehung einer bestimmten Teilfläche in das Wasserschutzgebiet erfordert. Die Feststellung, ob und inwieweit das Wohl der Allgemeinheit die Festsetzung eines Wasserschutzgebietes erfordert, ist nach der Rechtsprechung durch Gegenüberstellung und Abwägung der für die Maßnahme sprechenden öffentlichen Interessen und der durch sie beeinträchtigten öffentlichen und privaten Belange anhand des Maßstabes des verfassungsrechtlich verankerten Übermaßverbotes zu treffen.²⁰² Der Begriff der Erforderlichkeit begründet einen strikten und justiziablen Rechtfertigungszwang²⁰³, wobei die Erforderlichkeit der Festsetzung eines Wasserschutzgebietes im Fall des § 51 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 WHG nach ständiger Rechtsprechung²⁰⁴ anhand von **Schutzwürdigkeit, Schutzbedürftigkeit und Schutzfähigkeit des jeweiligen Wasservorkommens** zu beurteilen ist.²⁰⁵

Schutzwürdigkeit: Der Schutz der Trinkwasservorräte in der Natur vor Verschmutzung liegt grundsätzlich im Interesse der Allgemeinheit.²⁰⁶ Schutzwürdigkeit ist nach der Rechtsprechung immer dann anzunehmen, wenn das konkrete Wasservorkommen wegen seiner Bedeutung (Güte, Menge, Brauchbarkeit) für die öffentliche Trinkwasserversorgung des Schutzes bedarf.²⁰⁷ Die grundsätzliche Schutzwürdigkeit eines Grund-

²⁰¹ *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 15 mit Verweis auf BVerwG ZfW 1984, 294; VGH München ZfW 2010, 177 und andere.

²⁰² *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 15 mit Verweis u. a. auf OVG Koblenz ZfW 2000, 243.

²⁰³ So ausdrücklich BVerfG ZfW 2007, 99

²⁰⁴ Siehe hierzu etwa BVerwG NVwZ 2013, 227; VGH München ZfW 2010, 177.

²⁰⁵ Siehe hierzu und nachfolgend *Tünnesen-Harmes* in Giesberts/Reinhardt, Beck'scher OK Umweltrecht, WHG § 51 Rn 27 ff. mit weiteren Verweisen.

²⁰⁶ VGH Mannheim ZfW 2000, 138.

²⁰⁷ OVG Koblenz ZfW 2000, 243.

wasserkörpers wird nicht dadurch in Frage gestellt, dass die Gefahr einer verunreinigenden Einwirkung nicht vollständig ausgeschlossen werden kann.²⁰⁸

Schutzbedürftigkeit: Schutzbedürftigkeit bezeichnet nach der Rechtsprechung eine Wahrscheinlichkeit, dass das in Rede stehende Wasser ohne den Schutz durch eine Wasserschutzgebietsverordnung in seiner Eignung für Trinkwasserzwecke beeinträchtigt wird.²⁰⁹ Hinsichtlich der Schutzbedürftigkeit bedarf es nach ständiger Rechtsprechung keines konkreten Nachweises eines unmittelbar drohenden Schadenseintritts; ausreichend ist ein Anlass, typischerweise gefährlichen Situationen zu begegnen.²¹⁰

Schutzfähigkeit: Ein Wasservorkommen ist schutzfähig, wenn es ohne unverhältnismäßige Beschränkung der Rechte Dritter geschützt werden kann.²¹¹

Soweit die Voraussetzungen des § 51 Abs. 1 Satz 1 WHG vorliegen, entscheidet der Verordnungsgeber nach **Ermessen**, ob er ein Wasserschutzgebiet festsetzt oder dies im Hinblick auf anderweitige Möglichkeiten eines wirksamen Schutzes des Grundwassers unterlässt (siehe Wortlaut der Norm: „kann ... festsetzen“).

Nach § 51 Abs. 2 WHG sollen Trinkwasserschutzgebiete nach Maßgabe der **allgemein anerkannten Regeln der Technik**²¹² in Zonen mit unterschiedlichen Schutzbestimmungen unterteilt werden.

Durch die Unterteilung von Trinkwasserschutzgebieten in Zonen mit unterschiedlichem Schutzniveau, die in den Bundesländern auf der Basis landesrechtlicher Vorschriften bereits seit langem gängige Praxis ist, soll dem Schutz des Trinkwassers angemessen Rechnung getragen werden.²¹³ Trinkwasserschutzgebiete werden üblicherweise in drei Zonen mit unterschiedlicher Schutzintensität eingeteilt²¹⁴:

²⁰⁸ OVG Schleswig ZfW 1996, 541.

²⁰⁹ Vgl. OVG Koblenz ZfW 2000, 243; VGH Mannheim ZfW 2000, 138; OVG Schleswig ZfW 1996, 541.

²¹⁰ BVerwG ZfW 1981, 87; VGH München ZfW 2007, 235; 2003, 219; 2001, 242; 1997, 236.

²¹¹ Vgl. OVG Koblenz ZfW 2000, 243.

²¹² Die „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ werden in diesem Zusammenhang insbesondere durch das Regelwerk des Deutschen Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) wiedergegeben. Insbesondere die Arbeitsblätter W 101 („Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; I. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser“) und W 102 („Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; II. Teil: Schutzgebiete für Talsperrn“) sind hier zu beachten.

²¹³ Siehe BT-Drs 16/12275, Seite 67.

²¹⁴ *Hünnekens* in Landmann/Rohmer, Umweltrecht, WHG § 51 Rn 71 ff.

- **Der Fassungsbereich, Zone I**, dient dem Schutz der eigentlichen Fassungsanlage oder des Talsperrenwassers im Nahbereich vor jedweder Beeinträchtigung. Er ist im Regelfall sehr klein gefasst und nur dem Betreiber der Wassergewinnungsanlage zugänglich; lediglich bei Talsperren wird er größer gefasst.
- **Die engere Schutzzone, Zone II**, reicht von der Grenze der Zone I bis zu einer Linie, von der aus das Grundwasser etwa 50 Tage bis zum Eintreffen in der Fassungsanlage benötigt (sog. „50-Tage-Linie“). Vom Rand der engeren Schutzzone soll die Fließzeit des Wassers mindestens 50 Tage betragen, um Trinkwasser vor pathogenen Keimen und Verunreinigungen, die ein besonderes Gefahrenpotential in sich bergen können, zu schützen. Das engere Schutzgebiet dient insbesondere dem Schutz des dahinter liegenden Einzugsbereichs, weil eine besondere Nähe zur Fassungsanlage besteht. Das Kriterium der „50-Tage-Linie“ ist daher für die räumliche Abgrenzung der Zone II von der Zone I entscheidend.
- **Die weitere Schutzzone, Zone III**, umfasst – sofern möglich – das gesamte Einzugsgebiet der geschützten Wassererfassung; sie soll den Schutz vor mittel- und langfristigen Beeinträchtigungen gewährleisten. Dazu zählen vor allem solche chemischen Verunreinigungen, die kaum abbaubar sind.²¹⁵ Die Zone III kann gegebenenfalls noch weiter in die Sektionen „A“ und „B“ unterteilt werden.

Während in der engeren Schutzzone (Zone II) nur beschränkte landwirtschaftliche Nutzungen erlaubt sind, können in der weiteren Schutzzone (Zone III) auch Wohnhäuser und gewerbliche Nutzungen zugelassen werden. Häufig sind allerdings die Durchführung von Bohrungen und andere bergbauliche Aktivitäten auch in der weiteren Schutzzone (Zone III) durch die einzelnen Wasserschutzgebietsverordnungen verboten.²¹⁶

Das DVGW-Arbeitsblatt W 101, welches zur Konkretisierung der in § 51 Abs. 2 WHG geforderten Unterteilung von Trinkwasserschutzgebieten nach Maßgabe der allgemein anerkannten Regeln der Technik in Zonen mit unterschiedlichen Schutzbestimmungen herangezogen wird, enthält – anders als in früheren Fassungen (z. B. Arbeitsblatt W

²¹⁵ Vgl. OVG Lüneburg, Urteil vom 19. 4. 2007 – 7 LC 67/05 –, NVwZ-RR 2007, 666, 668.

²¹⁶ Siehe beispielsweise die Verordnung des Landratsamtes Aschaffenburg über das Wasserschutzgebiet in der Stadt Aschaffenburg, der Gemeinde Niedernberg, Landkreis Miltenberg, und dem Markt Großostheim, Landkreis Aschaffenburg, für die öffentliche Wasserversorgung der Stadt Aschaffenburg, abrufbar unter http://www.aschaffenburg.de/upl_files/b/bi/A-3-1.pdf

101, Stand Februar 1975) – in der aktuellen Fassung von Juni 2006 selbst keine Auflistung von „in der Regel nicht tragbaren“ Tätigkeiten in der weiteren Schutzzone (Zone III). Solche nicht tragbare Tätigkeiten in der Zone III A waren nach Punkt 5.1.2 Buchstabe t) der Fassung von 1975 noch *„Bohrungen zum Aufsuchen oder Gewinnen von Erdöl, Erdgas, Kohlensäure, Mineralwasser, Salz, radioaktiven Stoffen sowie zur Herstellung von Kavernen“*.

Die Tabelle 1 des aktuellen DVGW-Arbeitsblattes W 101 gibt aber Hinweise auf Gefährdungen mit Prüfungsbedarf in den Schutzzonen II und III. Demnach sei bei der Anwendung der Tabelle 1 in Bezug auf die Einstufung des Gefährdungspotenzials ein einheitlicher Maßstab für den Vergleich der unterschiedlichen Gefährdungen nicht gegeben. Bei der Formulierung der Schutzgebietsverordnungen sei ein Ermessensspielraum gegeben, der sich an der natürlichen Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung und den bereits vorhandenen Nutzungen orientieren sollte. Es sei für jede einzelne Schutzbestimmung zu prüfen, ob die Durchführung der genannten Handlungen in der jeweiligen Zone überhaupt möglich bzw. nicht mit ausreichender Sicherheit auszuschließen ist. Sodann sei zu prüfen, ob durch die genannten Handlungen in der jeweiligen Zone eine Gefährdung ausgeht und unter Beachtung des Verhältnismäßigkeitsgrundsatzes ein Verbot oder eine Beschränkung notwendig ist. Die Tabelle 1 führt innerhalb der Kategorie 5 „Eingriffe in den Untergrund“ unter 5.4 Bohrungen in der Zone III und III A mit einem „hohen Gefährdungspotential“, in der der Zone III B mit einem „weniger hohen Gefährdungspotential“.

6.2.2.3.2 Zwischenergebnis

Steuerungsmöglichkeiten der wasserwirtschaftlichen Fachplanung sind durch die Möglichkeit der Festsetzung von Wasserschutzgebieten vorhanden. Sofern man in der Grundwassernutzung durch die Geothermie also ein entsprechendes Gefährdungspotential für ein konkretes Wassergewinnungsgebiet sieht²¹⁷, kann die zuständige Verwaltungsbehörde ein solches (Trink-)Wasserschutzgebiet per Verordnung festsetzen. Das Konzept bei der Bemessung dieser Wasserschutzgebiete orientiert sich am DVGW-Arbeitsblatt W 101, sollte aber auch klare Differenzierungen bezüglich der zulässigen Tätigkeiten inkl. der bergbaulichen Eingriffe in den Untergrund beinhalten. Auf

²¹⁷ Zur Thematik „Grundwassernutzung durch Geothermie und Fracking“ siehe auch *Walter* in Kluth/Smeddinck, Umweltrecht, § 4 Wasserrecht Rn 136.

diese Weise wirken sich Gebote und Verbote, die sich aus den Festsetzungen einer Wasserschutzgebietsverordnung ergeben, in der Bauleitplanung als Planungsschranke aus. Weitere sensible Teile des Einzugsgebiets könnten im Hinblick auf raumbedeutsame Planungen als Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für die öffentliche Wasserversorgung in den Regionalplänen dargestellt werden.²¹⁸

6.2.2.4 Bauleitplanung

6.2.2.4.1 Allgemeines

Die Kompetenz der Bauleitplanung gehört zu dem verfassungsrechtlich gewährleisteten **Selbstverwaltungsrecht der Gemeinden** (Art. 28 Abs. 2 GG).²¹⁹ Aufgabe der Bauleitplanung ist es, die bauliche und sonstige Nutzung der Grundstücke in der Gemeinde nach Maßgabe des Baugesetzbuches vorzubereiten und zu leiten (§ 1 Abs. 1 BauGB). Ihr obliegt es, eine erste konkrete Entscheidung darüber zu treffen, ob und in welcher Form bestimmte kommunale Flächen genutzt werden.²²⁰ Instrumente der Bauleitplanung sind gemäß § 1 Abs. 2 BauGB zum einen der für das gesamte Gemeindegebiet aufzustellende Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan) und zum anderen der in der Regel nur für einzelne Teilgebiete einer Gemeinde aufzustellende Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan). Der Bauleitplanung kommt eine wichtige, den Einsatz erneuerbarer Energien und die sparsame und effiziente Nutzung von Energie unterstützende Funktion zu. Gemäß § 1 Abs. 5 BauGB sollen die Bauleitpläne eine nachhaltige städtebauliche Entwicklung, die die sozialen, wirtschaftlichen und umweltschützenden Anforderungen auch in Verantwortung gegenüber künftigen Generationen miteinander in Einklang bringt, und eine dem Wohl der Allgemeinheit dienende sozialgerechte Bodennutzung gewährleisten. Ferner sollen sie dazu beitragen, eine

²¹⁸ Siehe oben unter Punkt 6.2.2.2.5.

²¹⁹ Den Gemeinden wird die „Regelung“ aller „**Angelegenheiten der örtlichen Gemeinschaft**“ „in eigener Verantwortung“ garantiert. Eigenverantwortlichkeit bedeutet die grundsätzliche, das Ob, Wann und Wie der Aufgabenwahrnehmung umfassende Entschließungsfreiheit der Gemeinde, die ihrer Verbandskompetenz unterliegenden Aufgaben ohne staatliche Einflussnahme oder Bevormundung so zu erfüllen, wie dies – im Rahmen der Rechtsordnung – ihrem Gestaltungswillen entspricht (vgl. *Nierhaus* in Sachs, Grundgesetz Kommentar, Art. 28 Rn 52 unter Verweis auf RHPfVerfGH, DÖV 1983, 113). Hinsichtlich bestimmter Versorgungsleistungen, die früher als gemeindliche Aufgaben qualifiziert wurden, stellt sich heute die Frage, ob diese noch örtlichen Charakter haben. Für Telekommunikationslinien hat dies das BVerfG abgelehnt (vgl. BVerfG, NVwZ 1999, 520); im Hinblick auf die Energie- sowie Wasserver- und -entsorgung ist die Frage noch nicht abschließend geklärt (siehe hierzu *Nierhaus* in Sachs, Grundgesetz Kommentar, Art. 28 Rn 51 m. w. N.).

²²⁰ *Kohls* in Danner/Theobald, Energierecht Kommentar, Band 4, XIII BauR, Rn, 226.

menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern. Bei der Aufstellung der Bauleitpläne sind die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege, insbesondere die Nutzung erneuerbarer Energien sowie die sparsame und effiziente Nutzung von Energie zu berücksichtigen (§ 1 Abs. 6 Nr. 7 f) BauGB). Darüber hinaus sind bei der Aufstellung der Bauleitpläne die öffentlichen und privaten Belange gegeneinander und untereinander gerecht abzuwägen (§ 1 Abs. 7 BauGB). Dabei unterliegen der Abwägung nicht die der Bauleitplanung vorgegebenen Ziele der Raumordnung (vgl. § 1 Abs. 4 BauGB).²²¹ Soweit Belange der Raumordnung zwar nicht in Zielen konkretisiert und damit der Bauleitplanung zur Anpassung vorgegeben sind, sind sie als öffentliche Belange zu berücksichtigen.²²²

6.2.2.4.2 Flächennutzungsplan

Ein Flächennutzungsplan enthält eine erste übergreifende Planung der Grundstruktur der Bodennutzung im gesamten Gemeindegebiet.²²³ Es wird für das ganze Gemeindegebiet die sich aus der beabsichtigten städtebaulichen Entwicklung ergebende Art der Bodennutzung nach den voraussehbaren Bedürfnissen der Gemeinde in den Grundzügen dargestellt (§ 5 Abs. 1 Satz 1 BauGB). Der gesamtörtliche Charakter des Flächennutzungsplans macht ihn zum Bindeglied zwischen der überörtlichen Raumordnung und der stärker teilgebietsbezogenen Bebauungsplanung.²²⁴

Die überörtlichen Gesamtplanungen entfalten für den Bürger keine unmittelbare Bindungswirkung. Rechtliche Verbindlichkeit erlangen sie vielmehr erst durch ihre Über-

²²¹ Allerdings enthalten einige Landesplanungsgesetze (LPIG) Regelungen, nach denen bspw. die obere Landesplanungsbehörde im Benehmen mit den fachlich berührten Stellen der oberen Verwaltungsebene und der jeweiligen Planungsgemeinschaft die Abweichung von einem Ziel des regionalen Raumordnungsplans zulassen kann, wenn diese aufgrund veränderter Tatsachen oder Erkenntnisse unter raumordnerischen Gesichtspunkten vertretbar ist und der regionale Raumordnungsplan in seinen Grundzügen nicht berührt wird (Beispiel § 10 Abs. 6 LPIG in Rheinland-Pfalz). In dem Urteil des OVG RP vom 15.02.2012 – 8 A 10965/11 ging es um eine solche Zielabweichung vom raumordnerischen Ziel „Vorranggebiet für die Landwirtschaft“. Von diesem sollte zwecks Errichtung eines Geothermiekraftwerks abgewichen werden. Hierbei sah sich die Gemeinde in ihren Rechten (Selbstverwaltungsrecht bzw. Planungshoheit nach § 28 Abs. 2 GG, Einvernehmensefordernis nach § 36 BauGB) verletzt. Nach Auffassung des Gerichts berührt die Zulassung einer solchen Abweichung von einem Ziel der Raumordnung im Regelfall aber keine Rechte der Belegenheitsgemeinde.

²²² *Krautzberger*, in: *Battis/Krautzberger/Löhr*, BauGB-Kommentar, § 1 Rn. 104.

²²³ *Kohls* in *Danner/Theobald*, Energierecht Kommentar, Band 4, XIII BauR, Rn. 228.

²²⁴ *Oldiges*, in: *Steiner*, Besonders Verwaltungsrecht, 8. Aufl. 2006, III Rn. 75.

nahme in den Bebauungsplan, der seinerseits durch den Flächennutzungsplan inhaltlich gesteuert wird.²²⁵ Daher müssen die Bauleitpläne, also bereits auch der Flächennutzungsplan, ihre inhaltlichen Aussagen an die in den überörtlichen Raumplänen festgelegten Ziele der Raumordnung anpassen (§ 1 Abs. 4 BauGB). Seinem Inhalt nach soll der Flächennutzungsplan in den Grundzügen „darstellen“, wie sich die verschiedenen Formen der Bodennutzung innerhalb der Gemeinde nach deren städtebaulicher Konzeption auf die einzelnen Gemeindeflächen verteilen.²²⁶

Die Darstellungsmöglichkeiten für den Flächennutzungsplan sind in § 5 Abs. 2 Nr. 1 bis 10 BauGB aufgeführt, wobei diese – wie aus dem Wort „insbesondere“ hervorgeht – keine abschließende Regelung enthalten. Die Gemeinde kann also weitere Darstellungen als im Katalog vorgesehen treffen, sie kann vor allem auch die Darstellungen weitergehend differenzieren. Sie kann allerdings nicht über den abschließenden Katalog des § 9 Abs. 1 BauGB für Bebauungspläne hinausgehen, weil sonst dem Entwicklungsgebot des § 8 Abs. 2 S. 1 BauGB nicht genüge getan werden könnte.²²⁷ Die Darstellungsmöglichkeiten im Sinne des § 5 Abs. 2 BauGB sind mittelbar alle für den Umweltschutz von wesentlicher Bedeutung. Als unmittelbar umweltschützende Darstellungen können im Flächennutzungsplan insbesondere die Flächen für Nutzungsbeschränkungen oder Vorkehrungen zum Schutz gegen schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (§ 5 Abs. 2 Nr. 6 BauGB) und die Flächen für die Maßnahmen zum Schutz, zur Pflege und Entwicklung von Natur und Landschaft (§ 5 Abs. 2 Nr. 10 BauGB) angesehen werden. Zuletzt wurden die Darstellungsmöglichkeiten in § 5 Abs. 2 BauGB durch das **Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden vom 22.07.2011**²²⁸ erweitert. Nunmehr ist es möglich, die Ausstattung des Gemeindegebiets mit Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, insbesondere zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung im Flächennutzungsplan darzustellen (vgl. § 5 Abs. 2 Nr. 2 b) BauGB). Darüber hinaus kann der Plangeber die Ausstattung mit Anlagen, Einrichtungen und sonstigen Maßnahmen, die der Anpassung an den Klimawandel dienen, darstellen (vgl. § 5 Abs. 2 Nr. 2 c) BauGB). Der Flächennutzungsplan kann

²²⁵ *Brohm*, Öffentliches Baurecht, 3. Aufl. 2002, § 6 Rn. 5.

²²⁶ *Oldiges*, in: Steiner, Besonders Verwaltungsrecht, 8. Aufl. 2006, III Rn. 76.

²²⁷ *Löhr*, in: Battis/Krautzberger/Löhr, BauGB-Kommentar, § 5 Rn. 11.

²²⁸ Siehe BGBl. I, 1509.

außerdem der Abwehr umweltbelastender Inanspruchnahmen des Außenbereichs dienen, weil seine Darstellungen zu den öffentlichen Belangen gehören, die der Genehmigung eines Bauvorhabens im Außenbereich gemäß § 35 Abs. 3 BauGB entgegenstehen können.²²⁹

6.2.2.4.3 Teilflächennutzungsplan

§ 5 Abs. 2b BauGB ermöglicht es den Gemeinden, durch sog. sachliche Teilflächennutzungspläne die Rechtswirkungen des § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB herbeizuführen. Die Regelung bezieht sich auf das Darstellungsprivileg, das eine Steuerung von nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 bis 6 BauGB privilegierten Vorhaben ermöglicht. Die gemeindlichen und regionalen Planungsträger können die genannten Vorhaben auf bestimmte Standorte konzentrieren und für andere Teile des Plangebietes ausschließen.²³⁰ Dies setzt allerdings nach der Rechtsprechung des Bundesverwaltungsgerichts²³¹ ein in sich geschlossenes Gesamtkonzept für das Plangebiet voraus. Privilegierte Vorhaben konnten nach diesem Darstellungsprivileg nur dann gesteuert werden, wenn das gesamte Plangebiet nach Ausschluss- und Abwägungskriterien lückenlos geprüft worden ist. Fehler in den Ausschluss- oder Abwägungskriterien führen dazu, dass die Ausschlusswirkung entfällt. Durch Ergänzung des § 5 Abs. 2b BauGB stellt der Gesetzgeber nunmehr klar, dass die Ausschlusswirkung des § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB auch auf Teile des Gemeindegebiets begrenzt werden kann. Dies hat für die kommunalen Planungsträger den Vorteil, dass eine Überprüfung des Gesamttraumes auf der Grundlage von Ausschluss- und Abwägungskriterien nicht erforderlich ist.²³² So kann die planende Gemeinde sich etwa darauf beschränken, in aus ihrer Sicht besonders schutzwürdigen Bereichen des Plangebiets die privilegierten Vorhaben auszuschließen. Allerdings müssen auch die auf einen räumlichen Teilbereich des Planungsraums beschränkten Darstellungen sicherstellen, dass eine substanzielle Nutzung der durch den Gesetzgeber nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 bis 6 BauGB privilegierten Vorhaben im Plangebiet gewährleistet ist.²³³

²²⁹ Zur Frage privilegierter Vorhaben im Außenbereich siehe Kapitel 6.2.2.5.2

²³⁰ *Stüer/Stüer*, DVBl. 2011, 1117 (1120).

²³¹ BVerwGE 117, 287.

²³² *Stüer/Stüer*, DVBl. 2011, 1117 (1120).

²³³ *Stüer/Stüer*, DVBl. 2011, 1117 (1120).

6.2.2.4.4 Bebauungsplan

Der Bebauungsplan, der gemäß § 10 Abs. 1 BauGB von der Gemeinde als Satzung beschlossen wird, enthält die rechtsverbindlichen Festsetzungen für die städtebauliche Ordnung und bildet damit die Grundlage für weitere baurechtliche Maßnahmen (vgl. § 8 Abs. 1 BauGB). Er verdichtet und konkretisiert die Festlegungen des Flächennutzungsplanes und verschafft ihnen materiell-rechtliche Bindungskraft gegenüber jedermann.²³⁴ Somit findet sich hier die umfassende und feine Steuerung der Ansiedlung und der konkreten Ausgestaltung von Energieanlagen.²³⁵ Da die Gemeinden einzelne Gebietsteile erst dann rechtsverbindlich planen sollen, wenn sie sich über die Entwicklung der Stadt insgesamt eine Konzeption gemacht haben, schreibt § 8 Abs. 2 BauGB vor, dass der Bebauungsplan aus dem Flächennutzungsplan zu „entwickeln“ ist.²³⁶ Da der Bebauungsplan eine unmittelbare Rechtsverbindlichkeit gegenüber dem Bürger besitzt, stellen sich seine Festsetzungen grundsätzlich als Einschränkungen der in Art. 14 Art. 1 GG gewährleisteten Baufreiheit dar. Die gesetzliche Ermächtigung dazu gibt § 9 BauGB. Die Norm enthält einen abschließenden Katalog von Festsetzungsmöglichkeiten. Zu diesen Festsetzungsmöglichkeiten kommen weitere auf Grund landesgesetzlicher oder spezieller bundesgesetzlicher Ermächtigungen hinzu. Auch ein Großteil der Festsetzungsmöglichkeiten des § 9 Abs. 1 Nr. 1 bis 26 BauGB hat für den Umweltschutz Bedeutung.²³⁷ Hervorzuheben ist hierbei insbesondere die Möglichkeit der Festsetzung von Versorgungsflächen, einschließlich der Flächen für Anlagen und Einrichtungen zur dezentralen und zentralen Erzeugung, Verteilung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung (§ 9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB) und die Möglichkeit der Festsetzung von Gebieten in denen bei der Errichtung von Gebäuden oder bestimmten sonstigen baulichen Anlagen bestimmte bauliche und sonstige technische Maßnahmen für die Erzeugung, Nutzung oder Speicherung von Strom, Wärme oder Kälte aus erneuerbaren Energien oder Kraft-Wärme-Kopplung getroffen werden müssen (§ 9 Abs. 1 Nr. 23 b) BauGB).²³⁸

²³⁴ *Oldiges*, in: Steiner, *Besonders Verwaltungsrecht*, 8. Aufl. 2006, III Rn. 80.

²³⁵ *Kohls* in Danner/Theobald, *Energierrecht Kommentar*, Band 4, XIII BauR, Rn. 233.

²³⁶ *Brohm*, *Öffentliches Baurecht*, 3. Aufl. 2002, § 6 Rn. 19.

²³⁷ Siehe hierzu *Kahl*, *Klimaschutz durch die Kommunen – Möglichkeiten und Grenzen*, ZUR 2010, 395; *Söfker* in Danner/Theobald, *Energierrecht*, B 2 Bauplanungsrecht und Erneuerbare Energien, Rn 88 ff.

²³⁸ Siehe hierzu *Hack*, *Energie-Contracting*, Rn 459 (477), der aber darauf hinweist, dass damit kein unmittelbarer Anschluss- und Benutzungszwang verbunden ist. Ein solcher kann u. a. durch Satzung der Gemeinde bestehen, sofern die Gemeindeordnung des jeweiligen Bundeslandes eine solche Möglichkeit vorsieht (siehe Kapitel 6.4.6).

6.2.2.4.5 Umsetzung der Anforderungen des EEWärmeG

6.2.2.4.5.1 Allgemeines

Der Bauleitplanung kommt eine wichtige, den Einsatz erneuerbarer Energien und die sparsame und effiziente Nutzung von Energie unterstützende Funktion zu. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf die Umsetzung der Anforderungen des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG)²³⁹, das am 1. Januar 2009 in Kraft getreten ist. Wie bereits dargestellt, sind gemäß § 1 Abs. 6 Nr. 7 f) BauGB bei der Aufstellung der Bauleitpläne die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege, insbesondere die Nutzung erneuerbarer Energien sowie die sparsame und effiziente Nutzung von Energie zu berücksichtigen. Damit sind diese Belange inhaltlich der Aufgabe der Bauleitplanung, „die bauliche und sonstige Nutzung der Grundstücke in der Gemeinde vorzubereiten und zu leiten“ (vgl. § 1 Abs. 1 BauGB), zugeordnet. Als Planungsgrundsatz hat § 1 Abs. 6 Nr. 7 f) BauGB verschiedene Bedeutungen. Er berechtigt die Gemeinden, bei der Aufstellung der Bauleitpläne entsprechende Ziele zu verfolgen (Planungsbefugnis im Sinne des § 1 Abs. 3 Satz 1 BauGB). Nach § 1 Abs. 6 und 7 BauGB verpflichtet er die Gemeinde, bei der Aufstellung der Bauleitpläne auf diese Belange zu achten, und es kommt ihm im Rahmen der Abwägung eine auf diese Belange ausgerichteten Bauleitplanung unterstützende Funktion zu.

6.2.2.4.5.2 Anforderungen des EEWärmeG

Das EEWärmeG verfolgt den Zweck, im Interesse des Klimaschutzes, der Schonung fossiler Ressourcen und der Minderung der Abhängigkeit von Energieimporten, eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen und die Weiterentwicklung von Technologien zur Erzeugung von Wärme und Kälte aus erneuerbaren Energien zu fördern (vgl. § 1 Abs. 1 EEWärmeG). Eigentümer von Neubauten mit einer Nutzfläche von mehr als 50 m² sind verpflichtet, einen Teil ihres Wärme- und Kälteenergiebedarfs aus erneuerbaren Energien zu decken (Nutzungspflicht nach § 3 Abs. 1 EEWärmeG). Als erneuerbare Energien im Sinne des EEWärmeG gelten die Geothermie, Umweltwärme, solare Strahlungsenergie und Biomasse (§ 2 Abs. 1

²³⁹ BGBl. I S. 1658.

EEWärmeG). Seit der Novellierung des EEWärmeG im Jahr 2011 muss die öffentliche Hand zudem auch bei einer grundlegenden Renovierung bereits errichteter, in ihrem Eigentum oder Besitz befindlicher Gebäude den Energiebedarf durch eine anteilige Nutzung erneuerbarer Energien decken. Die Länder können weiter gehende Regelungen erlassen (§ 3 Abs. 3 und 4 EEWärmeG). § 5 EEWärmeG benennt die in Betracht kommenden erneuerbaren Energien, über deren Nutzung der Verpflichtete wahlweise entscheiden kann, und legt deren Anteile am Wärmebedarf fest. Bei Nutzung solarer Strahlungsenergie hat die Deckung des Wärmeenergiebedarfs zu mindestens 15 % hieraus zu erfolgen. Bei der Nutzung gasförmiger Biomasse beträgt die Deckungsvorgabe mindestens 30 %. Bei der Nutzung flüssiger und fester Biomasse sowie bei der Nutzung von Geothermie und Umweltwärme muss der Bedarf an Wärmeenergie zu mindestens 50 % gedeckt werden. Die **Nutzungspflichten können gemäß § 7 EEWärmeG auch durch sog. Ersatzmaßnahmen erfüllt werden**. Dies kann wahlweise durch die Nutzung technischer Abwärme, durch Kraft-Wärme-Kopplung, durch Maßnahmen zur Energieeinsparung sowie durch unmittelbaren **Anschluss an das Netz der Nah- und Fernwärmeversorgung** erfolgen. Die Maßnahmen einschließlich der Ersatzmaßnahmen können auch kombiniert oder durch den Zusammenschluss mehrerer Nutzungspflichtiger erreicht werden (§ 6 EEWärmeG).

6.2.2.4.6 Steuerungsmöglichkeiten bezüglich geothermischer Anlagen in der Bauleitplanung

Zur Steuerung geothermischer Anlagen im Innenbereich²⁴⁰ käme im Bebauungsplan die Ausweisung eines Gebiets als Fläche für die öffentliche Versorgung gemäß § 9 Abs. 1 Nr. 12 BauGB in Betracht, sofern die zu errichtenden Anlagen der allgemeinen Versorgung der Bevölkerung dienen. Ein eigenständiges Baugebiet für Geothermieanlagen könnte theoretisch durch die Ausweisung eines Sondergebiets nach § 11 Abs. 2 BauNVO („*Gebiete für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung erneuerbarer Energien, wie Wind- und Sonnenenergie, dienen*“) geschaffen werden.

²⁴⁰ Zur Systematik der bauplanungsrechtlichen Zulässigkeit von Vorhaben siehe Kapitel 6.2.2.5.

Nimmt man die Privilegierung der Zulässigkeit von Geothermieanlagen nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB an²⁴¹, kommt eine Standortsteuerung im Außenbereich durch die Flächennutzungsplanung in Betracht. Auf der Ebene der Flächennutzungsplanung hat die Gemeinde verschiedene Möglichkeiten, Einfluss auf die Standorte von Geothermieanlagen in ihrem Gemeindegebiet zu nehmen. So können die Darstellungen eines Flächennutzungsplans einem Geothermie-Vorhaben als öffentlicher Belang gemäß § 35 Abs. 3 S. 1 Nr. 1 BauGB entgegenstehen, wenn an dem beantragten Standort eine andere Nutzung ausgewiesen ist, die mit dem geplanten Vorhaben nicht vereinbar ist.²⁴² Die Festsetzungen haben dann eine Ausschlusswirkung für widersprechende Vorhaben. Umgekehrt kann die Gemeinde auch Flächen für die Nutzung von Geothermieanlagen ausdrücklich vorsehen. Hier kommt insbesondere die Festsetzungsmöglichkeit nach § 5 Abs. 2 Nr. 2 b) BauGB in Betracht.²⁴³

6.2.2.5 Bauplanungsrechtliche Zulässigkeit von Vorhaben

6.2.2.5.1 Systematik der §§ 29 ff. BauGB

Die Vorschriften der §§ 29 ff. BauGB über die Zulässigkeit von (Bau-)Vorhaben schaffen einen Ausgleich zwischen Planvorbehalt und Baufreiheit, städtebaulicher Einbindung und Schutz des Außenbereichs. Dabei ist davon auszugehen, dass das Bauen im Grundsatz erlaubt ist, soweit es nicht durch das Gesetz selbst oder durch planerische Festsetzungen der Gemeinde eingeschränkt oder untersagt ist.²⁴⁴ Das BauGB unterteilt das Gebiet einer Gemeinde planungsrechtlich in drei große Bereiche: den Außenbereich (§ 35 BauGB), der durch seine natürliche Funktion prinzipiell dazu bestimmt ist, von einer Bebauung freizubleiben, den nicht beplanten Innenbereich (§ 34 BauGB) sowie den qualifiziert beplanten Bereich (§§ 30 – 33 BauGB).

Ziel der bebauungsrechtlichen Bestimmungen des BauGB ist, die bauliche Nutzung von Grund und Boden nach Maßgabe bestimmter städtebaulicher Ordnungsvorstellungen zu beeinflussen.²⁴⁵ Hierzu dienen in erster Linie die Festsetzungen des gemeindli-

²⁴¹ Siehe 6.2.2.5.2.2.

²⁴² Siehe 6.2.2.5.2.5.

²⁴³ Siehe 6.2.2.4.2.

²⁴⁴ Vgl. *Battis/Krautzberger/Löhr*, Baugesetzbuch BauGB, Vorb. §§ 29-38 Rn. 4.

²⁴⁵ *Oldiges*, in: Steiner, *Besonders Verwaltungsrecht*, 8. Aufl. 2006, III Rn. 171.

chen Bebauungsplanes und die Ordnungskategorien der Baunutzungsverordnung (BauNVO), auf die er sich bezieht.²⁴⁶ Entspricht ein Vorhaben den Festsetzungen eines Bebauungsplans und ist die Erschließung gesichert, so ist es gemäß § 30 Abs. 1 BauGB zulässig. Soweit Flächen keinem Bebauungsplan unterfallen, richtet sich ihre Bebaubarkeit nach den §§ 34 und 35 BauGB, die das Bauen im Innenbereich und im Außenbereich regeln. Im nicht qualifiziert beplanten Innenbereich richtet sich die Zulässigkeit des Bauvorhabens nach § 34 Abs. 1 BauGB danach, ob sich das Vorhaben nach Art und Maß der baulichen Nutzung, der Bauweise und der überbauten Grundstücksfläche in die Umgebung einfügt. Entspricht die Eigenart der näheren Umgebung einem der Baugebiete der BauNVO, so ist ein Vorhaben gemäß § 34 Abs. 2 BauGB nach seiner Art nur zulässig, wenn es nach der BauNVO in dem Baugebiet zulässig wäre.

6.2.2.5.2 Bauen im Außenbereich (§ 35 BauGB)

6.2.2.5.2.1 Allgemeines

§ 35 BauGB regelt das Bauen im Außenbereich. Der Außenbereich soll grundsätzlich von Bebauung frei bleiben, es sei denn, die Bebauung gehört ihrem Wesen nach in den Außenbereich.²⁴⁷ Darin unterscheidet sich der Außenbereich prinzipiell vom Innenbereich, in dem entsprechend dem Prinzip der Baufreiheit von der grundsätzlichen Zulässigkeit baulicher Anlagen ausgegangen wird.²⁴⁸ § 35 BauGB schützt den Außenbereich in seiner besonderen Bedeutung für die naturgegebene Bodennutzung und als Erholungslandschaft für die Allgemeinheit und lässt daher Bauvorhaben nur ausnahmsweise zu.²⁴⁹

6.2.2.5.2.2 Privilegierte und sonstige Vorhaben

Strukturell unterscheidet § 35 BauGB zwischen privilegierten und sonstigen Vorhaben. Die privilegierten Vorhaben zählt § 35 Abs. 1 BauGB in den Nummern 1 bis 8 abschließend auf. Es handelt sich durchweg um Bauvorhaben, die auf Grund tatsächli-

²⁴⁶ *Oldiges*, in: Steiner, *Besonders Verwaltungsrecht*, 8. Aufl. 2006, III Rn. 171.

²⁴⁷ BVerwGE 28, 274.

²⁴⁸ Battis, *Öffentliches Baurecht und Raumordnungsrecht*, 5. Aufl. 2006, S. 151.

²⁴⁹ Battis, *Öffentliches Baurecht und Raumordnungsrecht*, 5. Aufl. 2006, S. 151.

cher Gegebenheiten typischerweise auf den Außenbereich angewiesen sind oder auf ihn verwiesen werden sollen.²⁵⁰ Hierzu zählen nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB Vorhaben, die der öffentlichen Versorgung mit Elektrizität, Gas, Telekommunikationsdienstleistungen, Wärme und Wasser, der Abwasserwirtschaft oder einem ortsgebundenen gewerblichen Betrieb dienen. Anders als etwa für Anlagen der Wind- oder Wasserenergie, für die mit dem Gesetz zur Änderung des BauGB vom 30.07.1996²⁵¹ (in Kraft getreten zum 01.07.1997) § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB als eigener Privilegierungstatbestand eingefügt wurde, existiert für die Geothermie kein solcher. Auch für Biomasseanlagen (§ 35 Abs. 1 Nr. 6 BauGB) und Anlagen zur Nutzung solarer Strahlungsenergie (§ 35 Abs. 1 Nr. 8 BauGB) wurden spezielle Privilegierungstatbestände eingefügt, allerdings müssen diese im Rahmen eines anderen Betriebs bzw. Gebäudes betrieben werden und im Falle der Nutzung solarer Strahlungsenergie dem Gebäude baulich untergeordnet sein.

Vorhaben der öffentlichen Versorgung mit Elektrizität, Gas, Wärme und Wasser beziehen sich auf die der Erzeugung von Elektrizität, Gas und Wärme und die Schöpfung von Wasser sowie auf die den Transport dieser Güter dienenden Einrichtungen (z. B. Umspannwerke und -stationen, Wärmeversorgungsleitungen).²⁵² Vom Privilegierungstatbestand nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB sind auch Anlagen zur geothermischen Wärme- und Stromerzeugung erfasst. Allerdings verlangt das Bundesverwaltungsgericht für alle unter § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB fallenden Vorhaben als zusätzliches Tatbestandsmerkmal, dass das konkrete Vorhaben **ortsgebunden** ist²⁵³, obwohl der Wortlaut der Vorschrift die Ortsgebundenheit nur bei der letzten Tatbestandsalternative „ortsgebundener gewerblicher Betrieb“ aufführt. Eine Ortsgebundenheit kommt dabei nur dann in Betracht, wenn das Vorhaben nach seinem Gegenstand und seinem Wesen ausschließlich an der fraglichen Stelle betrieben werden kann. Rentabilitätsgründe genügen hingegen nicht. Erforderlich ist vielmehr, dass der Betrieb auf die geografische oder die geologische Eigenart der bestimmten zur Bebauung vorgesehenen Stelle angewiesen ist (z. B. Anlagen zur Erdöl- und Erdgasgewinnung²⁵⁴), weil er an einem anderen Ort seinen Zweck verfehlen würde²⁵⁵. Nach dieser Rechtsprechung käme also eine Privilegierung geothermischer Anlagen nur in Betracht, wenn aus geologischen

²⁵⁰ *Oldiges*, in: Steiner, Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Aufl. 2006, III Rn. 223.

²⁵¹ BGBl. I 1996 S 1189.

²⁵² *Söfker*, in: Spannowsky/Uechtritz, BauGB-Kommentar 2009, § 35 Rn. 21.

²⁵³ BVerwGE 96, 95.

²⁵⁴ *Söfker*, in: Spannowsky/Uechtritz, BauGB-Kommentar 2009, § 35 Rn. 24.1.

²⁵⁵ BVerwGE 50, 346, 350 ff.

Gründen die Bohrung und die bauliche Anlage ausschließlich an der fraglichen Stelle errichtet und betrieben werden können. Gerade die modernen Möglichkeiten auch abgeschrägte Bohrungen niederzubringen könnten diese Argumentation für die Tiefengeothermie erschweren.

Die Tiefengeothermie-Unternehmen drängen daher seit geraumer Zeit auf eine rechtliche Gleichstellung.²⁵⁶ Auch das VG Karlsruhe hat im August 2013 hinsichtlich des Geothermiekraftwerks in Brühl die Frage der Ortsgebundenheit bejaht und entschieden, dass ein Geothermiekraftwerk, das Strom im sogenannten hydrothermalen Verfahren erzeugt, grundsätzlich im Außenbereich nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB privilegiert zulässig ist. In der Tat würde eine Gleichstellung der Geothermie mit der Wind- und Wasserenergie durch die Aufnahme eines speziellen Privilegierungstatbestandes unter Aufgabe des Erfordernisses der Ortsgebundenheit eine klarstellende Wirkung hinsichtlich des gesetzgeberischen Willens darstellen. Schlussendlich könnte eine solche rechtliche Gleichstellung dazu beitragen, auch das Verwaltungsverfahren zu vereinfachen (schnellere Genehmigungsverfahren, kürzere Planungs- und Bauzeiten), eine Forderung, die sich u. a. auch aus Art. 13 Abs. 1 der Erneuerbare-Energien-Richtlinie 2009/28/EG ableiten lässt.²⁵⁷

6.2.2.5.2.3 Entgegenstehen „öffentlicher Belange“

Die Zulässigkeit eines privilegierten Vorhabens nach § 35 Abs. 1 BauGB setzt voraus, dass dem Vorhaben öffentliche Belange **nicht entgegenstehen**. Entgegenstehen können hier unter anderem Darstellungen des Flächennutzungsplans, von dem Vorhaben zu erwartende schädliche Umwelteinflüsse und Belange des Naturschutzes.

6.2.2.5.2.4 Beeinträchtigung „öffentlicher Belange“

In den Fällen der sonstigen Vorhaben im Außenbereich nach § 35 Abs. 2 BauGB dürfen öffentliche Belange nicht nur nicht entgegenstehen, sondern sie dürfen durch das Vorhaben auch nicht beeinträchtigt werden. Hierdurch ergibt sich ein unterschiedliches

²⁵⁶ Siehe hierzu die Pressemitteilung des Wirtschaftsforums Geothermie (WFG) vom 02.09.2013, abrufbar unter http://www.wirtschaftsforum-geothermie.de/upload/pdf/PM_130902_Positionspapier_WFG_Die_Energiewende.pdf

²⁵⁷ Richtlinie 2009/28/EG vom 23. April 2009, Amtbl. L 140/16.

Gewicht, dem die von einem Vorhaben berührten öffentlichen Belange bei der Beurteilung der Zulässigkeit von Vorhaben nach Abs. 1 und Abs. 2 zukommen.

Bei der Abwägung, die zwischen den privaten Interessen des Bauwilligen und den öffentlichen Belangen vorzunehmen ist, ist der vom Gesetzgeber vorgenommenen Privilegierung der Vorhaben nach Abs. 1 entsprechendes Gewicht beizumessen.²⁵⁸ Bei der Abwägung zwischen dem beabsichtigten Vorhaben und den von ihm berührten öffentlichen Belangen ist in Rechnung zu stellen, dass der Gesetzgeber die Vorhaben nach Abs. 1 in planähnlicher Weise dem Außenbereich zugewiesen und ihnen damit Vorrang eingeräumt hat.²⁵⁹

6.2.2.5.2.5 Darstellungen des Flächennutzungsplans

Nach § 35 Abs. 3 Satz 1 Nr. 1 BauGB liegt eine Beeinträchtigung öffentlicher Belange vor, wenn das Vorhaben den Darstellungen des Flächennutzungsplans widerspricht. Relevant sind die Darstellungen des Flächennutzungsplans im Sinne des § 5 Abs. 2 BauGB sowie der BauNVO. Werden durch Darstellungen des Flächennutzungsplans bestimmte Standortzuweisungen getroffen, wie insbesondere Darstellungen von Flächen für bestimmte Vorhaben und Baugebiete, kommt ihnen eine die Zulässigkeit sonstiger Vorhaben grundsätzlich ausschließende Bedeutung zu.²⁶⁰ Darstellungen des Flächennutzungsplans für den Außenbereich müssen dabei eine im Wege der Bebauungsplanung nicht weiter konkretisierungsbedürftige Standortentscheidung enthalten.²⁶¹ Es können also nur solche Darstellungen in Flächennutzungsplänen einem privilegierten Vorhaben, z. B. einem nach § 35 Abs. 1 Nr. 3 BauGB privilegierten Vorhaben entgegenstehen, die eine hinreichend konkrete Standortaussage treffen und somit über die „generelle Planung“ in § 35 Abs. 1 BauGB hinausgehen.²⁶² Dies gilt nur dann, wenn die Darstellungen im Flächennutzungsplan eindeutig dem Vorhaben an diesem Standort widersprechen.²⁶³

6.2.2.5.2.6 Schädliche Umwelteinwirkungen

²⁵⁸ *Battis/Krautzberger/Löhr*, BauGB-Kommentar, 11. Auflage 2009, § 35 Rn. 6.

²⁵⁹ BVerwGE 28, 148, 151.

²⁶⁰ *Söfker*, in: Spannkowski/Uechtritz, BauGB-Kommentar 2009, § 35 Rn. 68.

²⁶¹ BVerwGE 124, 132.

²⁶² Siehe hierzu BVerwGE 68, 311 (315).

²⁶³ *Wagner*, UPR 1996, 370 (373).

Eine Beeinträchtigung öffentlicher Belange liegt gemäß § 35 Abs. 3 Satz 1 Nr. 3 BauGB auch dann vor, wenn das Vorhaben schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen kann oder ihnen ausgesetzt wird. Der Begriff der schädlichen Umwelteinwirkungen ist in § 3 BImSchG definiert, der hierfür herangezogen werden kann.²⁶⁴ Schädliche Umwelteinwirkungen sind danach alle Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass entsprechende Umwelteinwirkungen den Betroffenen nicht zumutbar sind.²⁶⁵ Die Zumutbarkeitsgrenze ist auf Grund einer umfassenden Würdigung aller Umstände des Einzelfalls und insbesondere der speziellen Schutzwürdigkeit des jeweiligen Baugebiets zu bestimmen.²⁶⁶ Anhaltspunkte für die Unzumutbarkeit sind die technischen Regelwerke des Immissionsschutzrechts (z. B. TA-Luft, TA-Lärm). Ob von einer geplanten geothermischen Anlage entsprechende Immissionen zu erwarten sind, ist im Einzelfall zu prüfen.

6.2.2.5.2.7 Beeinträchtigung der Belange des Naturschutzes, der Landschaftspflege, des Bodenschutzes, des Denkmalschutzes, der Eigenart der Landschaft oder des Orts- und Landschaftsbildes

Öffentliche Belange stehen einem privilegierten Außenbereichsvorhaben auch dann entgegen, wenn das Vorhaben Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege, des Bodenschutzes, des Denkmalschutzes oder die natürliche Eigenart der Landschaft und ihren Erholungswert beeinträchtigt oder das Orts- und Landschaftsbild verunstaltet (vgl. § 35 Abs. 3 Satz 1 Nr. 5 BauGB).

Belange des Naturschutzes und der Landschaftspflege sind [insbesondere] bei Vorhaben beeinträchtigt, die in den durch Naturschutz- oder Landschaftsschutzbestimmungen geschützten Gebieten oder Objekten liegen (Landschaftsrahmenpläne und Landschaftspläne).²⁶⁷ Darüber hinaus spielt das Kernstück des Naturschutzrechts, die auf Vorhaben bzw. Projekte zugeschnittene **naturschutzrechtliche Eingriffsregelung** der §§ 13 bis 18 BNatSchG, eine entscheidende Rolle. § 18 Abs. 2 Satz 1 BNatSchG

²⁶⁴ BVerwGE 52, 122.

²⁶⁵ BVerwGE 52, 122.

²⁶⁶ BVerwG, NJW 2003, 3360.

²⁶⁷ *Krautzberger*, in: *Battis/Krautzberger/Löhr*, BauGB, § 35 Rn. 58.

schließt die Anwendung der §§ 14 bis 17 BNatSchG auf Vorhaben in Gebieten mit Bebauungsplänen nach § 30 BauGB, während der Planaufstellung nach § 33 BauGB und im Innenbereich nach § 34 BauGB aus. Für Vorhaben im Außenbereich nach § 35 BauGB sowie für Bebauungspläne, soweit sie eine Planfeststellung ersetzen, bleibt die Geltung der §§ 14 bis 17 BNatSchG unberührt.

6.2.2.5.2.8 Gefährdung der Wasserwirtschaft

Nach § 35 Abs. 3 Satz 1 Nr. 6 BauGB darf das Vorhaben die Wasserwirtschaft nicht gefährden. Eine Gefährdung der Wasserwirtschaft kann vor allem durch die Abwasserbeseitigung, die Beseitigung von Abfall und Müll oder durch die Lagerung von Öl oder anderen Stoffen, die das Grundwasser verseuchen oder einen Wasserlauf verunreinigen können, hervorgerufen werden.²⁶⁸ Im Hinblick auf die Tatsache, dass es bei Geothermie-Vorhaben im Rahmen der Bohrungen zu Durchstößen grundwasserführender Bodenschichten kommen kann, erscheint eine Gefährdung der Wasserwirtschaft nicht von vornherein ausgeschlossen. Auch eine unsachgemäße Verwendung und Lagerung chemischer Stoffe innerhalb der Anlage könnte unter Umständen eine Gefährdung verursachen. Es sind also entsprechende Maßnahmen zu ergreifen und darzulegen, die einer solchen theoretischen Gefährdung entgegenwirken und diese ausschließen.

6.2.2.5.2.9 Geltung der Raumordnungsziele

Die Geltung der Raumordnungsziele für raumbedeutsame Vorhaben im Außenbereich wird in § 35 Abs. 3 Satz 2 BauGB ausdrücklich angeordnet. Nach § 35 Abs. 3 Satz 2 Hs. 1 BauGB dürfen raumbedeutsame Außenbereichsvorhaben – unabhängig von einer Privilegierung nach § 35 Abs. 1 BauGB – den Zielen der Raumordnung nicht widersprechen. Ziele der Raumordnung sind nicht lediglich öffentliche Belange, sondern strikt einzuhaltende rechtliche Voraussetzungen.²⁶⁹ Voraussetzung ist, dass die Ziele der Raumordnung im Hinblick auf das Vorhaben hinreichend konkretisiert, insbesondere eindeutig sachlich und räumlich festgelegt und für eine gerichtliche Nachprüfung zugänglich sind²⁷⁰ (z. B. Ausweisung als regionaler Grünzug in einem regionalen

²⁶⁸ *Krautzberger*, in: Battis/Krautzberger/Löhr, BauGB, § 35 Rn. 66.

²⁶⁹ Siehe oben unter 6.2.2.2.3.1.

²⁷⁰ BVerwGE 6, 342.

Raumordnungsplan²⁷¹). Da die Raumordnungsziele als strikte Vorgaben für die Genehmigungsentscheidung gelten, kommt beispielsweise die Zulassung einer zielwidrigen raumbedeutsamen Geothermieanlage durch die Fachbehörde nicht in Betracht. Ist danach an dem fraglichen Standort bereits eine andere Nutzung zielförmig ausgewiesen, und steht die Errichtung der Geothermieanlage zu dieser Nutzung im Widerspruch, so ist das Vorhaben gemäß § 35 Abs. 3 Satz 2 Hs. 1 BauGB nicht genehmigungsfähig.

§ 35 Abs. 3 Satz 2 Hs. 2 BauGB enthält eine Sonderregelung für raumbedeutsame privilegierte Vorhaben im Sinne des § 35 Abs. 1 BauGB. Ihnen können öffentliche Belange nicht entgegengehalten werden, soweit diese Belange bereits bei der Darstellung dieser Vorhaben als Ziele der Raumordnung abgewogen worden sind. Wurde zum Beispiel ein naturschutzrechtlicher Belang bereits im Rahmen der Aufstellung eines Vorranggebiets für Windenergienutzung gemäß § 8 Abs. 7 Nr. 1 ROG abschließend abgewogen und in der Abwägung zurückgestellt, so kann die Fachbehörde diesen Belang einer zur Genehmigung stehenden Windenergieanlage nicht mehr entgegenhalten.

6.2.2.5.2.10 Planvorbehalt

Gemäß § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB stehen öffentliche Belange einem Vorhaben nach § 35 Abs. 1 Nr. 2 bis 6 BauGB in der Regel auch dann entgegen, soweit hierfür durch Darstellungen im Flächennutzungsplan oder als Ziele der Raumordnung eine Ausweisung an anderer Stelle erfolgt ist (sog. „Planvorbehalt“). Die Vorschrift zielt darauf ab, durch positive Standortzuweisungen privilegierter Nutzungen an einer oder mehreren Stellen im Plangebiet den übrigen Planungsraum von den durch den Gesetzgeber privilegierten Anlagen freihalten zu können, und zwar für den Bereich der Gemeinde oder der Regionalplanung.²⁷² Der Planvorbehalt, der im Wege der Privilegierung der Windenergieanlagen im Außenbereich gemäß § 35 Abs. 1 Nr. 5 BauGB eingeführt wurde, gibt den Gemeinden als Träger der Flächennutzungsplanung und den Trägern der Raumordnungsplanung ein Steuerungsinstrument an die Hand, mit dem sie insbesondere die Ansiedlung von Windenergieanlagen in ihrem Plangebiet lenken können.²⁷³

²⁷¹ VGH Kassel, BRS 42 Nr. 92.

²⁷² *Krautzberger*, in: Battis/Krautzberger/Löhr, BauGB, § 35 Rn. 74.

²⁷³ BVerwGE 117, 287 (293 f.).

Die Gemeinde, die Bereiche ihres Gebiets zugunsten bestimmter Schutzgüter (z. B. Landschaftsschutz, Fremdenverkehr, Anwohnerschutz) von Windenergieanlagen freihalten will, muss mit dem Ziel der Steuerung über ein schlüssiges Planungskonzept („Gesamtkonzept“) verfügen²⁷⁴, in welchem sie einerseits durch Darstellungen in einem Flächennutzungsplan positiv geeignete Standorte festlegt (sog. „Konzentrationsflächen“), um damit andererseits ungeeignete Standorte im übrigen Planungsgebiet auszuschließen.²⁷⁵ Die Gemeinde ist allerdings gehindert, eine bloße, allein auf die Verhinderung bestimmter Nutzungen gerichtete Planung („Verhinderungsplanung“) zu betreiben.²⁷⁶ § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB ermöglicht es, die in § 35 Abs. 1 Nr. 2 bis 6 BauGB genannten Vorhaben auf bestimmte Standorte zu konzentrieren, nicht aber das gesamte Gemeindegebiet zu sperren. Daher darf eine Gemeinde § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB nicht als Mittel benutzen, um zum Beispiel unter dem Deckmantel der planerischen Steuerung von Windenergieanlagen diese in Wahrheit zu verhindern. Gleiches gilt für andere Arten von Anlagen, wie bspw. Geothermieanlagen.

Eine positive Konzentration privilegierter Nutzungen mit der Folge einer entsprechenden „Negativwirkung“ für sonstige Standorte, kann auch im Wege der Regionalplanung herbeigeführt werden. So können nach Maßgabe der jeweiligen Landesplanungsgesetze in den Regionalplanungen Eignungsgebiete im Sinne des § 8 Abs. 7 Nr. 3 ROG für die jeweils privilegierten Vorhaben dargestellt werden. Diese haben nach ihrer Begriffsbestimmung mit der Festlegung eines Gebietes für bestimmte raumbedeutsame Maßnahmen nach § 35 Abs. 1 BauGB zugleich zum Inhalt, dass solche Vorhaben an anderer Stelle im Planungsraum ausgeschlossen sind. Möglich ist auch die Festlegung von Vorranggebieten. Voraussetzung für die Steuerungswirkung ist auch hier, dass der Raumordnungsplanung eine ausreichende Darstellung von Positivflächen und ein gesamträumliches Planungskonzept zu Grunde liegen.²⁷⁷

6.2.2.5.3 Gemeindliches Einvernehmen (§ 36 BauGB)

Über die Zulässigkeit von Vorhaben nach den §§ 31, 33, 34 und 35 wird im bauaufsichtlichen Verfahren von der Baugenehmigungsbehörde im Einvernehmen mit der

²⁷⁴ BVerwGE 122, 109.

²⁷⁵ *Krautzberger*, in: Battis/Krautzberger/Löhr, BauGB, § 35 Rn. 75.

²⁷⁶ BVerwG, NVwZ 2008, 559.

²⁷⁷ BVerwGE 118, 1064.

Gemeinde entschieden (vgl. § 36 Abs. 1 Satz 1 BauGB). Die gemeindliche Mitwirkungsbefugnis dient dem Schutz der kommunalen Planungshoheit, die sich aus dem Selbstverwaltungsrecht der Gemeinden ergibt (Art. 28 Abs. 2 GG). Diese gibt den Gemeinden das Recht, ihre städtebauliche Entwicklung im gesetzlichen Rahmen eigenverantwortlich zu gestalten und zu planen.²⁷⁸ Bei Entscheidungen nach § 30 BauGB bedarf es des gemeindlichen Einvernehmens dagegen nicht, weil es mit dem qualifizierten Bebauungsplan eine abschließende und verbindliche Äußerung der Gemeinde über ihre Planung bereits gibt.²⁷⁹ Nach § 36 Abs. 1 Satz 2 BauGB ist die Gemeinde auch dann zu beteiligen, wenn über die Zulässigkeit eines Vorhabens nach den §§ 31, 33, 34 und 35 BauGB in einem anderen Verfahren entschieden wird (z. B. in immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren nach §§ 4 ff. BImSchG). Dies gilt nicht für Vorhaben der in § 29 Abs. 1 BauGB bezeichneten Art, die der Bergaufsicht unterliegen. Bei einer Anlage der Tiefengeothermie unterliegen der Bergaufsicht aber nur die Anlagenteile des Primärkreislaufs, in dem das Thermalwasser zirkuliert. Für die anderen Anlagenteile ergibt eine andere behördliche Zuständigkeit.²⁸⁰

Der Prüfungsumfang, den die Gemeinde im Rahmen ihrer Entscheidung über die Erteilung des Einvernehmens zu beachten hat, ist in § 36 Abs. 2 Satz 1 BauGB geregelt. Hiernach darf die Gemeinde das Einvernehmen grundsätzlich nur aus den sich aus den §§ 31, 33, 34 und 35 BauGB ergebenden Gründen versagen. Der Umstand, dass das konkrete Vorhaben möglicherweise den planerischen Vorstellungen der Gemeinde nicht entspricht, darf im Rahmen der Prüfung hingegen keine Berücksichtigung finden.²⁸¹ Ohne das Einvernehmen der Gemeinde kann die Baugenehmigungsbehörde das Vorhaben auch dann nicht genehmigen, wenn das Einvernehmen der Gemeinde rechtswidrig versagt wird.²⁸² Allerdings kann in der unberechtigten Verweigerung des Einvernehmens eine Verletzung der der Gemeinde gegenüber dem Bauwilligen obliegenden Amtspflichten liegen.²⁸³ Das Einvernehmen der Gemeinde gilt als erteilt, wenn es nicht binnen zwei Monaten nach Eingang des Ersuchens der Genehmigungsbehörde verweigert wird (vgl. § 36 Abs. 2 Satz 2 BauGB). Nach § 36 Abs. 2 Satz 3 BauGB kann die nach Landesrecht zuständige Behörde ein rechtswidrig versagtes Einvernehmen der Gemeinde ersetzen. Bei dieser Vorschrift handelt es sich trotz des Wortlauts

²⁷⁸ Vgl. BVerwG, NVwZ 2000, 1048 (1049).

²⁷⁹ Vgl. *Dippel*, NVwZ 2011, 769 (769).

²⁸⁰ Siehe hierzu insbesondere Punkt 6.2.3.

²⁸¹ Vgl. *Brohm*, Öffentliches Baurecht, 3. Aufl. 2002, § 18 Rn. 11.

²⁸² Vgl. BVerwG, NJW 1966, 513.

²⁸³ BGH, NJW 1980, 387.

„kann ... ersetzen“ nicht um eine Ermessensvorschrift sondern um eine Befugnisnorm²⁸⁴, d. h. der nach Landesrecht zuständigen Behörde wird damit die Ermächtigungsgrundlage zum Eingriff in das Selbstverwaltungsrecht der Gemeinden gegeben. Welches Organ der Gemeinde zur Erteilung der Einvernehmensklärung zuständig ist, ergibt sich aus dem Gemeinderecht des jeweiligen Landes.

6.2.2.6 Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung (SUP)

6.2.2.6.1 Allgemeines

Das Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) schreibt für eine Reihe von Plänen und Programmen die Durchführung einer Strategischen Umweltverträglichkeitsprüfung (SUP) vor. Die SUP ist nach § 2 Abs. 4 Satz 1 UVPG **unselbständiger Teil behördlicher (Träger-)Verfahren zur Aufstellung oder Änderung von Plänen oder Programmen**, die von einer Behörde, einer Regierung oder im Wege eines Gesetzgebungsverfahrens angenommen werden. Die SUP umfasst gemäß § 2 Abs. 4 Satz 1 i. V. m. § 2 Abs. 1 Satz 2 UVPG die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen der Plan- bzw. Programmdurchführung auf die Umweltgüter und ihre Wechselwirkungen. Sie wird gemäß § 2 Abs. 4 Satz 1 i. V. m. § 2 Abs. 1 Satz 3 UVPG unter Einbeziehung der Öffentlichkeit durchgeführt.

Pläne und Programme im Sinne des UVPG sind **bundesrechtlich oder durch Rechtsakte der Europäischen Union vorgesehene Pläne und Programme**, zu deren Ausarbeitung, Annahme oder Änderung eine Behörde durch Rechts- oder Verwaltungsvorschriften verpflichtet ist (§ 2 Abs. 5 Satz 1 UVPG). Ausgeschlossen sind danach zunächst alle Pläne und Programme, deren Aufstellung rechtlich nicht vorgesehen ist. Insbesondere Pläne und Programme, die ausschließlich politischen Charakter haben, werden nicht erfasst.²⁸⁵ Für Pläne und Programme, die ausschließlich aufgrund landesrechtlicher Regelungen zu erstellen sind, finden die SUP-Vorschriften des UVPG keine (unmittelbare) Anwendung. Bei diesen Plänen und Programmen obliegt die Regelung der strategischen Umweltprüfung allein den Ländern.

²⁸⁴ *Dippel*, NVwZ 2011, 769 (774).

²⁸⁵ *Appold* in Hoppe/Beckmann, Kommentar zum UVPG, § 2 Rn 105.

6.2.2.6.2 Obligatorische und konditionale SUP

Für bestimmte Pläne und Programme, die in einer Anlage abschließend aufgeführt sind, besteht eine Verpflichtung zur Prüfung (obligatorische SUP), wenn die Tatbestandsmerkmale erfüllt sind (§ 14b Abs. 1 UVPG i. V. m. Anlage 3 „Liste SUP-pflichtiger Pläne und Programme“). Zwingend SUP-pflichtig sind ferner Pläne und Programme, die einer Verträglichkeitsprüfung nach § 36 Satz 1 Nr. 2 BNatSchG unterliegen (§ 14c UVPG). Bei anderen Plänen und Programmen wird die Notwendigkeit einer SUP vom Ergebnis einer Vorprüfung des Einzelfalls (konditionale SUP) abhängig gemacht (§ 14 Abs. 2 und § 14d Satz 1 UVPG).²⁸⁶ Die zuständige Behörde wird verpflichtet, frühzeitig festzustellen, ob eine Pflicht zur Durchführung einer SUP besteht (§ 14a UVPG).

Eine obligatorische SUP nach § 14b Absatz 1 Nr. 1 i. V. m. Anlage 3 UVPG ergibt sich danach u. a. für

- Raumordnungsplanungen nach § 8 ROG und
- Bauleitplanungen nach den §§ 6 und 10 BauGB.

6.2.2.6.3 Verfahrensschritte der SUP

Die Voraussetzungen und Verfahrensschritte der SUP sind in den §§ 14a bis 14n UVPG geregelt:

- Nach § 14a Abs. 1 UVPG hat die zuständige Behörde frühzeitig festzustellen, ob für den jeweiligen Plan oder das jeweilige Programm eine Verpflichtung zur Durchführung einer SUP besteht. Für eine Reihe von Plänen und Programmen schreibt § 14b Abs. 1 UVPG i. V. m. der Anlage 3 des UVPG ausdrücklich die zwingende Durchführung einer SUP vor (z. B. für Raumordnungspläne nach § 8 ROG sowie für Flächennutzungs- und Bebauungspläne nach § 5 bzw. § 8 BauGB). Bei allen anderen Plänen und Programmen ist die SUP-Pflicht im Wege einer Einzelfallprüfung festzustellen (vgl. § 14b Abs. 2 UVPG). Im Rahmen dieser Prüfung ist entscheidend, ob die konkreten Pläne oder Programme voraussichtlich erhebliche Umweltauswirkungen haben werden.

²⁸⁶ Appold in Hoppe/Beckmann, Kommentar zum UVPG, § 2 Rn 99.

- Ist die SUP-Pflicht geklärt, hat die für die SUP zuständige Behörde gemäß § 14f Abs. 1 UVPG den Untersuchungsrahmen der SUP einschließlich des Umfangs und Detaillierungsgrads der in den Umweltbericht nach § 14g UVPG aufzunehmenden Angaben festzulegen.
- § 14g Abs. 1 UVPG verpflichtet die zuständige Behörde zur Erstellung eines Umweltberichts, in dem die voraussichtlichen erheblichen Umweltauswirkungen der Durchführung des Plans oder Programms sowie vernünftige Alternativen ermittelt, beschrieben und bewertet werden. § 14g Abs. 2 Nr. 1 bis 9 UVPG nennt eine Vielzahl umweltrelevanter Angaben, die der anzufertigende Bericht zwingend zu enthalten hat.
- § 14h UVPG sieht die Beteiligung von Behörden vor, deren umwelt- und gesundheitsbezogener Aufgabenbereich durch den Plan oder das Programm berührt wird. Die zuständige Behörde hat ihnen den Entwurf des Plans oder Programms sowie den Umweltbericht zu übermitteln und ihre Stellungnahme einzuholen.
- Ausländische Behörden sind nach § 14j Abs. 1 i. V. m. § 8 UVPG ebenfalls zu beteiligen.
- § 14j Abs. 3 i. V. m. § 9b Abs. 1 UVPG trifft ferner eine Regelung über die Beteiligung deutscher Behörden an ausländischen Umweltprüfungen.
- Nach § 14i Abs. 1 UVPG i. V. m. § 9 Abs. 1 bis 1b UVPG bzw. § 14j Abs. 2 UVPG i. V. m. § 9a UVPG hat die zuständige Behörde die inländische und ausländische betroffene Öffentlichkeit zu den Umweltauswirkungen des Vorhabens zu beteiligen. Dies erfolgt insbesondere durch die öffentliche Auslegung des Plan- bzw. Programmentwurfs sowie durch Auslegung des Umweltberichts.
- § 14j Abs. 3 i. V. m. § 9b Abs. 2 UVPG trifft im Weiteren eine Regelung zur Beteiligung der deutschen Öffentlichkeit an ausländischen Umweltprüfungen.
- Nach § 14k Abs. 1 UVPG sind die Darstellungen und Bewertungen des Umweltberichts sowie die bei der Behörden- und Öffentlichkeitsbeteiligung abgegebenen Stellungnahmen durch die zuständige Behörde abschließend zu bewerten. Das Ergebnis dieser Überprüfung ist gemäß § 14k Abs. 2 UVPG im Verfahren zur Aufstellung oder Änderung des Plans oder Programms zu berücksichtigen.

- Gemäß § 14l Abs. 1 UVPG ist die Annahme eines Plans oder eines Programms öffentlich bekannt zu machen. Die öffentliche Bekanntmachung der Ablehnung eines Plans oder Programms ist hingegen nicht zwingend.
- § 14m UVPG schreibt schließlich eine Überwachung der durch die Ausführung des jeweiligen Plans oder Programms eintretenden erheblichen Umweltauswirkungen vor, um Abhilfemaßnahmen zu ergreifen.

6.2.2.7 Zusammenfassung

Das Recht der Raumplanung befindet sich in einem Übergangsbereich, in dem vorhandene Steuerungspotentiale noch nicht umfänglich ausgeschöpft werden. Es liegt an den legislativ wie auch exekutiv Verantwortlichen, die Instrumente der Raumplanung sachgerecht in Stellung zu bringen und die schon bislang eröffneten Potentiale in Zukunft noch stärker zu nutzen.²⁸⁷ Sowohl die Raumordnung als auch die Bauleitplanung stellen taugliche Mittel der Flächensicherung zum Zwecke der Nutzung erneuerbarer Energien dar. Nach der gegenwärtigen Gesetzeslage stehen den Trägern der Raumplanung vielfältige Möglichkeiten zur Verfügung, Flächen und Standorte für die genannten Zwecke zu sichern. Um die gebotene Abgrenzung zum Fachplanungsrecht zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die Raumordnung zur Steuerung überörtlicher Raumnutzungskonflikte eingesetzt wird. Diese mögen aktuell noch weitestgehend theoretisch sein, könnten sich in der Zukunft bei einer zu erwartenden größeren Inanspruchnahme des unterirdischen Raums aber zunehmend als bedeutsam erweisen. Zu beachten ist außerdem, dass das Darstellungsprivileg nach § 35 Abs. 3 Satz 3 BauGB²⁸⁸ als Hauptinstrument der planerischen Steuerung eine begrenzende Wirkung hat und insoweit nur maßvoll zur Herbeiführung einer Ausschlusswirkung eingesetzt werden sollte.

Die föderale, regionale und kommunale Vielfalt von Steuerungsansätzen darf letztlich auch nicht zu einer Planungsunsicherheit im Bereich des Ausbaus der Tiefengeothermie führen.

²⁸⁷ Siehe hierzu u. a. auch *Kment*, Raumplanung unter Ungewissheit, ZUR 2011, 127, 133 m. w. N.

²⁸⁸ Danach stehen öffentliche Belange einem privilegierten Vorhaben nach § 35 Absatz 1 Nr. 2 bis 6 BauGB in der Regel auch dann entgegen, soweit hierfür durch Darstellungen im Flächennutzungsplan oder als Ziele der Raumordnung eine Ausweisung an anderer Stelle erfolgt ist.

6.2.3 Allgemeines zum Genehmigungsverfahren für die Errichtung und den Betrieb von Anlagen zur Nutzung der Tiefengeothermie

Während das Planungsrecht die Grundlagen für die Planung einer Anlage der Tiefengeothermie auf überörtlicher (Raumordnung, Landesplanung) oder kommunaler (Bauleitplanung) Ebene schafft, regelt das Anlagenzulassungsrecht die Errichtung und den Betrieb einer Anlage an einem konkreten Standort.

6.2.3.1 Genehmigungsverfahren

Das in mehrere Fachgesetze und unterschiedliche behördliche Zuständigkeiten aufgegliederte Genehmigungsverfahren zur Errichtung und zum Betrieb einer Geothermieanlage ist komplex, weil darin sämtliche Umweltauswirkungen der Anlage berücksichtigt und gewürdigt werden müssen. Der überwiegende Teil des aufgegliederten Genehmigungsverfahrens, welcher die unterirdischen Arbeiten und Anlagenteile sowie die hiermit verbundenen oberirdischen Anlagenteile des **Primärkreislaufs** betrifft, entfällt auf das Bergrecht²⁸⁹ und das Wasserrecht²⁹⁰.

Sieht ein **bergrechtlicher Betriebsplan** die Benutzung von Gewässern vor, so entscheidet die Bergbehörde *im Einvernehmen* mit der zuständigen Wasserbehörde über die Erteilung der Erlaubnis (§ 19 Abs. 2 und 3 WHG). So ist sichergestellt, dass die behördliche Entscheidung über die **wasserrechtliche Erlaubnis** inhaltlich nicht im Widerspruch zum Verfahren nach Bergrecht steht. Auf die Erteilung der beantragten Bergbauberechtigung und Zulassung der jeweiligen Betriebspläne besteht ein Rechtsanspruch, sofern keine der aufgeführten Versagungsgründe vorliegen bzw. die gesetzlich abschließend aufgezählten Zulassungsvoraussetzungen erfüllt sind.

Die Erteilung der wasserrechtlichen Erlaubnis steht hingegen im pflichtgemäßen Ermessen (Bewirtschaftungsermessen) der zuständigen Behörde. Sie ist zu versagen, wenn schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind oder andere Anforderungen nach öffentlich-rechtlichen Vorschriften nicht erfüllt werden.

²⁸⁹ Siehe hierzu Kapitel 6.2.5.

²⁹⁰ Siehe hierzu Kapitel 6.2.7.

Die oberirdischen Anlagenteile des **Sekundärkreislaufs** zur Stromerzeugung unterliegen hingegen nicht dem Bergrecht, sondern dem **Immissionsschutzrecht**²⁹¹ und **Baurecht**. Immissionsschutzrechtlich sind Anlagen des Bergwesens grundsätzlich nur genehmigungsbedürftig, wenn sie gemäß § 4 Abs. 2 Satz 1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) über Tage errichtet und betrieben werden. Die über Tage liegenden Teile geothermischer Anlagen sind jedoch nicht explizit als spezieller Anlagentyp im Anhang der 4. Bundesimmissionsschutzverordnung (4. BImSchV, Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) aufgeführt und deshalb nicht per se genehmigungsbedürftige Anlagen i. S. d. § 4 Abs. 1 Satz 3 BImSchG.

Somit stellt sich die Frage, inwieweit für die immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit der ORC-Prozess- sowie der Kalina-Anlagen die stoffliche Einstufung der eingesetzten Arbeitsmittel sowie deren Funktion in der Anlage entscheidend ist. In Betracht käme eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit der oberirdischen Anlage (Sekundärkreislauf, Kraftwerksteil), wenn diese unter die Kategorie 9 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (Lagerung, Be- und Entladen von Stoffen und Gemischen) fällt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Verordnung konstitutiv wirkt. In der Verordnung nicht aufgeführte Anlagen sind nicht [immissionsschutzrechtlich] genehmigungsbedürftig, auch wenn sie zu erheblichen Umweltbeeinträchtigungen führen.²⁹² Der Kreis der im Anhang 1 zur 4. BImSchV aufgeführten Anlagen ist weit gesteckt. Trotz des weiten Anwendungsbereichs des Anhangs 1 zur 4. BImSchV gibt es aber immer wieder Anlagen mit großen Emissionen, die nicht erfasst werden. Dann ist *de lege ferenda* seitens des Gesetzgebers zu überlegen, die Kriterien für die immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit zu verändern oder einen neuen Anlagentyp in den Anhang 1 der 4. BImSchV aufzunehmen.

Die im Anhang zur 4. BImSchV verwendeten, die Genehmigungsbedürftigkeit konstituierenden Begriffe dürfen einerseits nicht zu eng verstanden werden; andererseits ist die Verordnung abschließend, weshalb eine **Analogie nicht möglich** ist.²⁹³ Entscheidend ist, ob eine Anlage ihrer Zweckbestimmung und technischen Natur nach unter eine der in der 4. BImSchV genannten Anlagentypen fällt. Bleiben Zweifel, kommt es darauf an, ob die betreffende Anlagenart typischerweise mit den für die fragliche Anlagenart bedeutsamen Umweltgefährdungen verbunden ist. Stellt die fragliche Bestim-

²⁹¹ Siehe hierzu Kapitel 6.2.8.

²⁹² Vgl. Jarass, BImSchG, § 4 Rn. 16 ff.

²⁹³ So Jarass, BImSchG, § 4 Rn. 20 m. w. N..

mung im Anhang der 4. BImSchV, wie das meist geschieht, auf einen bestimmten Zweck ab, muss dieser bestimmungsgemäß und für eine gewisse Dauer verfolgt werden.²⁹⁴

Lagerung ist der zentrale Begriff der Nummer 9. Er wird in § 3 BImSchG aber nicht definiert. Im Schrifttum wird unter Lagerung die Aufbewahrung von Stoffen zwecks späterer Verwendung verstanden.²⁹⁵ Lagern findet insofern, seinem Wesen entsprechend, vorübergehend statt. Nach Artikel 3 Nr. 8 der Richtlinie 96/82/EG (Seveso-II-Richtlinie), die national in die 12. BImSchV, die Störfall-Verordnung, umgesetzt wurde ist „Lagerung“ das Vorhandensein einer Menge gefährlicher Stoffe zum Zweck der Einlagerung, der Hinterlegung zur sicheren Aufbewahrung oder der Lagerhaltung. Nach § 2 Abs. 6 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) ist Lagern das „Aufbewahren zur späteren Verwendung sowie zur Abgabe an andere“.²⁹⁶

Die Frage, ob das Vorhalten des Betriebsmittels im Sekundärkreislauf wirklich unter den Begriff der Lagerung fällt, kann damit nicht eindeutig beantwortet werden.

Sofern man aber davon ausgeht, dass der oberirdische Anlagenteil des Sekundärkreislaufs mit dem Kraftwerkteil seiner Zweckbestimmung und technischen Natur zu den in der 4. BImSchV unter Nummer 9 genannten Anlagentypen zählt, dann würde die Überschreitung der dort genannten Mengenschwellen, eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungspflicht auslösen.

Die Arbeitsmittel Isobutan und Propan fallen unter die Nr. 9.1.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (Lagerung, Be- und Entladen von Stoffen und Gemischen). Die Mengenschwellen für Isobutan und Propan liegen für die Durchführung des vereinfachten Verfahrens ohne Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 19 BImSchG zwischen 3 t bis weniger als 30 t. Darüber hinaus ist ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 10 BImSchG durchzuführen. Dasselbe gilt für Ammoniak, der als Stoff in der Stoffliste des Anhangs 2 zur 4. BImSchV aufgeführt ist und somit unter die Nr. 9.3.1 bzw. Nr. 9.3.2 des Anhang 1 fällt. Zu beachten ist jedoch, dass bei Kalina-Anlagen ein Ammoniak-Wassergemisch als Betriebsmittel zum Einsatz kommt, so dass hier auch das Mischungsverhältnis eine weitere Rolle spielt. Isopentan würde als Arbeitsmittel

²⁹⁴ Jarass, BImSchG, § 4 Rn. 20 m. w. N..

²⁹⁵ Vgl. Schulte/Michalk in BeckOK BImSchG § 3 Rn. 82; Jarass, BImSchG, § 3 Rn. 76.

²⁹⁶ Feldhaus, BImSchG, B 2.4.4 Kommentierung und Erläuterung zur 4. BImSchV, Anhang 1 Nr. 9 Rn. 17.

unter die Nr. 9.2.2 fallen, wobei die untere Mengenschwelle von 5.000 t für ORC-Anlagen nicht erreicht werden wird.

Falls – was wohl in der Praxis regelmäßig anzunehmen ist – die Mengenschwellen hinsichtlich der verwendeten Betriebsmittel nicht überschritten werden, müssen bei geothermischen Anlagen – wie bei anderen immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen – lediglich die **Maßgaben der §§ 22 ff. BImSchG** beachtet werden.

Diese sind im bauordnungsrechtlichen Genehmigungsverfahren nach der jeweiligen LBauO zu beachten. Hinsichtlich der mehrmonatigen Tiefbohrungen und des Kraftwerksbetriebs sind die Einhaltung der TA Lärm²⁹⁷ bzw. der Richtlinien für Baulärm (AVV Baulärm)²⁹⁸ zu sichern. Die Anwendung der verschiedenen Regelungen ist derzeit strittig. Jedenfalls hat der Antragsteller der Bergbehörde im Rahmen der Hauptbetriebsplan-Unterlagen in einer Immissionsprognose nachzuweisen, dass die entsprechenden Immissionsrichtwerte eingehalten werden können.

Auch die Vorschriften des Zweiten und Vierten Teils der Störfall-Verordnung²⁹⁹ können unter Umständen bei größeren Anlagen gelten. Mit Ausnahme der §§ 9 bis 12 Störfall-Verordnung gelten diese für Betriebsbereiche, in denen gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Anhang I Spalte 4 der Störfall-Verordnung genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten. Für Betriebsbereiche, in denen gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Anhang I Spalte 5 genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten, gelten außerdem die Vorschriften der §§ 9 bis 12 der Störfall-Verordnung. Bei großen Anlagen mit z. B. mehr als 10 t hochentzündli-

²⁹⁷ Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, kurz TA Lärm, wurde als sechste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erlassen und hat ihre rechtliche Grundlage in § 48 BImSchG. In ihr werden die gesetzlichen Anforderungen im Bereich des Immissionsschutzes zum Thema Lärm konkretisiert. Allgemeine Verwaltungsvorschriften dienen dazu, eine einheitliche Rechtsanwendung der Behörden zu gewährleisten und wenden sich daher unmittelbar nur an die zuständigen Behörden, nicht jedoch an den ebenfalls betroffenen Bürger. Da die Behörde zur Anwendung der Verwaltungsvorschriften verpflichtet ist, haben diese jedoch auch für die Bürger regelmäßige rechtliche Bedeutung.

²⁹⁸ Ob bei dem Betrieb einer Baustelle schädliche Umwelteinwirkungen bei den Anwohnerinnen und Anwohnern entstehen, wird nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm - Geräuschimmissionen (AVV Baulärm) beurteilt. Die AVV Baulärm enthält neben Immissionsrichtwerten das Verfahren zur Ermittlung des Beurteilungspegels.

²⁹⁹ Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung - 12. BImSchV).

chem Stoff³⁰⁰ als Arbeitsfluid (z. B. Isopenthan) besteht insofern die Notwendigkeit eines Störfallkonzeptes (§ 8) und der Anzeigepflicht (§ 7) nach der Störfall-Verordnung. Nach § 1 Abs. 2 der Störfall-Verordnung kann die zuständige Behörde im Einzelfall dem Betreiber eines Betriebsbereichs, soweit es zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung ihrer Auswirkungen erforderlich ist, Pflichten nach den §§ 9 bis 12 auch dann auferlegen, wenn die in dem Betriebsbereich vorhandenen gefährlichen Stoffe die in Anhang I Spalte 5 genannten Mengenschwellen nicht erreichen.

Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen wie z. B. dem Arbeitsfluid im ORC-/ Kalina-Kreislauf eines entsprechenden Kraftwerkes müssen nach § 62 WHG so beschaffen sein und so errichtet, unterhalten, betrieben und stillgelegt werden, dass eine nachteilige Veränderung der Eigenschaften von Gewässern nicht zu besorgen ist.³⁰¹ Sie unterliegen wasserrechtlicher Eignungsfeststellung bzw. Bauartzulassung nach § 63 WHG.

Schließlich sind auch weitere Vorschriften des Anlagensicherheitsrechts und des **Energierrechts** zu beachten.³⁰² Wenn eine Anlage der Tiefengeothermie nicht nur zur Fernwärme- sondern auch Stromproduktion dient, handelt es sich um eine Energieanlage i. S. d. § 3 Nr. 15 EnWG („*Energieanlagen – Anlagen zur Erzeugung, Speicherung, Fortleitung oder Abgabe von Energie, soweit sie nicht lediglich der Übertragung von Signalen dienen, dies schließt die Verteileranlagen der Letztverbraucher sowie bei der Gasversorgung auch die letzte Absperrereinrichtung vor der Verbrauchsanlage ein*“). Nach § 49 Abs. 1 EnWG sind Energieanlagen so zu errichten und betreiben, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist. Dabei sind vorbehaltlich sonstiger Rechtsvorschriften die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten. Gemäß § 49 Abs. 2 EnWG wird die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik vermutet, wenn bei Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung und Abgabe von Elektrizität die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. eingehalten worden sind. Durch § 49 Abs. 4 EnWG wird das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie zum Erlass von Rechtsverordnungen betreffend die technische Sicherheit sowie die technische und betriebliche Flexibilität von Energieanlagen ermächtigt.

³⁰⁰ Siehe Anhang I Spalte 4 Nr. 8 der 12. BImSchV.

³⁰¹ Siehe hierzu Kapitel 6.2.7.4.

³⁰² Siehe hierzu Kapitel 6.2.9.

Ebenso komplex wie die oben dargestellte immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit der übertägigen Anlagenteile ist die Frage, ob es sich bei der Anlage um eine nach dem Produktsicherheitsgesetz überwachungsbedürftige Anlage handelt, auf die das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG) und die auf Grundlage des Produktsicherheitsgesetzes ergangenen Verordnungen, wie etwa die Betriebssicherheitsverordnung oder die Druckgeräteverordnung, Anwendung finden.

Von vornherein vom Anwendungsbereich des Produktsicherheitsgesetzes ausgeschlossen sind nach § 1 Abs. 2 Nr. 3 ProdSG die untertägigen Anlagen der Unternehmen des Bergwesens.

Gemäß § 2 Nr. 30 ProdSG sind überwachungsbedürftige Anlagen unter anderem

- Gemäß § 2 Nr. 30 a) ProdSG Dampfkesselanlagen mit Ausnahme von Dampfkesselanlagen auf Seeschiffen,
- gemäß § 2 Nr. 30 b) ProdSG Druckbehälteranlagen außer Dampfkesseln,
- gemäß § 2 Nr. 30 c) ProdSG Anlagen zur Abfüllung von verdichteten, verflüssigten oder unter Druck gelösten Gasen,
- gemäß § 2 Nr. 30 d) ProdSG Leitungen unter innerem Überdruck für brennbare, ätzende oder giftige Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten,
- gemäß § 2 Nr. 30 f) ProdSG Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen und
- gemäß § 2 Nr. 30 i) ProdSG Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung von brennbaren Flüssigkeiten.

Zu beachten ist, dass zu den unter b), c) und d) bezeichneten überwachungsbedürftigen Anlagen nicht die Energieanlagen im Sinne des EnWG gehören. Insofern stellt sich die Frage nach der Abgrenzung der Regelung der technischen Anforderungen und behördlichen Zuständigkeiten für Energieanlagen zu anderen Rechtsmaterien, hier den Regelungen für überwachungsbedürftige Anlagen, wenn eine Anlage der Tiefengeothermie bspw. auch als Dampfkesselanlage i. S. v. § 2 Nr. 30 a) ProdSG, als Anlage in einem explosionsgefährdeten Bereich i. S. v. § 2 Nr. 30 f) ProdSG oder als eine Anlage zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung von brennbaren Flüssigkeiten i. S. v. § 2 Nr. 30 i) ProdSG eingestuft werden kann, auf welche sich die Einschränkung des § 2 Nr. 30 Satz 2, 2. Teilsatz ProdSG dem Wortlaut nach nicht erstreckt. In der Praxis

könnten sich hieraus mitunter Abgrenzungsschwierigkeiten ergeben. In der rechtswissenschaftlichen Literatur wird von *van Rienen/Wasser*³⁰³ allerdings dahingehend argumentiert, dass bspw. „Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen“ dann keine überwachungsbedürftigen Anlagen im Sinne dieser Vorschrift sind, wenn sie den [in der Vorgängerregelung des § 2 Abs. 2a Gerätesicherheitsgesetz (GSG)] Nr. 2, 3 und 4 genannten Kriterien entsprechen. Denn dann sind sie Energieanlagen mit allen sich daraus für die sicherheitstechnischen Anforderungen und für die Aufsicht (Energieaufsicht) ergebenden Konsequenzen.

Das wesentliche inhaltliche Unterscheidungsmerkmal zwischen den rechtlichen Vorschriften für die technische Sicherheit der Energieanlagen i. S. v. § 3 Nr. 15 EnWG und dem Regelungssystem für die sog überwachungsbedürftigen Anlagen i. S. v. § 34 Abs. 1 ProdSG ist die der Energiewirtschaft vom Gesetzgeber zugebilligte weitgehende Eigenverantwortlichkeit für die technische Sicherheit.³⁰⁴ Speziell für die Besonderheiten dieser Energieanlagen haben die Gas- und die Strombranche die maßgeblichen technischen Anforderungen selbst entwickelt und zu in sich widerspruchsfreien Regelwerken des DVGW und des VDE zusammengefasst, die sie entsprechend der aktuellen technischen Entwicklung und der in der Praxis damit gemachten Erfahrungen ständig weiter fortschreiben. Auf diese technischen Regelwerke der Branchen nimmt das EnWG ausdrücklich Bezug, in dem es in § 49 Abs. 2 eine ausdrückliche gesetzliche Vermutung aufstellt, dass bei ihrer Beachtung zugleich von der Erfüllung der Verpflichtung zur Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik nach Abs. 1 auszugehen ist.

Da eine Anlage der Tiefengeothermie, die neben der Bereitstellung von Fernwärme auch zur Erzeugung von Strom dient, Energieanlage i. S. d. § 3 Nr. 15 EnWG ist, gleichzeitig aber die jeweiligen Anlagen immer noch einen „Pilotanlagencharakter“ haben, sind fachspezifische Regelwerke im Bereich der Tiefengeothermie bei Weitem noch nicht so umfangreich, wie in anderen Bereichen der Energiewirtschaft. Hier gilt es, sinnvolle und praxismgerechte Lösungen zu finden. In der Praxis wird die Eigenschaft als Energieanlage wohl übergegangen und das Regelungssystem des ProdSG samt darauf basierender Verordnungen angewendet. Dies wäre im Übrigen auch der Fall, sofern die Anlage der Tiefengeothermie keinen Strom produzieren würde und dann keine

³⁰³ *Von Rienen/Wasser* in Danner/Theobald, Energierecht, Kapitel 180 – Technische Sicherheit, Rn. 35.

³⁰⁴ *Von Rienen/Wasser* in Danner/Theobald, Energierecht, Kapitel 180 – Technische Sicherheit, Rn. 28.

Energieanlage i. S. d. EnWG wäre. Schließlich spricht nach diesseitiger Ansicht auch die Formulierung des § 49 Abs. 1 Satz 2 EnWG („*Dabei sind vorbehaltlich sonstiger Rechtsvorschriften die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten.*“) für diese Herangehensweise.

6.2.3.2 Anlagenbetrieb und behördliche Aufsicht

Nach Erteilung der Zulassungs-/Genehmigungsentscheidung üben die zuständigen Behörden die (fachrechtliche) Aufsicht über den Anlagenbetrieb aus. Die Aufgaben und Befugnisse der Bergbehörden sind dabei insbesondere in den §§ 69 ff. BBergG („Bergaufsicht“), die Aufgaben der Wasserbehörden insbesondere in den §§ 100 ff. WHG geregelt. Neben den fachgesetzlichen Befugnissen kommen auch allgemeine verwaltungsrechtliche sowie polizei- und ordnungsrechtliche Bestimmungen als Ermächtigungsgrundlage in Betracht, sofern die jeweiligen fachgesetzlichen Regelungen nicht abschließend sind (wie z. B. bei § 71 BBergG der Fall³⁰⁵). Relevant ist mitunter auch die Möglichkeit, unter den jeweiligen fachlichen/tatbestandlichen Voraussetzungen nachträgliche Auflagen zu erlassen. Korrespondierend zu den aufsichtsbehördlichen Befugnissen treffen den Bergbauunternehmer entsprechende Vorsorge- und Sorgfaltspflichten (z. B. nach § 61 BBergG), d. h. für einen ordnungsgemäßen Betriebsablauf zu sorgen und Maßnahmen zur Gefahrenabwehr zu treffen.

Die jeweiligen Fachgesetze bieten der Verwaltung grundsätzlich eine breit gefächerte Auswahl an Instrumenten zur Durchsetzung der Grundpflichten des Betreibers und damit zur Gewährleistung der Sicherheit der Anlagen in Bezug auf die menschliche Gesundheit, Sachgüter und die Umwelt.

Obschon die jeweiligen Fachgesetze einen differenzierten Katalog an Durchsetzungsinstrumenten kennen, erscheint dennoch die Gefahr eines sogenannten Vollzugsdefizits nicht ausgeschlossen. Damit ist gemeint, dass möglicherweise identifizierbare (kleinere) Abweichungen von Vorgaben trotz weitgehender behördlicher Befugnisse ungeahndet bleiben könnten. Zum einen ist auf die begrenzten (personellen) Kapazitäten der Überwachungsbehörden hinzuweisen, die sich einer großen Zahl an Aufgaben gegenübersehen. Zum anderen sei das Problem der fehlenden finanziellen Mittel von

³⁰⁵ Vgl. *Pienschulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 71 Rn. 14 ff.

Anlagenbetreibern genannt, das dazu führen könnte, dass möglicherweise nicht jede zeit- und kostenintensive Anforderung unmittelbar vollzogen wird. Allerdings sind dies abstrakte Erwägungen, die sich als solches nicht ohne weiteres im Laufe der Projektarbeit gezeigt haben.³⁰⁶

6.2.4 Exkurs: Verhältnis untergesetzlicher Normen/Regelwerke zu unbestimmten Rechtsbegriffen

6.2.4.1 Die Rechtsnatur und Bedeutung unbestimmter Rechtsbegriffe und untergesetzlicher Normen im Umweltrecht

Im Rahmen von genehmigungsrechtlichen Tatbeständen, insbesondere auch in solchen aus den Gebieten des Anlagenzulassungsrechts, des Energierechts und des Umweltrechts stößt man häufig auf allgemeine Formulierungen („unbestimmte Rechtsbegriffe“), die der Ausfüllung bedürfen, um den Regelungsgehalt der Norm bestimmen zu können. Häufig anzutreffen sind unbestimmte Rechtsbegriffe in Form von sogenannten Technikstandards wie „allgemein anerkannte Regeln der Technik“, „Stand der Technik“ oder „Stand von Wissenschaft und Technik“. Diese nehmen Bezug auf die Entwicklung von Wissenschaft und/oder Technik und haben den Vorteil, dass der Gesetz- oder Ordnungsgeber die jeweiligen Tatbestände nicht ständig an die wissenschaftliche und technische Entwicklung anpassen muss.

Die Verwendung dieser unbestimmten Rechtsbegriffe ist aufgrund der Vielfalt der zu regelnden Sachverhalte nicht zu vermeiden. Zu ihrer Auslegung werden üblicherweise untergesetzliche Regelwerke heran gezogen. Dabei bilden die Gesetze und Verord-

³⁰⁶ Siehe hierzu aber *Just*, in Pieper/Lang [Hrsg.], Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2009-2010 der Bergischen Universität Wuppertal, Band 6, S. 58 (63). Hinsichtlich der nach ProdSG überwachungsbedürftigen Anlagen stellt er fest, dass das System der „aufeinander abgestimmten Anforderungen an den Betrieb und die Beschaffenheit“ geteilt wurde. Die Flexibilisierung auch im Rahmen des *New Approach* hinsichtlich der Beschaffenheit machte es notwendig die betrieblichen Anforderungen so flexibel zu gestalten, dass es dem Betreiber möglich ist, mitunter selbst die Verteilung zwischen Aufwendungen für Beschaffenheit oder Betrieb zu wählen, um das vorgeschriebene Sicherheitsniveau zu erreichen. Aber gerade diese Beschreibung bereitet in den Diskussionen immer wieder Probleme. Hat man das Niveau in der Vergangenheit durch konkrete Beschaffenheitsanforderungen und dazugehörige konkrete Betriebsvorschriften staatlich festgelegt, so steht man jetzt vor der Frage, wie man das zulässige Niveau in einem flexiblen System beschreiben kann. Die Unternehmen brauchen klare Regelungen, um sie eigenverantwortlich umsetzen zu können. Wenn vielleicht auch nicht in Form von Detailregelungen aber dann doch so strukturiert, dass man Sie ohne weitere umfangreiche Studien zumindest ansatzweise in ihrer Tragweite versteht.

nungen den bindenden Rahmen für die untergesetzlichen Normen und Standards, während diese wiederum Auslegung und Anwendung der Rechtsnormen beeinflussen. Für die Bestimmtheit der Normen ist das Bestehen dieser Auslegungsspielräume unschädlich, soweit die unbestimmten Rechtsbegriffe durch Auslegung mit herkömmlichen Methoden konkretisiert werden können.³⁰⁷

Eine Konkretisierung kann dabei durch Rechtsverordnungen, Allgemeine Verwaltungsvorschriften, durch sonstige Verwaltungsvorschriften der Länder, oder durch Technische Regelwerke erfolgen. Die Bindungswirkung dieser Varianten ist unterschiedlich.³⁰⁸

Besonderes Augenmerk ist hier auf die Allgemeinen Verwaltungsvorschriften und die Technischen Regelwerke zu legen.

Bezüglich Allgemeiner Verwaltungsvorschriften ist zu beachten, dass diese dazu dienen, eine einheitliche Rechtsanwendung der Behörden zu gewährleisten und sich daher unmittelbar nur an die zuständigen Behörden, nicht jedoch an den ebenfalls betroffenen Bürger wenden. Da die entscheidende Behörde jedoch zur Anwendung der Verwaltungsvorschriften verpflichtet ist, entfalten diese trotzdem dem Betroffenen gegenüber mittelbare Außenwirkung.³⁰⁹ Die Verwaltungsvorschriften können den Inhalt der gesetzlichen Regelung nicht modifizieren und unterliegen uneingeschränkt der gerichtlichen Kontrolle.³¹⁰

Bei Technischen Regelwerken ist zu beachten, dass diese in unterschiedlichen Formen vorliegen können. So stammen viele dieser Regelwerke von privaten Normungsorganisationen.³¹¹ Dies folgt daraus, dass technische Fragen nur mit der entsprechenden Sachkunde, also von technischen Sachverständigen zu beantworten sind und sich

³⁰⁷ Sachs Kommentar zum GG, 6. Auflage, München 2011, § 20 Rn. 127.

³⁰⁸ Schmidt-Kötters in BeckOK Umweltrecht, BImSchG, § 5 Rn. 6.

³⁰⁹ Schmidt-Kötters in BeckOK Umweltrecht, BImSchG, § 5 Rn. 9.

³¹⁰ BVerwG DVBl 1988, 539; Erbguth DVBl 1989, 473, 484.

³¹¹ Daraus resultieren neben materiellen auch formale Probleme, wenn bspw. Private (nicht zuletzt aufgrund urheberrechtlicher Vorschriften) für die von anderen Privaten erarbeiteten Regeln zahlen müssen. Auf Grund des teils hohen Aufwandes für die Ausarbeitung der Regelwerke sind die Texte nicht gerade billig zu erwerben. So wird man solche Regelwerke nur in Ausnahmefällen frei verfügbar im Internet finden. Diese Sachlage stellt öffentliche Stellen sowie Unternehmen und Bürger gleichermaßen vor Probleme. Für Unternehmen und Bürger kommt hinzu, dass sie für die Rechtsverfolgung und auch für die Kenntnis ihrer Rechte und Pflichten auf die Kenntnis dieser Regelwerke angewiesen sind. Hiermit setzt sich der *Waechter* („Der Umgang mit privaten Normen (DIN etc.) am Beispiel des Baurechts“) NVwZ 2013, 1251 ff. auseinander.

die Regelwerke häufig aus der Arbeit der Berufsorganisationen bzw. Dachverbänden von Ingenieuren entwickelt haben.³¹² Zu diesen Normungsorganisationen gehören u. a. das Deutsche Institut für Normung (DIN), der Verein Deutscher Elektrotechniker (VDE), der Deutsche Verein des Gas- und Wasserfaches (DVGW) und der Verein Deutscher Ingenieure (VDI). Weiterhin haben auch internationale Normungsorganisationen Regelwerke geschaffen, so die International Organisation for Standardization (ISO), und das Europäische Komitee für Normung (Comité Européen de Normalisation, CEN).

6.2.4.2 Die Einbeziehung untergesetzlicher Regelwerke in Rechtsnormen

Aus diesem privaten Ursprung resultieren jedoch Fragen bezüglich der Legitimation und Bindungswirkung der Regelwerke, wenn diese in einem rechtsverbindlichen Kontext herangezogen werden. Die Legitimation kann durch ausdrückliche gesetzliche Verweisungen geschehen (explizite Bezugnahme) oder implizit, wenn Rechtsnormen Sachverhalte so regeln, dass eine zusätzliche technische Bewertung erforderlich bleibt. Bei einer expliziten Bezugnahme folgen die Legitimation und Verbindlichkeit aus eben dieser Bezugnahme durch den legitimierten Normgeber. Anders ist dies bei der implizierten Bezugnahme. Stehen dem Rechtsanwender hier keine alternativen Bewertungsmaßstäbe zur Verfügung, erhalten die Regelwerke faktisch ausschlaggebende Bedeutung, obwohl sie nicht von einer staatlich legitimierten Stelle stammen.³¹³ Aus dieser faktischen Bedeutung folgt jedoch keine rechtliche Bindungswirkung. Vielmehr dürfen die technischen Regelwerke nur als Orientierung dienen und sind vom Rechtsanwender mit Rücksicht auf die im untergesetzlichen Regelwerk nicht abgebildeten Besonderheiten des Einzelfalles anzupassen.³¹⁴ Auch ist zu differenzieren zwischen statischen und dynamischen Verweisungen auf untergesetzliche Regelwerke. Eine statische Verweisung hat stets den feststehenden Inhalt einer Bestimmung zu einem festgelegten Zeitpunkt zum Gegenstand. Demgegenüber bezieht eine dynamische Verweisung den stets geltenden Inhalt einer Bestimmung mit ein. Die Verfassungsmäßigkeit dynamischer Verweisungen ist im Hinblick auf Art. 80 GG zweifelhaft, da so Teile der verweisenden Normen faktisch nicht vom Normgeber bestimmt werden sondern die Rechtssetzung auf private Stellen verlagert wird.³¹⁵

³¹² Gusy, NVwZ 1995, 105.

³¹³ Gusy, NVwZ 1995, 105, 106.

³¹⁴ Schmidt-Kötters in BeckOK Umweltrecht, BImSchG, § 5 Rn. 11.

³¹⁵ Boldt/Weller/Nölscher, Kommentar zum Bundesberggesetz, 1984, § 68 Rn. 13f.

In den untersuchten Normen und Rechtsverordnungen³¹⁶ ließ sich fast ausnahmslos die Verwendung der in Rede stehenden Rechtsbegriffe sowohl auf Bundesebene wie auch auf Landesebene belegen. Je nach Rechtsgebiet finden sich im einschlägigen Gesetz erste Ansätze für eine Konkretisierung in Form eines Kriterienkatalogs in den jeweiligen Anlagen. Ergeht ein Verwaltungsakt beispielsweise im Bereich des WHG, erlaubt § 3 Nr. 11 in Verbindung mit Anlage 1 WHG es zu bestimmen, was in diesem Fall unter „Stand der Technik“ zu verstehen ist.

Eine konkrete Verweisung auf untergesetzliche Regelwerke im Normtext selbst ließ sich jedoch nicht immer nachweisen. Stattdessen findet sich in diesem Kontext zumeist eine Ermächtigung der zuständigen Behörden, Rechtsverordnungen oder Verwaltungsvorschriften zur Konkretisierung zu erlassen. Dabei wird ihnen üblicherweise auch gestattet, in der Verordnung für die technischen Anforderungen Bezug auf eine Fundstelle zu nehmen, statt die technischen Standards im Einzelnen zu zitieren.

Von dieser Ermächtigung haben die zuständigen Behörden soweit feststellbar jedoch nur in einer kleinen Zahl von Fällen Gebrauch gemacht. Ein Beispiel für eine solche Einbeziehung von untergesetzlichen Normen in einer Verordnung stellt die Abwasserverordnung³¹⁷ dar. Diese Einbeziehung erfolgte hier jedoch nicht ausdrücklich zur Konkretisierung eines unbestimmten Rechtsbegriffs, sondern lediglich zur Statuierung eines gewünschten wissenschaftlichen und technischen Standards. In der Abwasserverordnung hat die Bundesregierung technische Anforderungen und Grenzwerte durch die Einbeziehung von DIN-, DIN EN-, DIN EN ISO-Normen und technischen Regeln der Wasserchemischen Gesellschaft konkretisiert (siehe § 4 Abwasserverordnung).

In der Mehrheit der Fälle hat eine Konkretisierung der unbestimmten Rechtsbegriffe durch die Behörden nicht stattgefunden, so dass bei der Auslegung der Rechtsbegriffe nicht auf verbindliche Verweise auf untergesetzliche Regelwerke o. ä. zurück gegriffen werden kann. Somit ist für die Ermittlung der geforderten Technikstandards je nach Situation eine Untersuchung der technischen Gegebenheiten bzw. der wissenschaftlichen und technischen Entwicklung und Möglichkeiten erforderlich.

³¹⁶ V.a. BBergG, BergVOn der Länder, ElBergV WHG, LWGe.

³¹⁷ Erlassen aufgrund von § 7a Abs. 1, 2 WHG (a.F.), heute § 23 Abs. 1.

6.2.4.3 Die Nutzung unbestimmter Rechtsbegriffe in Verwaltungsakten und die Einbeziehung untergesetzlicher Regelwerke zur Konkretisierung im Einzelfall

Es gibt jedoch noch eine weitere Möglichkeit, wie durch die Einbeziehung untergesetzlicher Regelwerke die Bestimmung des gesetzlich geforderten technischen Niveaus erleichtert werden kann. Neben der Möglichkeit, untergesetzliche Regelwerke durch Einbeziehung in Rechtsnormen verbindlich werden zu lassen, gibt es auch die Möglichkeit, sie durch Einbeziehung in einzelne Verwaltungsakte gegenüber den jeweiligen Adressaten verbindlich zu machen.

Es steht den Behörden frei, in ihren Verwaltungsakten unbestimmte Rechtsbegriffe zu verwenden. Da Verwaltungsakte jedoch hinreichend bestimmt sein müssen, muss der Begriff für den Empfänger konkretisierbar sein. Der Empfänger muss hier ebenso wie der Normadressat in der zuvor besprochenen Konstellation eine Konkretisierung aufgrund der technischen Gegebenheiten und Entwicklungen vornehmen. Dies kann die Behörde ihm erleichtern, indem sie ihn konkret zur Beachtung untergesetzlicher Regelwerke verpflichtet.

Regelwerke, die im Bereich der (hydrothermalen) (Tiefen-)Geothermie eine besondere Rolle spielen, sind insbesondere

- das Regelwerk des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches (DVGW), hier insbesondere die DVGW-Arbeitsblätter
 - W 101, Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; I. Teil: Schutzgebiete für Grundwasser,
 - W 110, Geophysikalische Untersuchungen in Bohrungen, Brunnen und Grundwassermessstellen – Zusammenstellung von Methoden und Anwendungen,
 - W 115, Bohrungen zur Erkundung, Beobachtung und Gewinnung von Grundwasser,
 - W 116, Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser,
 - W 120-1, Qualifikationsanforderungen für die Bereiche Bohrtechnik, Brunnenbau, -regenerierung, -sanierung und -rückbau,
 - W 121, Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen,

- W 135, Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen,
- das Regelwerk des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI), hier insbesondere die VDI-Richtlinie 4640, Blatt 1, Thermische Nutzung des Untergrundes – Grundlagen, Genehmigungen, Umweltaspekte und
- das Regelwerk des Deutschen Instituts für Normung (DIN), bspw. die DIN 4150-3, Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlage (in Bezug auf die „Induzierte Seismizität“).

6.2.4.4 Fortschreibung und Weiterentwicklung technischer Regelwerke

Die technischen Regeln des DVGW und des VDE werden nach einem 1975 im Vertrag zwischen der Bundesrepublik und dem Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN) festgelegten und in der DIN 820 („*Normungsarbeit*“ - Teil 1 „*Grundsätze*“, Teil 2 „*Gestaltung von Dokumenten*“, Teil 3 „*Begriffe*“ und Teil 4 „*Geschäftsgang*“) dargestellten Verfahren unter Beteiligung der Öffentlichkeit erarbeitet. Jedermann kann ein solches Normungsvorhaben beantragen und/oder sich daran auf dem Weg über ein Einspruchsverfahren beteiligen. Unabhängige Expertengremien unter Beteiligung von Fachleuten aus den interessierten Kreisen und Vertreter öffentlicher Belange definieren die Anforderungen, die nach Auffassung der überwiegenden Mehrheit der auf dem jeweiligen Gebiet tätigen Fachleute zu beachten sind, um eine den aktuellen Anforderungen entsprechende, bewährte technische Lösung zu gewährleisten. Die gefundenen technischen Lösungswege werden jeweils in einem widerspruchsfreien einheitlichen Regelwerk zusammengefasst. Damit wird jedem Verantwortlichen ein aktueller Stand der Sicherheitstechnik vorgegeben, zugleich aber dem dynamischen Fortschritt in der Technik Rechnung getragen; denn die Regeln werden von den unmittelbar betroffenen Fachleuten aus Theorie und Praxis gestaltet und fortlaufend aktualisiert.³¹⁸

³¹⁸ Von Rienen/Wasser in Danner/Theobald, Energierecht, Kapitel 180 – Technische Sicherheit, Rn. 14.

6.2.5 Bergrecht

Zentrale Regelungsmaterie für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen ist – neben Vorgaben des Wasserrechts – das Bundesberggesetz (BBergG).³¹⁹ Nach § 3 Abs. 3 Nr. 2 BBergG gehört die Geothermie³²⁰, wie andere volkswirtschaftlich bedeutende Bodenschätze, zu den sog. bergfreien Bodenschätzen³²¹. In Anbetracht der knappen Energiereserven wollte der Gesetzgeber das vorhandene Energiepotenzial der Geothermie schützen und für eine geordnete Nutzung sorgen.³²²

Die Suche nach Geothermie („Aufsuchung“) und die [erschließende] Nutzung der Geothermie („Gewinnung“) unterfällt gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 1 BBergG grundsätzlich dem BBergG.³²³ Eine Ausnahme gilt dann, wenn die Geothermie in einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher Nutzung gewonnen werden soll (vgl. § 4 Abs. 2 Nr. 1 BBergG), zum Beispiel dann, wenn sie nur zur Beheizung bzw. Kühlung eines Gebäudes dient. Diese auf das Grundstück begrenzte Gewinnung ist vom bergrechtlichen Regelungsregime ausgenommen.³²⁴ Die [verarbeitende] Nutzung von Erdwärme wird hingegen nach § 4 Abs. 3 Satz 2 zweiter Halbsatz BBergG einer „Weiterverarbeitung“, d.h. einer sonstigen Bearbeitung oder Verarbeitung von Bodenschätzen, gleichgestellt. Anders als bspw. Kokereien, deren Tätigkeit als „Aufbereitung“ im Sinne des § 4 Abs. 3 Satz 1 BBergG gilt, unterliegen die Fernwärmeauskopplung und Stromerzeugung aus Erdwärme, also die Tätigkeiten jenseits des Primärkreislaufs, nicht dem Bergrecht.³²⁵

Ausgelöst u. a. durch gerichtliche Entscheidungen zum Braunkohletagebau Garzweiler³²⁶, aber auch in jüngerer Zeit durch die in Politik und Gesellschaft geführte Diskussion um die Auswirkungen von Anlagen und Verfahren zur Erkundung und Förderung

³¹⁹ Einen Gesamtüberblick vermittelt *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe - Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, Seite 535 ff..

³²⁰ Das BBergG verwendet ausschließlich den Begriff „Erdwärme“.

³²¹ Bergfreie Bodenschätze stehen im Gegensatz zu grundeigenen Bodenschätzen nicht im Eigentum des Grundstückseigentümers, vgl. § 3 Abs. 2 BBergG; sie können also - nach behördlicher Gestattung - grundsätzlich von jedermann aufgesucht und gewonnen werden.

³²² Vgl. BT-Drs. 8/1315, Seite 173.

³²³ Vgl. *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe - Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, Seite 535, 536.

³²⁴ Die Ausnahme erfasst nur Bohrungen bis zu einer Tiefe von 100 Metern. Andernfalls besteht nach § 127 Abs. 1 BBergG eine Anzeigepflicht und - sofern die Bergbehörden dies für erforderlich halten - die Pflicht zur Vorlage von bergrechtlichen Betriebsplänen.

³²⁵ Zu den Hintergründen für diese Einordnung der Erdwärme in das bergrechtliche System siehe BT-Drs. 8/1315 Seite 189.

³²⁶ Jüngst BVerfG, Urt. v. 17. 12. 2013 – 1 BvR 3139/08, 1 BvR 3386/08, NVwZ 2014, 211.

von Erdgas aus nichtkonventionellen Lagerstätten, ist das BBergG in die Kritik geraten. Aus verfahrensrechtlicher Hinsicht werden vielfach mangelnde Transparenz und Defizite bei den Beteiligungsrechten Dritter beklagt. In materiell-rechtlicher Hinsicht wird vor allem das Verhältnis des BBergG zu den Umweltbelangen (insbesondere anhand der Regelungen der §§ 48 Abs. 2, 55 Abs. 1 BBergG) als reformbedürftig³²⁷ angesehen. So haben die damaligen Oppositionsfraktionen im 17. Deutschen Bundestag (Bündnis90/Die Grünen, Die LINKE sowie die SPD) jeweils eine Reform des Bergrechts gefordert.³²⁸ Auch der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), ein wissenschaftliches Beratungsgremium der deutschen Bundesregierung, regt in seinem Umweltgutachten 2012 eine Reform des Bergrechts an.³²⁹

Vorbild für eine Reform des Bergrechts könnte hierbei u. a. die Reform des Industrieanlagenzulassungsrechts in den 70er Jahren sein, bei der das vormals in der GewO verortete Zulassungsregime in das damals neu erlassene Bundes-Immissionsschutzgesetz überführt wurde, wo es bis heute zu einem modernen Anlagenzulassungs- und Überwachungsrecht ausgeformt wurde. Auch wenn es bisher – von den Auswirkungen der UVP-Richtlinie einmal abgesehen – nur wenige europäische Einflüsse auf das deutsche Bergrecht gegeben hat, könnten sich dennoch auch hier mittelfristig (potenzielle) Konfliktfelder ergeben.³³⁰

6.2.5.1 Bergbauberechtigungen

Wer bergfreie Bodenschätze aufsuchen will, bedarf der Erlaubnis, wer bergfreie Bodenschätze gewinnen will, der Bewilligung oder des Bergwerkseigentums, § 6 BBergG.

³²⁷ Zu den Entwicklungen und Reformtendenzen im Bergrecht siehe auch *Kühne*, ZfB 2013, Seite 113 ff., 121.

³²⁸ Siehe Anträge der Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die GRÜNEN vom 14.12.2011 (BT-Drs. 17/8133), der SPD-Bundestagsfraktion vom 09.05.2012 (BT-Drs. 17/9560) sowie der Bundestagsfraktion Die Linke vom 21.03.2012 (BT-Drs. 17/9034).

³²⁹ Vgl. *SRU*, Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt, 2012, Seite 92.

³³⁰ So hat die Kommission bspw. im Januar 2014 eine Empfehlung verabschiedet, mit der sichergestellt werden soll, dass bei der Anwendung von Fracking ein angemessener Umwelt- und Klimaschutz gewährleistet ist (Empfehlung 2014/70/EU der Kommission vom 22.01.2014 mit Mindestgrundsätzen für die Exploration und Förderung von Kohlenwasserstoffen (z. B. Schiefergas) durch Hochvolumen-Hydrofracking, ABI. L 39 v. 8.2.2014, S. 72–78).

Diese Bergbauberechtigungen gewähren allein das Recht zur Aufsuchung oder Gewinnung. Sie sind Verwaltungsakte³³¹, die das präventive Verbot mit Erlaubnisvorbehalt zur Aufsuchung und Gewinnung bergfreier Bodenschätze aufheben, aber nicht bereits die konkrete Aufsuchungs- und Gewinnungstätigkeit gestatten. Für diese Aufsuchungs- und Gewinnungstätigkeiten, den eigentlichen „bergrechtlichen Betrieb“, erstellt der Unternehmer Betriebspläne, die von den Bergbehörden gesondert genehmigt („zugelassen“) werden.

6.2.5.1.1 Versagungsgründe

Sofern keiner der in den §§ 11 bis 13 aufgeführten Versagungsgründe vorliegt, hat der Antragsteller einen **Rechtsanspruch auf Erteilung der beantragten Bergbauberechtigung**, der außerhalb dieses Gesetzes durch Art. 12 GG garantiert wird.³³²

Die Erlaubnis ist u. a. zu versagen, wenn

- der Antragsteller nicht ein Arbeitsprogramm vorlegt, in dem insbesondere dargelegt ist, dass die vorgesehenen Aufsuchungsarbeiten hinsichtlich Art, Umfang und Zweck ausreichend sind und in einem angemessenen Zeitraum erfolgen (§ 11 Nr. 3 BBergG)³³³,
- bei einer Erlaubnis zur Aufsuchung zu gewerblichen Zwecken oder zur großräumigen Aufsuchung der Antragsteller nicht glaubhaft macht, dass die für eine ordnungsgemäße Aufsuchung und der damit nach § 2 Abs. 1 Nr. 1 und 2 im Zusammenhang stehenden Tätigkeiten erforderlichen Mittel aufgebracht werden können (§ 11 Nr. 7 BBergG),
- eine sinnvolle und planmäßige Aufsuchung und Gewinnung von bergfreien oder grundeigenen Bodenschätzen gefährdet würde (§ 11 Nr. 8 BBergG),
- Bodenschätze beeinträchtigt würden, deren Schutz im öffentlichen Interesse liegt (§ 11 Nr. 9 BBergG) oder

³³¹ Für den Erlass dieser Verwaltungsakte existieren entsprechende Verwaltungsvorschriften, die die jeweilige Bergbehörde zu beachten hat, in Rheinland-Pfalz z. B. die „Verwaltungsvorschrift des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr betr. Verfahren zur Erteilung von Erlaubnissen und Bewilligungen nach dem Bundesberggesetz“ vom 8. April 1993 (MinBl. S. 250).

³³² *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 6 Rn. 13.

³³³ Vgl. u. a. BVerwG, Beschluss vom 15.10.1998 – 4 B 94.98, NVwZ 1999, 876. Es sollen keine Bergbauberechtigungen verliehen werden, „die nicht die Erwartung rechtfertigen, jemals ausgeübt werden zu können“. Damit soll verhindert werden, „dass eine Berechtigung begründet wird, die sich im Nachhinein als substanzlos erweist“. Dies entspricht auch dem Grundsatz der Verfahrensökonomie.

- überwiegende öffentliche Interessen die Aufsuchung im gesamten zuzuteilenden Feld ausschließen (§ 11 Nr. 10 BBergG).

Für die Versagung der *Bewilligung* gilt gemäß 12 Abs. 1 Satz 1 BBergG § 11 Nr. 1 und 6 bis 10 entsprechend.

6.2.5.1.2 Erlaubnis- bzw. Bewilligungsfelder

Erlaubnis und Bewilligung werden für eine bestimmte Fläche, das sog. Erlaubnis- bzw. Bewilligungsfeld, erteilt. Gemäß § 4 Abs. 7 BBergG ist das Feld einer Erlaubnis, Bewilligung oder eines Bergwerkseigentums ein Ausschnitt aus dem Erdkörper, der von geraden Linien an der Oberfläche und von lotrechten Ebenen nach der Tiefe begrenzt wird, soweit nicht die Grenzen des Geltungsbereichs dieses Gesetzes einen anderen Verlauf erfordern.

Die jeweilige Größe des Feldes bestimmt sich nach dem geplanten Geothermie-Projekt und den hydrogeologischen Gegebenheiten. Für die erforderliche und zulässige Feldgröße gelten dabei in der Praxis³³⁴ folgende Maßstäbe: Das Feld muss einerseits so großflächig angelegt sein, dass ein ausreichendes Gebiet zur Verfügung steht, um geeigneten geothermischen Untergrund finden bzw. Geothermie in ausreichendem Umfang gewinnen zu können. Andererseits soll die Größe des Feldes nicht so bemessen sein, dass konkurrierende Aufsuchungs- und Gewinnungsinteressen längerfristig verhindert werden.³³⁵ Demgemäß können Erlaubnisfelder für die Aufsuchung von Geothermie größere Areale umfassen; Bewilligungsfelder sind meist deutlich kleinflächiger.³³⁶ Beantragt der Unternehmer die Erlaubnis für ein zu großes Erlaubnisfeld, kann die Bergbehörde abweichend vom Antrag eine andere Feldgröße festsetzen, um hierdurch eine Gefährdung der Wettbewerbslage abzuwehren oder die Aufsuchung von

³³⁴ Siehe hierzu insbesondere den Bericht des Ad-hoc-Arbeitskreises „Bemessung von Erdwärmefeldern“ des Bund-Länder-Ausschuss Bergbau und des Obmanns für das Markscheidewesen: Erarbeitung von Kriterien für die Bemessung von Bergbauberechtigungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme, abgedruckt u. a. in Geothermische Energie 40/2003, Seite 12 ff.

³³⁵ Siehe auch *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefegeothermische Anlagen“, Seite 18.

³³⁶ Vgl. *Schulz*, Bergrecht und Erdwärme - Gesichtspunkte zur Bemessung von Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern, Geothermische Energie 40/2003, Seite 9 f.

Lagerstätten zu verbessern.³³⁷ Die Bergbehörde ist auch befugt, im Genehmigungsverfahren darauf hinzuwirken, dass der Antragsteller das Feld für die Aufsuchung oder Bewilligung der Geothermie an die erforderliche Größe anpasst.³³⁸ Sie kann außerdem die Erlaubnis bzw. Bewilligung widerrufen, wenn der Berechtigte über einen längeren Zeitraum untätig bleibt, vgl. § 18 Abs. 2 und Abs. 3 BBergG.

6.2.5.1.3 Ausschließlichkeit und Vorrang

Die erteilte Erlaubnis oder Bewilligung gewährt ein ausschließliches Recht, das heißt, nur der Inhaber der Erlaubnis oder Bewilligung ist berechtigt, innerhalb des Feldes die bezeichneten Bodenschätze aufzusuchen oder zu gewinnen.³³⁹ Dritten ist die Aufsuchung oder die Gewinnung desselben Bodenschatzes im Feld des Unternehmers in der Regel untersagt. Ausnahmen gelten für die großräumige Aufsuchung³⁴⁰ und für die Aufsuchung zu wissenschaftlichen Zwecken.

Zudem hat die zuständige Behörde (also das jeweilige Bergamt) dem Inhaber einer Erlaubnis zu gewerblichen Zwecken Vorrang gegenüber Anträgen Dritter zur Gewinnung desselben Bodenschatzes zu gewähren. Voraussetzung für den Vorrang ist, dass der Rechtsinhaber seinen Antrag innerhalb von drei Monaten stellt, nachdem ihn die Bergbehörde über den Bewilligungsantrag des Dritten informiert hat, § 14 Abs. 1 Satz 2 BBergG. In allen anderen Fällen hat gemäß § 14 Abs. 2 Satz 1 BBergG derjenige Antrag den Vorrang, der den Anforderungen einer sinnvollen und planmäßigen Aufsuchung oder Gewinnung am besten Rechnung trägt.

Stellt der Erlaubnisinhaber seinen Antrag also rechtzeitig, hat der Dritte keine Möglichkeit, ebenfalls eine Bewilligung zur Gewinnung desselben Bodenschatzes im selben

³³⁷ Vgl. § 16 Abs. 2 BBergG. Eine analoge Anwendung auf Bewilligungsfelder dürfte angesichts des klaren Wortlauts „Ein Erlaubnisfeld kann abweichend vom Antrag festgesetzt werden“ nicht in Betracht kommen, vgl. hierzu auch Boldt/Weller, Kommentar zum BBergG, § 16 Rn. 2.

³³⁸ Um andere Aufsuchungsinteressen nicht langfristig zu verdrängen, kann die Behörde die Erlaubnis nicht auf die nach § 16 Abs. 4 S. 1 BBergG höchstzulässige Dauer von fünf Jahren befristen, sondern auf einen deutlich kürzeren Zeitraum von beispielsweise drei Jahren. Dem Aufsuchenden bleibt die Möglichkeit einer Verlängerung, sobald das Erlaubnisfeld trotz planmäßiger, mit der Behörde abgestimmter Aufsuchung noch nicht ausreichend untersucht werden konnte, vgl. § 16 Abs. 4 S. 2 BBergG.

³³⁹ Vgl. § 7 Abs. 1 und § 8 Abs. 1 BBergG.

³⁴⁰ Nach § 4 Abs. 1 Satz 2 BBergG ist eine großräumige Aufsuchung eine mit Hilfe von geophysikalischen oder geochemischen Verfahren durchgeführte Untersuchung, wenn sie auf die Ermittlung von Kennwerten beschränkt ist, die großräumige Rückschlüsse auf das mögliche Vorkommen von Bodenschätzen zulassen. Zu den weiteren Details siehe Boldt/Weller, Kommentar zum BBergG, § 4 Rn. 4, § 7 Rn. 6 und § 8 Rn. 6.

Feld zu erlangen. Auf diese Weise kann sich der Erlaubnisinhaber faktisch, wenn auch nur für gewisse Zeit, vor Konkurrenten schützen.³⁴¹

Nach § 16 Absatz 4 BBergG ist die Erlaubnis auf höchstens 5 Jahre zu befristen. Sie soll um jeweils drei Jahre verlängert werden, soweit das Erlaubnisfeld trotz planmäßiger, mit der Behörde abgestimmter Aufsuchung noch nicht untersucht werden konnte. Die Untätigkeit des Inhabers einer bergrechtlichen Erlaubnis führt zur Ablehnung des Antrags auf Verlängerung der Erlaubnis zur Aufsuchung von Erdwärme.³⁴² Indem die Möglichkeit einer Verlängerung der Erlaubnis zur Aufsuchung an gesetzlich genau bestimmte Voraussetzungen gebunden ist, soll verhindert werden, dass Unternehmen Erlaubnisse „auf Vorrat“ erhalten bzw. sichern. Die Regelung des § 16 Absatz 4 Satz 2 BBergG bezweckt auf diese Weise auch den Schutz konkurrierender Unternehmen. Ausdrücklich wollte der Gesetzgeber das System „ewiger“ Bergbauberechtigungen durch die Erteilung (nur) befristeter Bergbauberechtigungen ersetzen. Andernfalls hätte es ein Unternehmer weitgehend selbst in der Hand, andere Unternehmer von einer Aufsuchung und Gewinnung derselben Bodenschätze abzuhalten.³⁴³

6.2.5.1.4 Nutzungskonkurrenz benachbarter Anlagen

Beim „Erfahrungsaustausch Kommunale Geothermie-Projekte“³⁴⁴ wurde unter besonderer Analyse des Versagungsgrundes „Gefährdung einer sinnvollen und planmäßigen Aufsuchung und Gewinnung von bergfreien oder grundeigenen Bodenschätzen“ (§ 12 Abs. 1 Satz 1 i. V. m. § 11 Nr. 8 BBergG) erörtert, inwieweit benachbarte Anlagen, deren Bewilligungsfelder aneinandergrenzen, einander beeinträchtigen können und wie solche Nutzungskonflikte bergrechtlich wie wasserrechtlich gehandhabt werden können. Bei eingehender Prüfung und konsequenter Anwendung der berggesetzlichen Systematik wird deutlich, dass auch solche Konfliktfälle zufriedenstellend gelöst werden können. Kooperationen der benachbarten Bewilligungsinhaber, d. h. Absprachen,

³⁴¹ Vgl. *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe - Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, Seite 535, 537.

³⁴² Siehe hierzu etwa VGH Mannheim, Urteil vom 15.04.2010, Az 6 S 1939/09, ZUR 2010, 423 mit Anmerkungen von *Große*, ZUR 2010, 426 f.; bestätigt durch BVerwG, Urteil vom 03.03.2011, Az 7 C 4.10, DVBl. 2011, 960 (Zurückweisung der Revision).

³⁴³ Vgl. *Große*, Anmerkungen zu VGH Mannheim, Urteil vom 15.04.2010, Az 6 S 1939/09, ZUR 2010, 427.

³⁴⁴ Vgl. *Buchholz*, Brennpunkte im Berg-, Wasser- und Planungsrecht, Vortrag bei „Erfahrungsaustausch Kommunale Geothermie-Projekte“ am 14.04.2010 in Augsburg, abrufbar unter http://www.geothermiekompetenz.de/cms/media/Downloads/GGSC/10_04_14_buchholz_berg_wasser_planungsrecht.pdf

vertragliche Einigungen und das Ziel einer gemeinsamen Optimierung der Anlagen sind in aller Regel zielführender, als ein Beharren auf den jeweiligen Rechtspositionen und Rechtsschutzmöglichkeiten (z. B. Nachbarklagen gegen Bergbauberechtigungen), deren jeweilige Kenntnis aber grundsätzlich wichtig ist.

Sollte eine einvernehmliche Lösung nicht möglich sein, kann die zuständige Behörde gemäß § 35 ff. BBergG auf Antrag dem Inhaber einer Gewinnungsberechtigung durch **Zulegung** das Recht erteilen, den Abbau eines Bodenschatzes aus dem Feld seiner Gewinnungsberechtigung (Hauptfeld) in das Feld einer benachbarten fremden Gewinnungsberechtigung, die sich auf den gleichen Bodenschatz bezieht, fortzuführen (grenzüberschreitender Abbau). Voraussetzung hierfür ist unter anderem, dass

1. der Antragsteller nachweist, dass er sich ernsthaft um eine Einigung über den grenzüberschreitenden Abbau zu angemessenen Bedingungen, erforderlichenfalls unter Angebot geeigneter Abbaumöglichkeiten innerhalb der eigenen Gewinnungsberechtigungen, bemüht hat,
2. aus bergwirtschaftlichen oder bergtechnischen Gründen ein grenzüberschreitender Abbau geboten ist,
3. Gründe des Allgemeinwohls, insbesondere die Versorgung des Marktes mit Bodenschätzen oder andere gesamtwirtschaftliche Gründe, einen grenzüberschreitenden Abbau erfordern,
4. nicht damit gerechnet werden muss, dass die in dem Feld der benachbarten Berechtigung anstehenden Bodenschätze von einem anderen Gewinnungsbetrieb auch ohne Zulegung ebenso wirtschaftlich gewonnen werden,
5. Bodenschätze, deren Schutz im öffentlichen Interesse liegt, durch die Zulegung nicht beeinträchtigt werden.

Nach § 37 BBergG hat der Berechtigte, also derjenige, dem die Zulegung erteilt wird, eine Entschädigung an den Inhaber der fremden Berechtigung zu leisten.

Das Bergrecht enthält somit eine starke, eigentumsähnliche Rechtsposition des Feldinhabers. Es bietet insofern einen guten Investitionsschutz und schafft zugleich starke Anreize für eine Einigung. Auch der bei langen Verhandlungen zu besorgende Zeitverzug dürfte eine Einigung in der Praxis beschleunigen.

Ein weiteres Thema bei der Nutzungskonkurrenz benachbarter Anlagen ist die **Unterteilung der Aufsuchungs- und Bewilligungsfelder in Tiefenstockwerke**. Das

BBergG sieht derzeit keine Möglichkeit vor, Erlaubnis- oder Bewilligungsfelder in verschiedene Tiefenstockwerke zu unterteilen. Die Erfüllung der in § 4 Abs. 7 BBergG geforderten Form des Feldes ist nach § 11 Nr. 2, § 12 Abs. 1 Nr. 2 und § 13 Nr. 3 BBergG Voraussetzung für die Erteilung einer Bergbauberechtigung.³⁴⁵ Das auf einen bestimmten Bodenschatz bezogene ausschließliche Recht der Aufsuchungserlaubnis bzw. der Gewinnungsbewilligung gilt in den Grenzen des Erlaubnis- oder Bewilligungsfeldes nicht nur horizontal, sondern auch lotrecht und damit vertikal praktisch unbegrenzt in die Tiefe. Dritte sind von einer Nutzung dieses Bodenschatzes innerhalb des Feldes somit ausgeschlossen. Unerheblich ist dabei, ob sich die unterschiedlichen Nutzungen eines Bodenschatzes überhaupt beeinflussen oder beeinträchtigen können.³⁴⁶ *Altrock/Große/Lehnert* kommen in ihrer gutachterlichen Äußerung „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen“ daher zu dem Ergebnis, dass dies kaum interessengerecht erscheint.³⁴⁷ Sofern eine gegenseitige Beeinflussung und Beeinträchtigung von Gewinnungsbetrieben ausgeschlossen ist, bestehe nach dieser Ansicht kein Bedarf für einen generellen Ausschluss einer Nutzung desselben Bodenschatzes in einem weiteren Tiefenstockwerk durch Dritte. Zudem führt diese Ansicht an, dass es im öffentlichen Interesse liegen dürfte, wenn die vorhandene Erdwärme möglichst umfassend genutzt wird. Jenseits des Bergrechts könnte dieser Konflikt durch eine privatrechtliche Einigung zwischen Berechtigtem und Dritten gelöst werden.³⁴⁸ Da hierbei allerdings die Möglichkeit bestünde, dass der Berechtigte seine Rechtsposition missbräuchlich ausnutzt, plädiert diese Ansicht nach einer Auseinandersetzung mit – aus ihrer Sicht – lösbaaren Konflikten im Bereich der Grundabtretung (§§ 77 ff. BBergG) und des Bergschadensrechts (§§ 110 ff. BBergG) dafür, die Regelung des § 4 Abs. 7 BBergG durch folgenden Satz zu ergänzen³⁴⁹: *„Ein Feld zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme kann durch Horizontalebene in der Tiefe begrenzt werden.“*

³⁴⁵ *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 4 Rn. 23.

³⁴⁶ Vgl. *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen“, Seite 19.

³⁴⁷ Vgl. *Altrock/Große/Lehnert*, Gutachterliche Äußerung „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen“, Seite 19; so auch *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe - Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, Seite 535, 537.

³⁴⁸ So der Vorschlag im Bericht des Ad-hoc-Arbeitskreises „Bemessung von Erdwärmefeldern“ des Bundesländer-Ausschusses Bergbau und des Obmanns für das Markscheidewesen: Erarbeitung von Kriterien für die Bemessung von Bergbauberechtigungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme, abgedruckt u. a. in *Geothermische Energie* 40/2003, Seite 12 ff

³⁴⁹ So auch *Schulz*, Bergrecht und Erdwärme - Gesichtspunkte zur Bemessung von Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern, *Geothermische Energie* 40/2003, Seite 9, 11.

Nach den bisherigen Erkenntnissen ist allerdings fraglich, ob für eine solche Änderung des § 4 Abs. 7 BBergG in der Praxis überhaupt ein Bedarf besteht. Zwar ist für die Zukunft denkbar, dass in besonders erdwärmehöffigen Gebieten geothermische Energie in unterschiedlichen Tiefenstockwerken gewonnen wird (bzw. werden soll), aus der aktuellen Praxis ist allerdings vorliegend kein Fall bekannt, in dem eine solche stockwerkweise Nutzung eines Feldes zum einen konkret beabsichtigt wurde und zum anderen hierüber keine Einigung erzielt wurde.

6.2.5.1.5 Verfahren und Form der Erteilung der Bergbauberechtigungen

Nach § 15 BBergG hat die zuständige Behörde vor der Entscheidung über den Antrag den Behörden Gelegenheit zur Stellungnahme zu geben, zu deren Aufgaben die Wahrnehmung öffentlicher Interessen im Sinne des § 11 Nr. 10 BBergG³⁵⁰ gehört.

Erlaubnis und Bewilligung bedürfen der Schriftform, § 16 Abs. 1 Satz 1 BBergG. Der Erlass von Nebenbestimmungen bei Erteilung einer Bergbauberechtigung richtet sich nach den Vorschriften des Verwaltungsverfahrensgesetzes (VwVfG)³⁵¹. In § 16 Abs. 3 BBergG wird nur die nachträgliche Aufnahme, Änderung oder Ergänzung von Auflagen geregelt. Da auf die Erteilung einer Erlaubnis oder Bewilligung, sofern keine der in §§ 11 und 12 genannten Versagungsgründe vorliegen, ein Rechtsanspruch besteht, findet § 36 Abs. 1 VwVfG Anwendung. Danach ist eine Nebenbestimmungen (z. B. Auflage) nur zulässig, wenn sie durch Rechtsvorschrift zugelassen ist oder wenn sie sicherstellen soll dass die gesetzlichen Voraussetzungen des Verwaltungsaktes erfüllt werden. Die Behörde kann daher die Entscheidung über die Erteilung einer Bergbauberechtigung nur Nebenbestimmungen aufnehmen, die dazu bestimmt sind, einen im

³⁵⁰ Die Erlaubnis bzw. die Bewilligung ist nach zu versagen, wenn überwiegende öffentliche Interessen die Aufsuchung im gesamten zuzuteilenden Feld ausschließen, vgl. § 11 Nr. 10 BBergG.

³⁵¹ Nach § 5 BBergG ist auf die Ausführung des BBergG und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen, soweit in diesem Gesetz nichts anderes bestimmt ist, das Verwaltungsverfahrensgesetz anzuwenden. Nach § 1 Abs. 3 VwVfG gilt das Verwaltungsverfahrensgesetz des Bundes nicht für die Ausführung von Bundesrecht durch die Länder, soweit die öffentlich-rechtliche Verwaltungstätigkeit der Behörden landesrechtlich durch ein Verwaltungsverfahrensgesetz geregelt ist. Lediglich soweit ein Landesverwaltungsverfahrensgesetz keine Regelung enthält, gilt ergänzend das VwVfG des Bundes. Für das Verwaltungsverfahren hat die Unterscheidung zwischen Bundesrecht und Landesrecht i.d.R. keine praktische Bedeutung, denn die Verwaltungsverfahrensgesetze der Länder stimmen entweder wörtlich mit dem Verwaltungsverfahrensgesetz des Bundes überein oder sie verweisen darauf.

Einzelfall nach den genannten Vorschriften bestehenden Ablehnungsgrund auszuräumen.³⁵²

Nach § 16 Abs. 4 BBergG ist die *Erlaubnis* auf höchstens fünf Jahre zu befristen. Sie soll um jeweils drei Jahre verlängert werden, soweit das Erlaubnisfeld trotz planmäßiger, mit der zuständigen Behörde abgestimmter Aufsuchung noch nicht ausreichend untersucht werden konnte. Nach Abs. 5 wird die *Bewilligung* für eine der Durchführung der Gewinnung im Einzelfalle angemessene Frist erteilt oder verliehen. Dabei dürfen fünfzig Jahre nur überschritten werden, soweit dies mit Rücksicht auf die für die Gewinnung üblicherweise erforderlichen Investitionen notwendig ist. Eine Verlängerung bis zur voraussichtlichen Erschöpfung des Vorkommens bei ordnungs- und planmäßiger Gewinnung ist zulässig.

6.2.5.2 Allgemeine Verbote und Beschränkungen, § 48 BBergG

Das BBergG enthält zwar eine abschließende Regelung des Bergrechts; damit ist aber das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten bergfreier und grundeigener Bodenschätze nicht generell dem Geltungsbereich anderer Gesetze und Verordnungen entzogen. Das BBergG lässt außerhalb des Bergrechts bestehende öffentlich rechtliche Vorschriften grundsätzlich unberührt, auch soweit sie für Tätigkeiten gelten, die vom BBergG erfasst werden.³⁵³

Während die Unberührtheitsklausel in § 48 Abs. 1 Satz 1 lediglich klarstellende Bedeutung hat, hat die jeweilige Fachbehörde gemäß Abs. 1 Satz 2 dafür Sorge zu tragen, dass die Aufsuchung und Gewinnung der vom BBergG erfassten Bodenschätze so gering wie möglich beeinträchtigt werden. Die im jeweiligen Fall mitunter durchzuführende Abwägung ist mit Priorität für den Bergbau durchzuführen.³⁵⁴ Grundsätzlich sollte angestrebt werden, dass der Forderung des Absatzes 1 Satz 2 bereits bei der Festlegung zu schützender Bereiche Rechnung getragen wird. In diesem Zusammenhang kommt den gesetzlichen Möglichkeiten des Raumordnungs- und Landesplanungsrechts besondere Bedeutung zu.³⁵⁵ Wichtige Voraussetzung für eine gesicherte Rohstoffversorgung ist die Einbeziehung der Lagerstätten in die Raumordnungspläne, die

³⁵² *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 16 Rn. 5.

³⁵³ Vgl. *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 48 Rn. 2.

³⁵⁴ Vgl. *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 48 Rn. 4.

³⁵⁵ Vgl. *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 48 Rn. 6.

entsprechende Flächen zur Deckung des derzeitigen und zukünftigen regionalen und überregionalen Rohstoffbedarfs vorsehen sollten. Die landesplanerischen Darstellungen können maßgeblich dazu beitragen, im Einzelfall eine sachgerechte Abwägung mit anderen konkurrierenden raumbedeutsamen Maßnahmen zu erleichtern und für bestimmte Rohstoffvorkommen eine Priorität gegenüber anderen regionalen Belangen aufzuzeigen. Die Ausweisung von solchen Vorrangflächen für die mittel- und langfristige Rohstoffversorgung ist allen Länderplanungen gemeinsam.

§ 48 Abs. 2 BBergG sieht die Möglichkeit vor, die Aufsuchung oder Gewinnung von Bodenschätzen zu beschränken oder zu untersagen, soweit überwiegende öffentliche Interessen entgegenstehen. Da nach dem Wortlaut des § 48 Abs. 2 Satz 1 die Bergbehörde nur die Aufsuchung und Gewinnung beschränken und untersagen kann, könnte zweifelhaft sein, ob die Vorschrift auch für Abschlussbetriebspläne gilt, in denen die Wiedernutzbarmachung der Oberfläche im Vordergrund steht. Jedoch ist in der Rechtsprechung³⁵⁶ geklärt, dass die öffentlichen Interessen i. S. von § 48 Abs. 2 Satz 1 auch im Abschlussbetriebsplanverfahren zu prüfen sind.³⁵⁷ Die Rohstoffsicherungsklausel des § 48 Abs. 1 Satz 2 BBergG spielt bei der Einstellung des Betriebs keine Rolle mehr und die entgegenstehenden überwiegenden Interessen erhalten ein besonderes Gewicht. Im Übrigen kann bspw. die Wiedernutzbarmachung als nachfolgende Tätigkeit i. S. des Begriffes „Gewinnen“ i. S. von § 4 Abs. 2 BBergG verstanden werden.

Es stellt sich die Frage, welche Bedeutung **§ 48 Abs. 2 BBergG als Befugnisnorm zur Berücksichtigung außerbergrechtlicher Belange** zukommt. Die Bergbehörde hat bei ihrer auf § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG gestützten Entscheidung trotz des Wortlauts („kann“) nach bisheriger in Rechtsprechung³⁵⁸ und Literatur³⁵⁹ vertretener Ansicht kein Ermessen. Beim Vorliegen überwiegender öffentlicher Interessen ist ein rechtswidriger Zustand erreicht, der es nicht mehr zulässt, dass die Behörde zusätzlich noch ihr Ermessen ausübt, ob sie tätig wird. Das Ermessen beschränkt sich darauf, dass die Behörde die Aufsuchung oder Gewinnung völlig untersagt oder – aus Gründen der Verhältnismäßigkeit – nur beschränkt.³⁶⁰

³⁵⁶ Siehe u. a. BVerwG, ZfB 2005, 161.

³⁵⁷ Piens/Schulte/Graf Vitzthum, BBergG, § 48 Rn. 22 mit Verweis auf Beckmann, DÖV 2010, 512.

³⁵⁸ BVerwG, DVBl. 1986, 1273; BVerwG, NVwZ 2005, 954; BVerwG, ZfB 2006, 161

³⁵⁹ Piens/Schulte/Graf Vitzthum, BBergG, § 48 Rn. 27 mit Verweis auf Rausch, Umwelt- und Planungsrecht, Seite 206.

³⁶⁰ Piens/Schulte/Graf Vitzthum, BBergG, § 48 Rn. 27.

Fraglich ist in diesem Zusammenhang ferner, inwiefern **Umweltbelange** auf der Grundlage des § 48 Abs. 2 BBergG im Bergrecht Berücksichtigung finden. Nach verbreiteter Einschätzung ist das BBergG hinsichtlich der Verarbeitung der Umweltbelange defizitär.³⁶¹ *Kühne*³⁶² hat hierzu bereits im Jahr 1989 die historische Entwicklung des Umweltschutzgedankens im Bergrecht aufgezeigt. Im Laufe der letzten 25 Jahre hat das BVerwG die mit einer schwierigen Entstehungsgeschichte behaftete Bestimmung des § 48 Abs. 2 BBergG in mehreren Entscheidungen zu einer praktikablen Grundlage auch für die angemessene Berücksichtigung von Umweltbelangen ertüchtigt.³⁶³ Zu erinnern ist insbesondere an die Altenberg-Entscheidung von 1986 (Integration von § 48 Abs. 2 in das Betriebsplanverfahren, Berücksichtigung von Belangen des Immissionsschutzes)³⁶⁴, das Moers-Kapellen-Urteil von 1989 (Einführung des individuellen Drittschutzes)³⁶⁵, die Tongruben II-Entscheidung von 2005 (Berücksichtigung von Belangen des Abfall- und des Bodenschutzrechts)³⁶⁶ oder die Garzweiler II-Entscheidung von 2006 (Eignung von § 48 Abs. 2 als Raumordnungsklausel).³⁶⁷

In jüngster Zeit hat insbesondere die in Politik und Gesellschaft geführte Diskussion um die Förderung von Kohlenwasserstoffen unter Einsatz hydraulischer Stimulation (Fracking) sowie das Garzweiler-Urteil des BVerfG vom 17.12.2013³⁶⁸ das bergrechtliche System in einen breiteren Fokus gerückt.

Ob der Gesetzgeber seinerseits die o. g. richterliche Rechtsfortbildung des BVerwG hinsichtlich der Gemeinwohlklausel des § 48 Abs. 2 BBergG, sowie die Diskussionen um eine stärkere Beteiligung der Öffentlichkeit im bergrechtlichen Verfahren zum Anlass nehmen wird, das Bergrecht moderat zu modifizieren und die genannten Rechtsfortbildungen zu kodifizieren, bleibt abzuwarten. Reformbedarf wird jedenfalls von verschiedenen Seiten vorgetragen.³⁶⁹ Hinzuweisen ist aber auch darauf, dass die

³⁶¹ So z.B. *Gaentzsch*, NVwZ 1989, 889, 896.

³⁶² *Kühne*, Die Entwicklung des Umweltschutzgedankens im Bergrecht, in: Jahrbuch des Umwelt- und Technikrechts 1989, Seite 165 ff.

³⁶³ *Kühne*, ZfB 2013, Seite 113 ff.

³⁶⁴ BVerwGE 74, 315 ff. = ZfB 1987, 60 ff.

³⁶⁵ BVerwGE 81, 329 ff. = NVwZ 1989, 1157; zum Drittschutz im Bergrecht siehe auch *Frenz*, NVwZ 2011, S. 86 ff.

³⁶⁶ BVerwGE 123, 247 ff. = NVwZ 2005, 954 ff.

³⁶⁷ BVerwGE 126, 205 ff. = NVwZ 2006, 1173 ff.

³⁶⁸ BVerfG, Urt. v. 17. 12. 2013 – 1 BvR 3139/08, 1 BvR 3386/08, NVwZ 2014, 211.

³⁶⁹ Hinsichtlich der Landesparlamente siehe hierzu Kapitel 6.1.3; auch die damaligen Oppositionsfraktionen im 17. Deutschen Bundestag (Bündnis 90/Die Grünen (BT-Drs. 17/8133 sowie 17/9390), Die LINKE (siehe BT-Drs. 17/9034) und die SPD (siehe BT-Drs. 17/9560) haben jeweils Reformen im Bergrecht gefordert.

Industrie, die Gewerkschaft Bergbau, Chemie, Energie sowie manche Bergbehörden vor den damals vorgetragenen Änderungen des Bergrechts, das sich mit seinen Schutz- und Vorsorgeanforderungen für Umwelt und Betroffene bewährt habe, waren.³⁷⁰

Wünschenswert wäre aus diesseitiger Sicht aber eine gesetzgeberische Klarstellung in § 1 BBergG durch eine Ergänzung des Gesetzeszwecks um den Schutz der „Umwelt“. Denkbar wäre bspw. die Formulierung

„Zweck dieses Gesetzes ist es,

- 1. zur Sicherung der Rohstoffversorgung das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen unter Berücksichtigung ihrer Standortgebundenheit und des Lagerstättenschutzes bei sparsamem und schonendem Umgang mit Grund und Boden zu ordnen und zu fördern,*
- 2. die Sicherheit der Betriebe und der Beschäftigten des Bergbaus zu gewährleisten sowie*
- 3. die Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus bergbaulicher **Tätigkeit für die Umwelt sowie** für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter ergeben, zu verstärken und den Ausgleich unvermeidbarer Schäden zu verbessern.“*

Aber auch die Zweckbestimmung des § 1 Abs. 1 BImSchG (*„Zweck dieses Gesetzes ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen.“*) könnte in Teilen als Vorbild für eine Ergänzung des § 1 BBergG dienen.

Auch Wortlaut des § 48 Abs. 2 BBergG, dessen tatsächliche Bedeutung als materielle Norm der Gesamtabwägung für widerstreitende Interessen, aber auch als Berücksichtigungsgebot z. B. des Umweltrechts bei der Betriebsplanzulassung, sich nur aus der Rechtsprechung ergibt, sollte geändert werden. Hier ist zu überlegen, ob nicht eine klare Bestimmung in Anlehnung an § 6 Absatz 1 BImSchG (sonstige öffentlich-

³⁷⁰ Am 23.05.2012 fand hierzu eine öffentliche Anhörung des Bundestags-Ausschusses für Wirtschaft und Technologie statt. Die entsprechenden Unterlagen und Videoaufzeichnungen finden sich im Textarchiv des Deutschen Bundestages (<https://www.bundestag.de/dokumente/textarchiv>).

rechtliche Vorschriften dürfen der Errichtung und dem Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen) vorzugswürdig ist.

6.2.5.3 Betriebspläne

Nach § 51 Abs. 1 Satz 1 BBergG dürfen Aufsuchungsbetriebe, Gewinnungsbetriebe und Betriebe zur Aufbereitung nur auf Grund von Plänen (Betriebsplänen) errichtet, geführt und eingestellt werden, die vom Unternehmer aufgestellt und von der zuständigen Behörde zugelassen worden sind. Zum Betrieb gehören auch die in § 2 Abs. 1 BBergG bezeichneten Tätigkeiten und Einrichtungen.

Das BBergG kennt fünf verschiedene Betriebspläne: den Hauptbetriebsplan, den Rahmenbetriebsplan, den Sonderbetriebsplan, den Abschlussbetriebsplan und den gemeinschaftlichen Betriebsplan.

Nach § 52 Abs. 1 Satz 1 BBergG sind für die Errichtung und Führung eines Betriebes **Hauptbetriebspläne** für einen in der Regel zwei Jahre nicht überschreitenden Zeitraum aufzustellen. Die zuständige Behörde kann gemäß § 52 Abs. 2 BBergG verlangen, dass

1. für einen bestimmten längeren, nach den jeweiligen Umständen bemessenen Zeitraum **Rahmenbetriebspläne** aufgestellt werden, die allgemeine Angaben über das beabsichtigte Vorhaben, dessen technische Durchführung und voraussichtlichen zeitlichen Ablauf enthalten müssen;
2. für bestimmte Teile des Betriebes oder für bestimmte Vorhaben **Sonderbetriebspläne**³⁷¹ aufgestellt werden.

Rahmen- und Sonderbetriebspläne haben insofern nur eine ergänzende oder entlastende Funktion. Sie können den Hauptbetriebsplan nicht ersetzen.³⁷² Das Gesetz enthält auch keine generelle zeitliche Begrenzung des von Rahmen- oder Sonderbetriebsplan umfassten Zeitraums. Dem Unternehmer steht es von den Fällen eines

³⁷¹ Das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Niedersachsen, welches Bergbehörde für die Länder Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen und Niedersachsen ist, hat bspw. durch Rundverfügung vom 31.10.2012 mit dem Titel „*Mindestanforderungen an Betriebspläne, Prüfkriterien und Genehmigungsablauf für hydraulische Bohrlochbehandlungen in Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Niedersachsen*“ (Az. L1.5/L67911-04/2012-0003) festgelegt, wie die dort fixierten Anforderungen und Abläufe in einem Sonderbetriebsplan gemäß § 52 Abs. 2 Nr. 2 BBergG beschrieben werden sollen.

³⁷² Vgl. *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 52 Rn. 3

obligatorischen Rahmenbetriebsplans oder eines entsprechenden behördlichen Verlangens grundsätzlich frei, einen Rahmenbetriebsplan oder Sonderbetriebspläne nach den von ihm gesehenen Erfordernissen zur Zulassung bei der Behörde einzureichen.³⁷³

Nach § 52 Abs. 2a BBergG ist die **Aufstellung eines Rahmenbetriebsplanes zu verlangen** und für dessen Zulassung ein Planfeststellungsverfahren nach Maßgabe der §§ 57a und 57b durchzuführen, **wenn ein Vorhaben nach § 57c einer Umweltverträglichkeitsprüfung bedarf**. Die zuständige Behörde soll mit dem Unternehmer auf der Grundlage des Verlangens Gegenstand, Umfang und Methoden der Umweltverträglichkeitsprüfung sowie sonstige für die Durchführung dieser Prüfung erhebliche Fragen erörtern; hierzu können andere Behörden, Sachverständige und Dritte hinzugezogen werden. Anforderungen eines vorsorgenden Umweltschutzes, die sich bei der Umweltverträglichkeitsprüfung ergeben und über die Zulassungsvoraussetzungen des § 55 BBergG sowie der auf das Vorhaben anwendbaren Vorschriften in anderen Gesetzen hinausgehen, sind dabei öffentliche Interessen im Sinne des § 48 Abs. 2 BBergG.

6.2.5.3.1 UVP-Pflicht

Welche bergbaulichen Vorhaben UVP-pflichtig sind, bestimmt sich nach der auf der Grundlage des § 57 c Satz 1 Nr. 1 BBergG erlassenen **UVP-V Bergbau**³⁷⁴. Die UVP-V Bergbau stellt in Verbindung mit den §§ 4, 18 des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) eine Sonderregelung für die UVP in bergbaulichen Vorhaben dar, die der unmittelbaren Abwendung des UVPG vorgeht.

Eine UVP-Pflicht besteht derzeit zum einen gemäß § 1 Nr. 8 UVP-V Bergbau für Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme ab 1000 m Teufe, sofern sie in ausgewiesenen Naturschutzgebieten, europäischen Vogelschutzgebieten oder FFH-Gebieten liegen. Bemühungen diese Vorschrift so zu ändern, dass diese Bohrungen zur Gewinnung von Erdwärme ab 1000 m Teufe unabhängig davon, ob sie in den vorge-

³⁷³ Vgl. *Boldt/Weller*, Kommentar zum BBergG, § 52 Rn. 6.

³⁷⁴ Basierend auf der Ermächtigungsgrundlage des § 57 c Satz 1 Nr. 1 BBergG wurde die Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Vorhaben vom 13. 7. 1990 erlassen, zuletzt geändert durch Artikel 8 der Verordnung zur Neufassung und Änderung von Vorschriften auf dem Gebiet des Energiewirtschaftsrechts sowie des Bergrechts vom 3. September 2010 (BGBl. I S. 1261).

nannten Gebieten stattfinden, der UVP-Pflicht zu unterwerfen, haben bislang keinen Erfolg gehabt.³⁷⁵

Zum anderen unterliegen betriebsplanpflichtige Vorhaben oder Maßnahmen auch dann gemäß § 1 Nr. 9 UVP-V Bergbau der UVP-Pflicht, soweit diese Vorhaben oder Maßnahmen als solche nach Maßgabe der Anlage 1 (Liste "UVP-pflichtige Vorhaben") zum UVPG der Umweltverträglichkeitsprüfung bedürfen und ihrer Art oder Gruppe nach nicht unter die Nummern 1 bis 8 fallen.³⁷⁶

In Nr. 13.3 der Anlage 1 zum UVPG wird u. a. das *Entnehmen, Zutagefördern oder Zutageleiten von Grundwasser* mit einem jährlichen Volumen an Wasser von mehr als 5000 m³ einer gestaffelten UVP-Pflicht (je nach Menge standortbezogene Vorprüfung des Einzelfalls gemäß § 3c Satz 2 UVPG, allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls gemäß § 3c Satz 1 UVPG oder generelle UVP-Pflicht des Vorhabens) unterworfen. Bei einer Fördermenge des Grundwassers von 50 l/s ergäbe sich eine theoretische Fördermenge von 31.536 m³ im Jahr, was nach Nr. 13.3.3 nur dann zu einer Pflicht einer standortbezogenen Vorprüfung des Einzelfalls (nach § 3c Satz 2 UVPG) führen würde, wenn durch die Gewässerbenutzung erhebliche nachteilige Auswirkungen auf grundwasserabhängige Ökosysteme zu erwarten sind.

Es stellt sich allerdings die Frage, ob der Auffangtatbestand in § 1 Nr.9 UVP-V Bergbau durch die vorgenannte spezielle Regelung in § 1 Nr. 8 UVP-V Bergbau für Erdbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme überhaupt anwendbar ist. Dagegen spricht die Begründung der der Änderungsverordnung, mit der die Nr. 9 eingefügt wurde. Danach sollen, sofern ein Vorhaben sowohl in Anlage 1 zum UVPG als auch nach § 1 Nr. 1 - 8 UVP-V Bergbau aufgeführt ist, die Kriterien der UVP-V Bergbau für die UVP-Pflicht als spezialgesetzlich geregelte Bestimmung mit Ausschlusswirkung vorgehen.³⁷⁷

Die bisherige UVP-Richtlinie 2011/92/EU, die „Erdwärme“ bereits in Art. 4 Abs. 2 i. V. m. Anhang II Nr. 2 d) i) als Projekt nennt, bei dem die Mitgliedstaaten bestimmen,

³⁷⁵ Siehe dazu den Antrag des Landes Rheinland-Pfalz (BR-Drs. 478/10).

³⁷⁶ Nach *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe - Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, Seite 535, 538 könnte dies bei tiefengeothermischen Anlagen etwa dann der Fall sein, wenn die gewonnene Wärme in Rohrleitungen und unter Einsatz wassergefährdender Stoffe transportiert werden soll, vgl. Ziff. 19.3 oder 19.7 der Anlage 1 zum UVPG.

³⁷⁷ Vgl. *Beckmann* in Hoppe/Beckmann, Kommentar zum UVPG, § 18 Rn. 24 mit Verweis auf die Begründung zur zweiten Verordnung zur Änderung bergrechtlicher Verordnungen (BR-Drs. 251/05, Seite 21 f.).

ob das Projekt einer UVP gemäß den Artikeln 5 bis 10 unterzogen werden muss, enthält einen deutlichen Auftrag an die Nationalstaaten, diese Entscheidung anhand einer Einzelfalluntersuchung oder anhand der von den Mitgliedsstaaten festgelegten Schwellenwerte bzw. Kriterien zu treffen. Auch eine Kombination dieser Verfahren ist möglich. Die bisherige Umsetzung der UVP-Pflicht für Tiefbohrungen zur Gewinnung von Erdwärme in § 1 Nr. 8 UVP-V Bergbau dürfte in diesem Zusammenhang nicht richtlinienkonform sein. Erforderlich wäre eine Vorprüfung des Einzelfalls, ob für ein konkretes Projekt am jeweiligen Standort eine UVP durchgeführt werden muss.

Die derzeitige Diskussion der Erweiterung der UVP-Pflicht für Tiefbohrungen ist mit Augenmaß zu führen. In diesem Zusammenhang steht neben der nationalen Diskussion³⁷⁸ auch die Änderung der derzeitigen UVP-Richtlinie auf europäischer Ebene an.³⁷⁹ Der Regelungsentwurf des BMU/BMWi vom 25.02.2013 sah eine obligatorische UVP für Tiefbohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme ab 1000 m Teufe mit Aufbrechen von Gestein unter hydraulischem Druck vor. Hierbei stellt sich aber die Frage, was unter „Aufbrechen von Gestein unter hydraulischem Druck“ zu verstehen ist. Folgende Auslegungen der Regelung scheinen möglich:

- Hydraulischer Druck muss zum Zwecke des Aufbrechens von Gestein angewendet werden (mechanischer Prozess),
- Chemische Stimulation/Säurebehandlung wäre bei einer solchen Auslegung nicht UVP-pflichtig,
- UVP-Pflicht aber bei hydraulischem Fracking ohne chemische Zusätze.

³⁷⁸ Siehe zu den Diskussionen in der Länderparlamenten und entsprechenden Gesetzgebungsvorschlägen Kapitel 6.1.3. Auf Bundesebene haben das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit Datum vom 25.02.2013 einen gemeinsamen Vorschlag zur Änderung der UVP-V Bergbau und des WHG vorgelegt, der zusätzlich zur bisherigen Regelung eine UVP-Pflicht bei Tiefbohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme ab 1000 Metern Teufe „mit Aufbrechen von Gestein unter hydraulischem Druck“ (§ 1 Nr. 8 b) UVP-V Entwurf) vorsieht.

³⁷⁹ Ende 2012 hat die EU-Kommission ein Verfahren zur Änderung der UVP-Richtlinie 2011/92/EU auf den Weg gebracht. Ziel dieses Vorschlages war es, erkannte Mängel in der Richtlinie zu beseitigen, ökologische und sozioökonomische Veränderungen und Herausforderungen zu berücksichtigen und die Grundsätze intelligenter Rechtsetzung zu verwirklichen. Die Beurteilung von Umweltauswirkungen auf nationaler Ebene sollte verbessert, die UVP-RL vereinfacht werden. In seiner Beschlussfassung vom 13.12.2013 hat das Europäische Parlament die Regelungsvorschläge in einigen Punkten nicht unerheblich verschärft. Das nach ablehnender Stellungnahme des Europäischen Rates zum Beschluss des Europäischen Parlaments erforderliche Trilog-Verfahren endete am 19.12.2013 mit einer Einigung, der das Europäische Parlament in seiner Sitzung vom 12.03.2014 zugestimmt hat. Nach der Zustimmung des Europäischen Rates konnte die UVP-Änderungsrichtlinie in Kraft treten. Sie ist inzwischen als Richtlinie 2014/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.04.2014 zur Änderung der Richtlinie über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten im Amtsblatt der EU veröffentlicht (ABI L 124 vom 25.04.2014, S. 1).

In diesem Zusammenhang wäre des Weiteren fraglich, ob diese unterschiedliche Behandlung der Stimulationstechniken sachlich begründbar wäre.

Der Regelungsentwurf des Bundesrats vom 14.12.2012 (BR-Drs. 747/12) sah eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls nach § 3c UVPG für jede Tiefbohrung zur Gewinnung von Bodenschätzen vor, bei denen das Gestein zur Erhöhung der Fließrate mit hydraulischem Druck aufgebrochen wird.

Zu bedenken ist, dass die behördliche Entscheidung nach einer allgemeinen Vorprüfung des Einzelfalls keine UVP durchzuführen – und damit auch auf Öffentlichkeitsbeteiligung, Planfeststellungsverfahren und Rahmenbetriebsplan zu verzichten – gemäß § 3a Satz 4 UVPG gerichtlich nur eingeschränkt überprüfbar ist (Beurteilungsspielraum der Behörde).

Alles in allem sollte bei der Entscheidung für eine Erweiterung der UVP-Pflicht für Tiefbohrungen insbesondere auf Wertungswidersprüche geachtet werden. Insofern sei nochmals auf die Liste der UVP-pflichtigen Vorhaben nach Anlage 1 zum UVPG und speziell die Nr. 13.3.3 hingewiesen. Ferner ist nicht klar, warum die UVP-Pflicht für eine Tiefbohrung in einem Naturschutz-, Vogelschutz- und FFH-Gebieten erst ab einer Teufe von 1000 Metern besteht. Der mit der Ausweisung dieser Gebiete verbundene Schutzgedanke sollte auch bei einer geringeren Teufe Beachtung finden.

Es bleibt abzuwarten, wie der Gesetzgeber die Änderung der UVP-V Bergbau letztlich ausgestalten wird.

6.2.5.3.2 Zulassung des Betriebsplans

Die Zulassung eines Betriebsplanes im Sinne des § 52 BBergG ist zu erteilen, wenn die in § 55 Abs. 1 BBergG genannten Zulassungsvoraussetzungen (u. a. *„die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern, Beschäftigter und Dritter im Betrieb, insbesondere durch die den allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik entsprechenden Maßnahmen, sowie dafür getroffen ist, dass die für die Errichtung und Durchführung eines Betriebes auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder geltenden Vorschriften und die sonstigen Arbeitsschutzvorschriften eingehalten werden“* (§ 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 BBergG); *„die anfallenden Abfälle ordnungsgemäß verwendet oder beseitigt werden“* (§ 55 Abs. 1 Satz 1

Nr. 6 BBergG); „*gemeinschädliche Einwirkungen der Aufsuchung oder Gewinnung nicht zu erwarten sind*“ (§ 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 9 BBergG)) erfüllt sind.

Besonders der Begriff der „gemeinschädlichen Einwirkungen“ ist über die Jahre hinweg in Literatur und Rechtsprechung diskutiert und weiterentwickelt worden. Er wurde aus dem Allgemeinen Berggesetz für die preußischen Staaten (ABG) in das BBergG übernommen. Das BBergG definiert wie seine Vorgänger den Begriff des „Gemeinschadens nicht, allerdings geht die Begründung zum BBergG davon aus, dass seine Definition „im Wesentlichen als gesichert gelten kann“.³⁸⁰ Eine Abgrenzung ist vor allem auch zum Begriff des „öffentlichen Interesses“ i. S. des § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG von Bedeutung. Bei gemeinschädlichen Einwirkungen ist die Zulassung zu versagen, sofern ihnen nicht mit Nebenbestimmungen begegnet werden kann. Bei entgegenstehenden öffentlichen Interessen i. S. von § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG kann das Vorhaben nach Abwägung dennoch zugelassen werden. Im Vergleich zu § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG hat § 55 Abs. 1 Nr. 9 BBergG eine höhere Schadenskomponente.³⁸¹ In der Praxis sind zwei große Kategorien zu unterscheiden, in denen die Frage nach dem Gemeenschaden auftritt: Die Beschädigung von privaten Sachen und die Beschädigung von öffentlichen Sachen.

Bei der Beschädigung von privaten Sachen ist ein Gemeenschaden sehr selten anerkannt worden.³⁸² Nach der gesetzgeberischen Grundentscheidung zum Verhältnis Bergbau – Grundeigentum wurde dem öffentlichen Interesse an der Aufsuchung und Gewinnung von Bodenschätzen der Vorzug gegeben. Nachdem der Gesetzgeber grundsätzlich in den §§ 110 ff. BBergG, den Regelungen zum Bergschadensrecht³⁸³, zwischen Grundstückseigentum und Bergbau abgewogen hat, kann die Behörde diese Abwägung nicht nochmals im Betriebsplanverfahren durchführen.³⁸⁴

Bei der Beschädigung von öffentlichen Sachen wird häufiger von einem Gemeenschaden ausgegangen werden können. Beispiele sind die Grundwasserentziehung

³⁸⁰ Vgl. BT-Drs. 8/1315, Seite 111. Danach liegt ein Gemeenschaden nicht schon dann vor, wenn ein einzelner geschädigt wird, sondern es muss ein Schaden in einem solchen Umfang drohen, dass er sich auf das Allgemeinwohl auswirkt (z. B. Wasserentzug für Ortschaften, gefährliche Bodensenkungen in dichtbesiedelten Gebieten).

³⁸¹ *Pienschulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 55 Rn. 287 mit Verweis auf *Frenz*, UPR 2005, Seite 2).

³⁸² *Pienschulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 55 Rn. 288 mit weiteren Nachweisen.

³⁸³ Siehe hierzu Punkt 6.2.13.2.2.

³⁸⁴ *Pienschulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 55 Rn. 306 mit weiteren Nachweisen. Der einzige Anknüpfungspunkt für eine Abwägung zwischen bergbaulichen und außerbergbaulichen öffentlichen Interessen ist die in § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG enthaltene Abwägungsklausel. Siehe hierzu Punkt 6.2.5.2.

bei einer Wasserversorgungsanlage, ohne dass hinreichende Abhilfe durch eine künstliche Wasserleitung erstellt wird, sowie die Gefährdung von Heil- und Mineralquellen. Für die Annahme eines „Gemeinschadens“ bei bergbaulichen Einwirkungen auf öffentliche Sache waren häufig Sicherheits- und Versorgungsgesichtspunkte entscheidend. So musste der Abbau unter den Bassins der städtischen Wasserversorgungsanstalt eingestellt werden, ohne dass der Bergbau sich darauf berufen konnte, die Wasserversorgung könne von einem anderen Ort aus betrieben werden.³⁸⁵

Den Nachweis eines entsprechenden Bedarfs an Bodenschätzen als Voraussetzung für die Zulassung eines Betriebsplans fordert das BBergG nicht.³⁸⁶

Nach § 56 Abs. 1 Satz 1 BBergG bedarf die Zulassung eines Betriebsplanes der Schriftform. Die nachträgliche Aufnahme, Änderung oder Ergänzung von Auflagen ist nach § 56 Abs. 1 Satz 2 BBergG zulässig, wenn sie

1. für den Unternehmer und für Einrichtungen der von ihm betriebenen Art wirtschaftlich vertretbar und
2. nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik erfüllbar

sind, soweit es zur Sicherstellung der Voraussetzungen nach § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 bis 13 und Absatz 2 BBergG erforderlich ist.

Nach § 56 Abs. 2 BBergG kann die zuständige Behörde die Zulassung von der Leistung einer Sicherheit abhängig machen, soweit diese erforderlich ist, um die Erfüllung der in § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 bis 13 und Abs. 2 genannten Voraussetzungen zu sichern. Der Nachweis einer entsprechenden Versicherung des Unternehmers mit einem im Geltungsbereich dieses Gesetzes zum Geschäftsbetrieb zugelassenen Versicherer darf von der zuständigen Behörde als **Sicherheitsleistung** nur abgelehnt werden, wenn die Deckungssumme nicht angemessen ist. Über die Freigabe einer gestellten Sicherheit entscheidet die zuständige Behörde. Nach § 56 Abs. 3 gelten die Absätze 1

³⁸⁵ Piens/Schulte/Graf Vitzthum, BBergG, § 55 Rn. 297 mit weiteren Nachweisen.

³⁸⁶ Hierfür plädieren allerdings einige Befürworter einer Reform des Bergrechts, um die Rechtsstellung von Naturschutzbelangen im Bergrecht stärker auszuprägen. Vgl. u. a. SRU, Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt, 2012, Seite 83 f., 92.

und 2 für die Verlängerung, Ergänzung oder Änderung eines Betriebsplanes entsprechend.

6.2.5.3.2.1 Rechtsnatur der Zulassung

Die Betriebsplanzulassung wird rechtlich als präventives Verbot mit Erlaubnisvorbehalt eingestuft.³⁸⁷ Beim präventiven Verbot mit Erlaubnisvorbehalt ist die Erteilung der Erlaubnis der Normalfall. Die Einschaltung der Bergbehörde in Form der Zulassung des Betriebsplans hat den Zweck, im Interesse anderer zu schützender Rechte und Rechtsgüter ein vorbeugendes Kontrollinstrument einzuräumen. Die Zulassung des Betriebsplans trifft die Feststellung, dass das Vorhaben die gesetzlichen Zulassungsvoraussetzungen nach den §§ 55, 48 Abs. 2 BBergG erfüllt. Insofern ist sie ein **gebundener Verwaltungsakt**, da sie bei Vorliegen der gesetzlichen Voraussetzungen erteilt werden muss und notfalls durch Verpflichtungsklage geltend gemacht werden kann. Der Bergbehörde steht bei ihrer Entscheidung eine planerische Gestaltungsfreiheit oder ein Ermessen nicht zu. Inwiefern die Zulassung einen Verwaltungsakt mit Drittwirkung darstellt, ist komplex und wurde erst im Laufe der Jahre durch die Rechtsprechung³⁸⁸ herausgearbeitet und fortentwickelt.

6.2.5.3.2.2 Wirkung der Zulassung

Die Wirkung der Zulassung ist je nach den einzelnen Betriebsplanarten unterschiedlich. So hat die Zulassung des Hauptbetriebsplans Gestaltungswirkung, d. h. sie berechtigt zur Durchführung der Abbautätigkeit. Für Vorhaben, derentwegen noch Sonderbetriebspläne aufgestellt werden müssen, folgt aus der Zulassung des Hauptbetriebsplans nur ihre grundsätzliche Zulassung. Diese erfolgt vorbehaltlich einer nochmaligen Detailplanung im Sonderbetriebsplan und dessen gesonderter Prüfung und Zulassung. Endgültig dagegen ist die Zulassung des Hauptbetriebsplans für die Maßnahmen, für die keine Sonderbetriebspläne mehr vorzulegen sind.³⁸⁹ Nach § 52 Abs. 1 Satz 1 BBergG sind Hauptbetriebspläne für einen in der Regel zwei Jahre nicht überschreitenden Zeitraum aufzustellen.

³⁸⁷ Vgl. *Piens/Schulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 56 Rn. 8 mit weiteren Nachweisen.

³⁸⁸ Siehe hierzu die Ausführungen zu § 48 BBergG im Abschnitt 6.2.5.1.6.

³⁸⁹ *Piens/Schulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 56 Rn. 48.

Die Wirkung der Zulassung eines fakultativen Rahmenbetriebsplans wird unterschiedlich gesehen.³⁹⁰ Die Ansichten reichen von einer Einstufung als vorbescheidsähnlichen Verwaltungsakt, einem vorläufigen positiven Gesamturteil, wie es der 1. Teilgenehmigung im Bundesimmissionsschutzgesetz oder Atomgesetz zuerkannt wird, bis zu einem Vergleich mit der Zusicherung i. S. des § 38 VwVfG. Die Rechtsprechung des BVerwG hat früher die Wirkungen der Zulassung von Rahmenbetriebsplänen verhältnismäßig eng gezogen. Der Regelungsgehalt erschöpfte sich demnach in der Feststellung, dass das beabsichtigte Vorhaben die in §§ 55, 48 Abs. 2 BBergG genannten Zulassungsvoraussetzungen erfüllt. In der neueren Rechtsprechung des BVerwG ist eine Tendenz zur Verstärkung der Bindungswirkung zu erkennen. Dabei sind die verschiedenen Seiten hinsichtlich der Bindungswirkung zu betrachten und zu unterscheiden: Die Behörde, der Bergbauunternehmer sowie der Grundeigentümer.

Die Wirkung der Zulassung eines obligatorischen Rahmenbetriebsplans ist im Vergleich zu den Planfeststellungsbeschlüssen i. S. von § 75 VwVfG beschränkt. Zwar findet gemäß § 5 BBergG der § 75 VwVfG auch auf die Zulassung des obligatorischen Rahmenbetriebsplans Anwendung. Dies aber nur, soweit im BBergG nichts anderes bestimmt ist. Nach §§ 52 Abs. 1, Abs. 2a, 57a BBergG ist die Zulassung eines Rahmenbetriebsplans nicht mit Genehmigungswirkung ausgestattet. Sie gibt die Maßnahmen nicht frei, sondern stellt lediglich ihre Zulässigkeit fest. Auch die Gestaltungswirkung, die die öffentlich-rechtlichen Beziehungen zwischen dem Vorhabensträger und den durch das Vorhaben in ihren Rechten Betroffenen regelt, ist gemäß § 57a Absatz 4 Satz 2 BBergG insofern eingeschränkt, als dass sich das Verhältnis zwischen Unternehmer und Betroffenen und der Schutz von Belangen Dritter im Sinne des Bergrechts nach den dafür geltenden Vorschriften des BBergG bestimmen.

6.2.5.3.3 Zulassung eines Abschlussbetriebsplans

Nach § 53 Abs. 1 Satz 1 BBergG ist für die Einstellung eines Betriebes ist ein Abschlussbetriebsplan aufzustellen, der eine genaue Darstellung der technischen Durchführung und der Dauer der beabsichtigten Betriebseinstellung, den Nachweis, dass die in § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 bis 13 und Absatz 2 bezeichneten Voraussetzungen erfüllt sind, und in anderen als den in § 55 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 genannten Fällen auch Anga-

³⁹⁰ Vgl. *Pienschulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 56 Rn. 52 ff. mit weiteren Nachweisen.

ben über eine Beseitigung der betrieblichen Anlagen und Einrichtungen oder über deren anderweitige Verwendung enthalten muss.

Für die Erteilung der Zulassung eines Abschlussbetriebsplanes gilt § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2 bis 13 mit der Maßgabe entsprechend, dass

1. der Schutz Dritter vor den durch den Betrieb verursachten Gefahren für Leben und Gesundheit auch noch nach Einstellung des Betriebes sowie
2. die Wiedernutzbarmachung der Oberfläche in der vom einzustellenden Betrieb in Anspruch genommenen Fläche sichergestellt sein müssen.

Soll der Betrieb nicht endgültig eingestellt werden, so darf die Erfüllung der in Satz 1 genannten Voraussetzungen nur insoweit verlangt werden, als dadurch die Wiederaufnahme des Betriebes nicht ausgeschlossen wird.

Nach § 69 Abs. 2 BBergG endet die Bergaufsicht nach der Durchführung des Abschlussbetriebsplanes (§ 53 BBergG) oder entsprechender Anordnungen der zuständigen Behörde (§ 71 Abs. 3 BBergG) zu dem Zeitpunkt, in dem nach allgemeiner Erfahrung nicht mehr damit zu rechnen ist, dass durch den Betrieb Gefahren für Leben und Gesundheit Dritter, für andere Bergbaubetriebe und für Lagerstätten, deren Schutz im öffentlichen Interesse liegt, oder gemeinschädliche Einwirkungen eintreten werden.

Wie bereits unter Punkt 6.2.5 erläutert, wird das Verhältnis des BBergG zu den Umweltbelangen als reformbedürftig angesehen. Die zu den §§ 48, 55 BBergG getätigten Aussagen gelten auch im Bereich eines Abschlussbetriebsplanes. Lediglich über die von der Rechtsprechung fortentwickelte Systematik der Berücksichtigung außerbergrechtlicher Belange, finden Umweltbelange Berücksichtigung im Kontext der Einstellung eines bergrechtlichen Betriebes.

Daher sollte überprüft werden, ob die Nachsorgepflichten bei abgeschlossenen Bergbaumaßnahmen – auch im Hinblick auf die Überwachung – ausreichend sind.³⁹¹ Insofern könnten Anleihen aus § 5 Absatz 3 BImSchG, unter Umständen auch aus §§ 40, 43 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), nützlich sein.

³⁹¹ Zur Versiegelung der Bohrungen und zur Langzeitdichtigkeit siehe u. a. *Schilling*, Kurzgutachten - Bohrung, Verrohrung und Zementierung, Seite 29 ff. Siehe hierzu auch Kapitel 3.5.

6.2.5.3.4 Bekanntmachung des Vorhabens, Behördenbeteiligung

Das bergrechtliche Betriebsplanverfahren für die Errichtung und den Betrieb einer Geothermieanlage ist als solches nicht öffentlich, d. h. der Antrag auf Zulassung eines Betriebsplanes wird nicht öffentlich bekannt gemacht und nicht ausgelegt. Wird durch die in einem Betriebsplan vorgesehenen Maßnahmen der Aufgabenbereich anderer Behörden oder der Gemeinden als Planungsträger berührt, so sind diese vor der Zulassung des Betriebsplanes durch die zuständige Behörde zu beteiligen (§ 54 Abs. 2 Satz 1 BBergG). Hiervon abgesehen enthält das BBergG keine weiteren Bestimmungen über die Beteiligung Dritter am Betriebsplanverfahren. Nach § 5 BBergG ist auf die Ausführung des BBergG und der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen Rechtsverordnungen, soweit in diesem Gesetz nichts anderes bestimmt ist, das Verwaltungsverfahrensgesetz anzuwenden. In diesem Zusammenhang bleibt abzuwarten, wie sich der durch das Gesetz zur Verbesserung der Öffentlichkeitsbeteiligung und Vereinheitlichung von Planfeststellungsverfahren (PIVereinHG) vom 31.5.2013 neu in das VwVfG eingefügte § 25 Abs. 3 VwVfG auswirkt. Nach dieser Regelung wirkt die Behörde darauf hin, dass der [Vorhabens-]Träger bei der Planung von Vorhaben, die nicht nur unwesentliche Auswirkungen auf die Belange einer größeren Zahl von Dritten haben können, die betroffene Öffentlichkeit frühzeitig über die Ziele des Vorhabens, die Mittel, es zu verwirklichen, und die voraussichtlichen Auswirkungen des Vorhabens unterrichtet (frühe Öffentlichkeitsbeteiligung).³⁹²

6.2.5.4 Spezielle Regelungen für Tiefbohrungen

Das BBergG enthält Verordnungszuständigkeiten sowohl für den Bund als auch für die Länder. Infolgedessen können teilweise von Bundesland zu Bundesland abweichende Regelungen gelten. Mit der Einheitlichkeit der Rechtsordnung und Verwaltungspraxis beschäftigen sich der Länderausschuss Bergbau (LAB) und dessen Fachausschüsse. Dennoch kann es vorkommen, dass sich trotz weitgehenden Konsenses in den Fachausschüssen eine einheitliche Umsetzung in den Ländern verzögert oder länderspezifische Sonderwege beschritten werden. Spezielle Regelungen für Tiefbohrungen finden sich insbesondere in spezifischen Tiefbohrverordnungen (BVOT) der

³⁹² Siehe hierzu die Ausführungen unter Punkt 6.2.1.2.4.

Bundesländer.³⁹³ Manche Bundesländer verzichten hingegen auf spezifische Tiefbohrverordnungen und haben stattdessen jeweils grundlegende (allgemeine) Bergverordnungen³⁹⁴ erlassen, die dann auch Vorschriften zu Tiefbohrungen enthalten.

Auf Beschluss des Länderausschusses Bergbau (LAB) in seiner 123. Sitzung am 09. Oktober 2003 wurde durch den Obmann des Arbeitskreises für Bergbehördliche Verordnung eine bundesländerübergreifende Arbeitsgruppe ins Leben gerufen, die den Auftrag erhielt, einen möglichst bundeseinheitlichen Textentwurf für eine Novelle der BVOT zu erarbeiten. An dieser Arbeitsgruppe beteiligten sich Vertreter der Bergbehörden aus Niedersachsen (auch für Schleswig-Holstein, Hamburg und Bremen), Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg (auch für Berlin), Sachsen-Anhalt, Bayern (nur teilweise) und Nordrhein-Westfalen.³⁹⁵

Die Überarbeitung der BVOT war notwendig geworden, da durch die Rechtssetzung des Bundes zahlreiche Vorschriften aufgehoben wurden, insbesondere durch die Betriebssicherheitsverordnung einige Vorschriften überholt sind und die Praxis - sowohl der Industrie als auch der Bergbehörden - Anpassungen erforderlich machten.

An die Überarbeitung wurden u. a. folgende Erwartungen geknüpft:

- Möglichst bundeseinheitliche Regelungen auf der Ermächtigungsgrundlage des BBergG, damit verbunden auch Einführung als Verordnung in allen Bundesländern,
- Entlastung des Betriebsplanverfahrens,
- Erhalt der „traditionellen“ Form und Verbesserung der Lesbarkeit und
- möglichst wenige Verweise auf andere Rechtsvorschriften.

Nach Abschluss des unter Federführung der Bergbehörde NRW (Abt. 8 - Dez. 86) im Frühjahr 2006 durchgeführten bundesweiten Beteiligungs- und Anhörungsverfahrens

³⁹³ Z.B. Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Nordrhein-Westfalen (Tiefbohrverordnung - BVOT) vom 31. Oktober 2006 (ABl. Arnberg 2006, Nr. 48 –Beilage); Bergverordnung des Oberbergamts für das Saarland und das Land Rheinland-Pfalz für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (Tiefbohrverordnung - BVOT) vom 15. Januar 2007 (ABl. des Saarlandes, Seite 154).

³⁹⁴ Siehe bspw. die Bayrische Bergverordnung (BayBergV) vom 6. März 2006 (GVBl. 2006, Seite 134 ff.) oder jüngst die Hessische Bergverordnung vom 30. August 2012 (GVBl. 2012, Seite 277 ff.).

³⁹⁵ Siehe Rundverfügung der Abteilung Bergbau und Energie in NRW der Bezirksregierung Arnberg vom 30. November 2006, Geschäftszeichen - 86.01.31.2.4 - 2003 - 1.

der Sozialpartner wurde dem LAB der somit erarbeitete Textentwurf vorgelegt. Der LAB nahm auf seiner 128. Sitzung am 18.05.2006 den bundeseinheitlichen Entwurf einer Novelle der BVOT zustimmend zur Kenntnis und empfahl allen Bundesländern die Einführung der Verordnung. Die Bundesländer haben aber unterschiedlich darauf reagiert.³⁹⁶

Insbesondere im Bereich der Tiefbohrverordnungen (BVOT) wäre aber eine einheitliche Verordnungsgebung wünschenswert. Unterschiede finden sich bspw. in der Bezugnahme auf Technikstandards. Während nach der BVOT des Landes Nordrhein-Westfalen, der BVOT für das Saarland und das Land Rheinland-Pfalz oder der Bayerischen Bergverordnung (BayBergV) bei der Errichtung, dem Betreiben und den Prüfungen von Einrichtungen, Anlagen und Arbeitsmitteln die allgemein anerkannten Regeln der Technik³⁹⁷ zu berücksichtigen sind, verlangt die Hessische Bergverordnung die Berücksichtigung des Standes der Technik, also einen strengeren Maßstab. Es sollte erwogen werden, ob unter den Voraussetzungen der Art. 72 Abs. 2 und Art. 74 Abs. 1 Nr. 11 GG eine bundesrechtliche Zuständigkeit für eine Tiefbohrverordnung neu geschaffen oder bestehend mit § 68 Abs. 2 Nr. 3 BBergG begründet werden kann. Die bundesrechtliche Zuständigkeit und Umsetzung hätte den Vorteil, dass eine einheitliche Rechtslage in allen Bundesländern zeitgleich geschaffen würde. Dies wäre auch für Unternehmen, die in verschiedenen Bundesländern tätig sind, eine Vereinfachung. Bei einer bundeseinheitlichen Umsetzung könnte ggf. durch entsprechende Öffnungsklauseln auch ein Freiraum für länderspezifische Anpassungen an den praktischen Bedarf in den einzelnen Bundesländern³⁹⁸ bleiben.

³⁹⁶ Das Land Sachsen-Anhalt hat bspw. eine Technische Verfügung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen erlassen (Technische Verfügung Nr. 23/2007 des Landesamtes für Geologie und Bergwesen (LAGB) vom 18.09.2007 (Az.: StV-34019-0001-13607/2007)) erlassen. Die Verwaltungsvorschrift entspricht im Wortlaut der in Sachsen-Anhalt zur Einführung vorgesehenen „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Untergrundspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Sachsen-Anhalt (Tiefbohrverordnung – BVOT)“, die bis heute jedoch noch nicht in Sachsen-Anhalt erlassen wurde.

³⁹⁷ Auch in den §§ 16 Abs. 3 Nr. 2, 55 Abs. 1 Nr. 2, 56 Abs. 1 Nr. 2, 66 Nr. 9 und 133 Abs. 2 BBergG verlangt das BBergG zumindest wörtlich lediglich den (schwächeren) Standard der „allgemein anerkannten Regeln der (Sicherheits-) Technik“.

³⁹⁸ Beispielsweise könnten in den nördlichen, an Nord- und/oder Ostsee grenzenden Bundesländern Regelungen für den Offshore-Bereich getroffen werden.

6.2.5.5 Informationsaustausch der bergbaulichen Unternehmer im Bereich der Tiefengeothermie

Anlagen der Tiefengeothermie werden in Deutschland i. d. R. von kleineren regionalen oder kommunalen Unternehmen betrieben, die selbst selten mehr als eine oder zwei Anlagen dieser Art haben. Damit stellt sich die Frage nach dem systematischen Austausch von Betriebserfahrungen sowie deren Auswertung. Der Know-how-Transfer könnte signifikant dazu beitragen, die Verfügbarkeit der Anlagen durch die Reduzierung von Revisions- bzw. Stillstandszeiten zu verbessern. Ebenso kann durch ein systematisches Vorgehen bei Austausch und Auswertung das Sicherheitsniveau der Anlage gesteigert werden. Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse könnten allerdings dazu führen, dass über bestimmte Vorgänge und Probleme sowie deren Lösung nur sehr zurückhaltend kommuniziert wird.

In diesem Zusammenhang sollte nach diesseitiger Ansicht diskutiert werden, inwieweit ein verbindlicher Erfahrungsaustausch über (sicherheitstechnisch) bedeutsame Betriebserfahrungen zielführend erscheint und auf welcher Ebene (legislative oder sonstige Ebene) dieser verortet werden könnte.

Unterschiedliche Beispiele für Regelungen zum Wissensaustausch finden sich etwa in § 40 Kohlendioxid-Speicherungsgesetz (KSpG) und in § 4 Abs. 1 Nr. 6 Atomrechtliche Störfallmeldeverordnung (AtSMV). Eine Anzeigepflicht für sicherheitstechnisch bedeutsame „Betriebsereignisse“ enthält § 74 Abs. 3 BBergG.³⁹⁹ Hierbei ist allerdings fraglich, ob damit auch ein Erfahrungsaustausch über sicherheitstechnisch bedeutsame „Betriebserfahrungen“ erfasst ist. Unter einem „Ereignis“ versteht man vom allgemeinen Sprachgebrauch her einen besonderen, nicht alltäglichen Vorgang oder Vorfall, wohingegen man unter „Erfahrung“ eine bei praktischer Arbeit oder durch Wiederholen einer Sache gewonnene Kenntnis versteht. Insofern scheint es für einen Erfahrungsaustausch über sicherheitstechnisch bedeutsame Betriebserfahrungen, erst recht aber für einen „Wissensaustausch“, wie er sich in § 40 KSpG findet, im BBergG derzeit keine gesetzliche Grundlage zu geben. Auch die Verordnungsermächtigungen in den

³⁹⁹ Eine beispielhafte Aufzählung der Ereignisse von besonderer Bedeutung enthalten die Rundverfügungen des früheren Landesoberbergamts NRW vom 19.12.1954, 09.11.2001, 30.04.2004 (alle Sammelblatt LOBA NRW A7): Schwere Unfälle; Explosionen; Schlagwetter; bedeutende Gewässerverunreinigungen; Schadensfälle bei Transport oder Ablagerung von umweltgefährdenden Abfällen etc. Siehe hierzu auch *Piens/Schulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 74 Rn. 7 mit weiteren Nachweisen.

§§ 65 ff. BBergG bieten nach diesseitiger Ansicht keine Grundlage für eine entsprechende Regelung per Verordnung. Die Verordnungsermächtigungen der §§ 65 ff. BBergG gelten zum Schutze der in § 11 Nr. 8 und 9 bzw. § 55 Abs. 1 BBergG bezeichneten Rechtsgüter und Belange. Der Know-how-Transfer ist aber kein relevantes Schutzgut bzw. kein relevanter Belang in diesem Sinne.

Die §§ 65-67 BBergG müssen als zum Erlass von Rechtsverordnungen ermächtigende Gesetzesnormen hinsichtlich Inhalt, Zweck und Ausmaß der Ermächtigung bestimmt sein oder bestimmt werden können.⁴⁰⁰ Nicht erst aus der Verordnung, sondern bereits aus der Ermächtigung muss erkennbar und [im gewissen Maße] vorhersehbar sein, was vom Unternehmer verlangt wird. Der Gesetzgeber darf nicht das Wesentliche dem Verordnungsgeber überlassen.⁴⁰¹ Die besonderen Anforderungen an Rechtsverordnungen folgen aus Art. 80 GG. Fehlt eine Ermächtigung, wird sie überschritten oder steht die Verordnung mit ihr in Widerspruch, ist sie nichtig. Einzelne Vorschriften von Verordnungen können wegen Verletzung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit oder aus dem Gesichtspunkt des Übermaßes ungültig sein.

Eine öffentlich-rechtlich per Gesetz oder Verordnung statuierte Verpflichtung zum Wissensaustausch kann einen Eingriff in das **Recht am eingerichteten und ausgeübten Gewerbebetrieb** darstellen, ein auf dem Grundrechtsschutz der Art. 12 und 14 GG basierendes Auffangrecht, das sich auf die Sach- und Rechtsgesamtheit eines wirtschaftlichen Unternehmens bezieht⁴⁰². Der eingerichtete und ausgeübte Gewerbebetrieb umfasst alles, was in seiner Gesamtheit den wirtschaftlichen Wert des Betriebs als bestehender Einheit ausmacht. Hierzu zählt auch das Know-how.⁴⁰³ Es stellt sich somit die Frage, ob und wie ein solcher Eingriff legitimiert sein kann. Die Gesetzesbegründung zum Wissensaustausch in § 40 KSpG schweigt hierzu. Sie lautet: *„Die Evaluation soll untersuchen und bewerten, ob CCS für Deutschland eine technisch, wirtschaftlich machbare und vor allem auch umweltverträgliche Klimaschutzoption ist. Hierfür ist ein möglichst umfassender und allseitiger Erkenntnisgewinn in der Demonstrationsphase vonnöten. Die Verpflichtung zum Wissensaustausch wird den Dialog der Betreiber, Behörden und wissenschaftlichen Einrichtungen intensivieren und dazu bei-*

⁴⁰⁰ Vgl. Piens/Schulte/Graf Vitzthum, BBergG, § 68 Rn. 4.

⁴⁰¹ Piens/Schulte/Graf Vitzthum, BBergG, § 68 Rn. 4 mit Verweis auf BVerfGE 19, 362, Maunz/Dürig/Herzog, GG, Art. 80, Rn. 28.

⁴⁰² Siehe hierzu Sachs, Kommentar zum GG, Art. 14 Rn 26.

⁴⁰³ Vgl. Palandt/Sprau, BGB Kommentar, § 823 Rn. 127.

tragen, den Erkenntnisgewinn für die Evaluierung zu maximieren.“⁴⁰⁴ Alles in allem ist eine Legitimation des Eingriffs zwar denkbar, allerdings auch komplex in der konkreten Umsetzung. Hierfür wäre eine weitergehende Untersuchung in einem gesonderten Rechtsgutachten erforderlich und sinnvoll.

Einfacher erscheint hingegen eine Verpflichtung zum Wissensaustausch, die in einem Zuwendungsbescheid⁴⁰⁵ einer Projektförderung mit öffentlichen Mitteln enthalten ist. Hierin könnte ein taugliches Mittel zu sehen sein, den Zuwendungsempfänger, der die Förderung für ein Vorhaben der Tiefengeothermie beantragt, zur Auskunft über Erkenntnisse zu verpflichten, die bei der Durchführung des FE-Vorhabens entstanden sind, auch soweit sie nicht Bestandteil des FE-Ergebnisses sind.

Dass der Wissensaustausch eine zentrale Bedeutung bei der Fortentwicklung und weiteren Etablierung der Tiefengeothermie als Energieträger im Bereich der erneuerbaren Energien hat, zeigen auch aktuelle Bestrebungen, nach denen die bayrischen Projektgesellschaften der Tiefengeothermie künftig ihr Wissen über die Gegebenheiten im Untergrund in einer gemeinsamen geologischen Datenbank systematisch austauschen wollen.⁴⁰⁶

6.2.5.6 Zwischenergebnis Bergrecht

Die Systematik des deutschen Bergrechts bietet hinreichende Regelungen, sowohl um den bergfreien Bodenschatz „Erdwärme“ in einem geordneten Verfahren aufzusuchen und zu gewinnen sowie um die sach- und fachgerechte Errichtung und den Betrieb der Anlagen der Tiefengeothermie (gemeinsam mit den anderen fachgesetzlichen Regelungen) zu ordnen und einer Schutzgutverletzung vorzubeugen.

Dennoch erweist sich das Bergrecht an manchen Stellen – wie dargelegt – als reformbedürftig. Insbesondere die Berücksichtigung von Umwelt- und Ressourcenschutzbe-

⁴⁰⁴ Vgl. BT-Drs. 17/5750, Seite 52.

⁴⁰⁵ Einschließlich der Allgemeinen Bedingungen für Forschungs- und Entwicklungsverträge (wie etwa der ABFE-BMU).

⁴⁰⁶ Information auf der Seite des Wirtschaftsforums Geothermie (WFG), Beitrag März 2014: Tiefengeothermie-Branche baut geologische Datenbank auf; Quelle: Moderne Gebäudetechnik 3/2014 http://www.wirtschaftsforum-geothermie.de/front_content.php?idcat=85

langen sowie Aspekte der Öffentlichkeitsbeteiligung sollten sich im Gesetzestext widerspiegeln.

Wünschenswert wäre eine gesetzgeberische Klarstellung in § 1 BBergG durch eine Ergänzung des Gesetzeszwecks um den Schutz der „Umwelt“.

Auch der Wortlaut des § 48 Abs. 2 BBergG, dessen tatsächliche Bedeutung als materielle Norm der Gesamtabwägung für widerstreitende Interessen, aber auch als Berücksichtigungsgebot z. B. des Umweltrechts bei der Betriebsplanzulassung, sich nur aus der Rechtsprechung ergibt, sollte geändert werden. Hier ist zu überlegen, ob nicht eine klare Bestimmung in Anlehnung an § 6 Absatz 1 BImSchG (sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften dürfen Errichtung und Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen) vorzugswürdig ist.

Insbesondere im Bereich der Tiefbohrverordnungen (BVOT) wäre eine einheitliche Verordnungsgebung wünschenswert. Es sollte erwogen werden, ob unter den Voraussetzungen der Art. 72 Abs. 2 und Art. 74 Abs. 1 Nr. 11 GG eine bundesrechtliche Zuständigkeit für eine Tiefbohrverordnung neu geschaffen oder bestehend mit § 68 Abs. 2 Nr. 3 BBergG begründet werden kann.

Auch sollte dem Erfordernis des sich dynamisch weiter entwickelnden Standes der Technik normativ besser Rechnung getragen werden. Anders als beispielsweise im BImSchG verlangt das Bergrecht überwiegend (siehe u. a. §§ 16 Abs. 3 Nr. 2, 55 Abs. 1 Nr. 2, 56 Abs. 1 Nr. 2, 66 Nr. 9 und 133 Abs. 2 BBergG; §§ 3, 38 BayBergV) zumindest wörtlich lediglich den (schwächeren) Standard der „allgemein anerkannten Regeln der (Sicherheits-) Technik“.

Schließlich sollte überprüft werden, ob die Nachsorgepflichten bei abgeschlossenen Bergbaumaßnahmen – auch im Hinblick auf die Überwachung – ausreichend sind. Insofern könnten Anleihen aus § 5 Absatz 3 BImSchG, unter Umständen auch aus §§ 40, 43 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG), nützlich sein.

6.2.6 Bodenschutzrecht

Zweck des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) ist es, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte so weit wie möglich vermieden werden.⁴⁰⁷

6.2.6.1 Begriff des Bodens, Bodenfunktionen und schädliche Bodenveränderungen

Boden im Sinne des BBodSchG ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der in § 2 Abs. 2 BBodSchG genannten Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten. Danach erfüllt der Boden

1. natürliche Funktionen als
 - a. Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,
 - b. Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen,
 - c. Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers,
2. Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte sowie
3. Nutzungsfunktionen als
 - a. Rohstofflagerstätte,
 - b. Fläche für Siedlung und Erholung,
 - c. Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung,
 - d. Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung.

⁴⁰⁷ Vgl. § 1 BBodSchG.

Schlüsselbegriff des BBodSchG ist die „schädliche Bodenveränderung“ im Sinne des § 2 Abs. 3 BBodSchG. Schädliche Bodenveränderungen sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen.

6.2.6.2 Anwendungsbereich des BBodSchG, Verknüpfung mit bzw. Abgrenzung zum BBergG

Wie die Regelungen in § 3 BBodSchG zum Ausdruck bringen, ist der Anwendungsbereich des BBodSchG subsidiär zu sonstigen (umwelt-)fachrechtlichen Bestimmungen bzw. ergänzt diese, „soweit“ diese Einwirkungen auf den Boden nicht regeln. So ergibt sich aus § 3 Abs. 1 Nr. 10 BBodSchG, dass bei allen unmittelbaren Eingriffen in den Boden, die mit der Bodenschatzgewinnung (zwangsläufig) verbunden sind, das BBergG die Vorschriften des BBodSchG verdrängt; mithin erfolgt die Zulassung derartiger Eingriffe allein auf der Grundlage des Bergrechts.⁴⁰⁸

Das BBergG enthält einige (generalklauselartige) Vorschriften, die – wenn auch nicht unmittelbar – auch die Einwirkungen des Bergbaus auf den Boden erfassen (s. insbes. §§ 55 Abs. 1 und Abs. 2; 48 Abs. 2; 54 Abs. 2, 69 Abs. 2; 71 Abs. 1). Das Schutzgut Boden ist durch die Änderung des BBergG vom 12.02.1990 ausdrücklich in § 1 BBergG aufgenommen worden; dabei wurde die Zweckbestimmung des BBergG, den Bergbau zur Sicherung der Rohstoffversorgung zu ordnen und zu fördern, unter den Vorbehalt des sparsamen und schonenden Umgangs mit Grund und Boden gestellt.⁴⁰⁹ Detaillierte Maßstäbe zum Schutz des Bodens enthält das BBergG nicht, sondern es sind die o. g. Vorschriften bezüglich des Bodenschutzes durch die normativen Vorgaben des Bodenschutzrechts aufzufüllen.

Eine Verknüpfung des BBodSchG mit den bergrechtlichen Regelungen erfolgt insbesondere über § 55 BBergG und § 48 BBergG. In § 55 BBergG hält der Gesetzgeber eine Vielzahl unbestimmter Rechtsbegriffe vor, die durch die Anforderungen sonstiger Fachgesetze – auch die des BBodSchG – zu konkretisieren sind. Demnach sind die

⁴⁰⁸ *Erbguth* in Giesberts/Rheinhardt, Beck'scher Onlinekommentar Umweltrecht, BBodSchG § 3 Rn 18 unter Verweis u.a. auf *Müggenborg*, NVwZ 2006, 278, 281.

⁴⁰⁹ Siehe Beschluss der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz am 11./12.09.2000, Zustimmung des Länderausschusses Bergbau (LAB) vom 15.12.2000, *Abgrenzung zwischen Bundesbodenschutzgesetz und Bundesberggesetz*, Seite 2.

materiellen Wertungen und Schutzstandards des Bodenschutzrechts zu berücksichtigen.⁴¹⁰ Besonders hervorzuheben sind hierbei der Gesundheits- und Sachgüterschutz nach § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBergG⁴¹¹ sowie der Schutz vor gemeinschädlichen Einwirkungen nach § 55 Abs. 1 Nr. 9 BBergG. Worin konkret solche gemeinschädlichen Auswirkungen bestehen können, führt der Gesetzgeber nicht näher aus. So erfordert die Auslegung dieses – gerichtlich voll überprüfbaren – unbestimmten Rechtsbegriffs eine Bewertung und Abwägung der im Einzelfall vorliegenden Interessen.⁴¹² Wie das BVerwG⁴¹³ dazu in der Altenberg- und in der Moers-Kapellen-Entscheidung ausgeführt hat, genügt nicht jede Abweichung von öffentlich-rechtlichen Vorschriften, sondern es muss eine ganz erhebliche Gefahrenschwelle überschritten sein, so dass ein Schaden in einem Umfang droht, der sich auf das Allgemeinwohl auswirkt. Dies mag etwa anzunehmen sein, wenn auf Grund einer Bodenverunreinigung die Gefahr einer Beeinträchtigung des Grundwassers und mit diesem der öffentlichen Wasserversorgung besteht.⁴¹⁴ So sind Einwirkungen des Bergbaus wohl dann als gemeinschädlich anzusehen, wenn der durch sie der Gesamtheit entstehende Nachteil größer ist als der durch die Betriebshandlung für sie erwachsende Vorteil.⁴¹⁵ Über § 55 Abs. 1 Nr. 9 BBergG kann die Bergbehörde bodenschutzbezogene Anforderungen also nur stellen, soweit diese gemeinschädliche Ausmaße haben.

Soweit umweltbezogene Anforderungen nicht von einem der unbestimmten Rechtsbegriffe des § 55 BBergG erfasst werden, können sie als „überwiegende öffentliche Interessen“ i. S. d. § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG Eingang finden. Letzterem wird Auffangcharakter zugeschrieben.⁴¹⁶

⁴¹⁰ *Erbguth* in Giesberts/Rheinhardt, Beck'scher Onlinekommentar Umweltrecht, BBodSchG § 3, Rn 18 unter Verweis u.a. auf *Müggenborg*, NVwZ 2006, 278, 281.

⁴¹¹ Nach der Rspr. des BVerwG (u. a. Urteil vom 29.04.2010, 7 C 18/09, BeckRS 2010, 49816) erfasst § 55 Absatz 1 Nr. 3 BBergG Gefahren für Leben und Gesundheit Dritter auch außerhalb des Betriebs, ohne danach zu differenzieren, ob die Gefahr unmittelbar oder mittelbar durch den Betrieb herbeigeführt wird.

⁴¹² *Müggenborg*, NVwZ 2012, 659, 660.

⁴¹³ BVerwGE 74, 315, 321 = NJW 1987, 1713, 1714 = DVBl 1986, 1273 „Altenberg-Urteil“; ebenso BVerwGE 81, 329 = NVwZ 1989, 1157, 1158 „Moers-Kapellen“.

⁴¹⁴ *Müggenborg*, NVwZ 2012, 659, 660 mit Hinweis auf BVerwGE 100, 31 = NVwZ 1996, 712.

⁴¹⁵ Vgl. *Boldt/Weller*, BBergG, Kommentar, 1. Aufl. (1984), § 55 BBergG Rn. 39 m. w. Nachw.

⁴¹⁶ Vgl. zur Rspr. u. a. BVerwG NVwZ 1987, 789; BVerwG NVwZ 1989, 1157, 1161.

6.2.6.3 Behördliche Zuständigkeit

Die Zuständigkeit der Bergbehörde endet gemäß § 69 Abs. 2 BBergG unmittelbar kraft Gesetzes⁴¹⁷, sobald der Abschlussbetriebsplan oder entsprechende Anordnungen der zuständigen Behörde nach § 71 Abs. 3 BBergG erfüllt sind und nach allgemeiner Erfahrung nicht mehr damit zu rechnen ist, dass durch den Betrieb Gefahren für Leben und Gesundheit Dritter, für andere Bergbaubetriebe und für Lagerstätten, deren Schutz im öffentlichen Interesse liegt, oder gemeinschädliche Einwirkungen eintreten werden.

Trotz Beendigung der Bergaufsicht nach § 69 Abs. 2 BBergG bleiben in einigen Bundesländern die Bergbehörden weiterhin für die Betriebe zuständig, die einmal der Bergaufsicht unterlegen haben, so bspw. in Sachsen-Anhalt gemäß § 18 Abs. 3 Bodenschutz-Ausführungsgesetz Sachsen-Anhalt (BodSchAG LSA) für alle untertägigen Bergbaubetriebe. Die meisten Bundesländer aber kennen eine solche Regelung nicht; dort endet die Zuständigkeit der Bergbehörde mit der Entlassung aus der Bergaufsicht endgültig. Dies gilt auch für Nordrhein-Westfalen, denn das Bergamt ist gemäß § 13 Abs. 2 Landesbodenschutzgesetz (LBodSchG NRW) nur dann Bodenschutzbehörde, wenn die Fläche der Bergaufsicht unterliegt.

Die Bergaufsicht lebt auch nicht wieder auf, wenn sich nachträglich herausstellt, dass die Entlassung aus der Bergaufsicht zu früh erfolgt ist, weil entgegen der ursprünglichen Erwartungen doch noch entsprechende auf den Bergbaubetrieb zurückgehende Gefahren auftreten. Zeigen sich nach Entlassung aus der Bergaufsicht schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten, so treffen hier die Bodenschutzbehörden die erforderlichen Anordnungen auf der Grundlage alleine des BBodSchG.⁴¹⁸

⁴¹⁷ Es ist zwar nicht vorgeschrieben, dass die Bergbehörde das Ende der Bergaufsicht förmlich feststellt, jedoch hat es sich in der Praxis bewährt, dass die Bergbehörde das Ende der Bergaufsicht dem Eigentümer und Bergbauunternehmer mitteilt. Zuvor hat der Bergbauunternehmer der Bergbehörde die Durchführung des Abschlussbetriebsplans anzuzeigen und die Erklärung abzugeben, dass er die Voraussetzungen des § 69 Abs. 2 BBergG für erfüllt hält. Auf diese Weise wird für die wünschenswerte Klarheit gesorgt (vgl. *Müggenborg*, a.a.O., Seite 660).

⁴¹⁸ *Müggenborg*, NVwZ 2012, 659, 663.

6.2.7 Wasserrecht

Beim Abteufen von Bohrungen durch grundwasserführende Schichten, beim Einleiten von Stoffen in Thermalwasser, beim Zutagefördern von Grundwasser und bei zahlreichen anderen Vorgängen, die in den jeweiligen Betriebsphasen einer Anlage der Tiefengeothermie anfallen können, kann Kontakt zu einem Gewässer, in der Regel zum Grundwasser⁴¹⁹ bestehen.

Verschiedene wasserrechtliche Regelungen, allen voran das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) und die Grundwasserverordnung (GrwV) haben zum Ziel, nachteilige Veränderungen der Gewässereigenschaften zu vermeiden, die Leistungsfähigkeit des Wasserhaushalts zu erhalten und die Versorgung der Bevölkerung mit sauberem Trinkwasser sicherzustellen. Ein allzu simples Schwarz-Weiß-Denken, das vor allem im Umweltschutz oft zwischen dem bösen (potentiellen) Verschmutzer und dem guten Beschützer unterscheidet, darf in diesem Zusammenhang aber nicht den Weg für eine sachgerechte Diskussion der Inanspruchnahme der Natur versperren.⁴²⁰ Auch der gegenwärtige Umbau der Energiegewinnung und die Nutzung erneuerbarer Energien bedürfen regelmäßig einer Inanspruchnahme der Natur. § 1 WHG formuliert als Zweckbestimmung des WHG, die Gewässer durch **eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung** als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als **nutzbares Gut** zu schützen.⁴²¹

Die Gesetzgebungskompetenz für das Wasserhaushaltsrecht ist zwischen Bund und Ländern aufgeteilt. Der Bund besaß bis zum Inkrafttreten der Föderalismusreform nur die Kompetenz für die **damalige Rahmengesetzgebung**. Seit dem 1. September 2006 hat der Bund die konkurrierende Gesetzgebungskompetenz für das Wasserhaushaltsrecht (Art. 74 Abs. 1 Nr. 32 GG), wobei die Länder von den Bestimmungen des Bundes – außer bei stoff- oder anlagenbezogenen Vorschriften – abweichen dürfen (vgl. Art. 72 Abs. 3 Nr. 5 GG). Am 1. März 2010 ist das **neue Wasserhaushaltsgesetz als Vollregelung des Bundes** in Kraft getreten. Ausführende Rechtsverordnungen des Bundes sind in Vorbereitung. Die Länder werden ihre Wassergesetze anpassen, soweit sie mit

⁴¹⁹ Der Begriff des Grundwassers ist in § 3 Nr. 3 WHG legaldefiniert als „*das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht*“.

⁴²⁰ Vgl. *Reinhardt*, Geothermiebohrungen und Wasserrecht, UPR 2009, S. 289.

⁴²¹ Die nutzungsbezogenen Gewässerfunktionen umfassen insofern neben der öffentlichen Wasserversorgung auch die Gewinnung von Nutz- und Brauchwasser für Handwerk, Gewerbe, Industrie und Energieerzeugung.

dem neuen WHG kollidieren, und ggf. Abweichungen festlegen und Öffnungsklauseln des WHG nutzen.

Zur wasserrechtlichen Bewertung des Einbringens von Stoffen in tiefe geologische Formationen muss zunächst geklärt werden, für welche dort angetroffenen Wässer das Wasserrecht überhaupt gilt.⁴²² Bereits die Frage, inwieweit das Thermalwasser nach der Definition des Grundwassers gemäß § 3 Nr. 3 WHG dessen Schutzbereich und dementsprechend dem Reinhaltungsgebot des § 48 WHG unterliegt, ist äußerst komplex. Beginnend mit einer Darstellung des diesbezüglichen Meinungsstandes soll im Nachfolgenden kurz auf die verschiedenartigen Genehmigungstatbestände zur Gewässernutzung und auf einige der sich in diesem Zusammenhang stellenden Rechtsfragen hingewiesen werden. Dabei handelt es sich an dieser Stelle um keine umfassende gutachterliche Bewertung oder Stellungnahme zu diesem für sich genommen vielschichtigen Thema. Detailliertere Analysen werden Gegenstand weiterer Untersuchungen sein müssen.

6.2.7.1 Allgemeines zum Grundwasserschutz

Zweck des WHG ist es (§ 1 WHG), durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen. Hierdurch wird das medienübergreifende „Staatsziel Umweltschutz“ (Art. 20a GG) konkretisiert. In § 5 WHG sind allgemeine Sorgfaltspflichten formuliert. Danach ist jede Person verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um (unter anderem) eine nachteilige Veränderung der Gewässereigenschaften zu vermeiden und die Leistungsfähigkeit des Wasserhaushalts zu erhalten (§ 5 Abs. 1 Nr. 1 und 3 WHG). Als Ausdruck des Vorsorgeprinzips sind in § 6 WHG die allgemeinen Grundsätze der Gewässerbewirtschaftung formuliert. Dem Grundsatz der Nachhaltig-

⁴²² Für eine äußerst umfassende Darstellung der rechtlichen Definitions-, Anwendungs- und Abgrenzungsschwierigkeiten sei auf das im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) erstellte Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B55 ff. hingewiesen.

keit entsprechend soll die Gewässerbewirtschaftung so erfolgen, dass die „**Lebensgrundlage Wasser**“ erhalten und gesichert wird.⁴²³

Geschützt ist nach § 2 Abs. 1 Nr. 3 WHG auch das Grundwasser, worunter nach der Definition in § 3 Nr. 3 WHG das „unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht“, zu verstehen ist. Unterirdische Wasser, die künstlich, z. B. in Rohren, Leitungen oder in ähnlicher Weise gefasst sind, gehören im Gegensatz dazu nicht zum Grundwasser.⁴²⁴ Die Definition des § 3 Nr. 3 WHG entspricht im Wortlaut der Erläuterung in Art. 2 Nr. 2 europäische Wasserrahmenrichtlinie 2000/60/EG (WRRL). Nach der auf der Grundlage des früheren Rechts herrschenden Meinung, wird durch das europäisch geprägte Recht der überkommene, auf die Beschreibung der DIN 4049 Teil 1 Nr. 4.2 verweisende Grundwasserbegriff inhaltlich nicht verändert.

Zu klären ist, wie weit der Grundwasserschutz in Bezug auf die Tiefe des Grundwassers reicht, ob Sole Grundwasser sein kann und welche Bedeutung der Sättigungszone zukommt.⁴²⁵

6.2.7.1.1 Wasser und Sole

Zur Frage, ob und inwieweit die Qualität des Wassers dazu führen kann, dass es nicht mehr als Grundwasser anzusehen ist, werden unterschiedliche Auffassungen vertreten. Das gilt vor allem für die Frage, ob salzhaltiges Wasser, das bergrechtlich als Sole einzustufen ist, nur noch dem Bergrecht oder auch dem Wasserrecht unterfällt.

Nach einem Erlass des schleswig-holsteinischen Umweltministeriums vom 14.01.1999 soll das Wasserrecht ab einem NaCl-Gehalt von 5 % (= 16 g NaCl/l Wasser) keine Anwendung mehr finden, weil das salzhaltige Wasser dann Sole im Sinne des Bergrechts ist.⁴²⁶ In anderen Bundesländern dürfte es mitunter ähnliche Erlasse geben. In der rechtswissenschaftlichen Literatur wird diese Auffassung gelegentlich geteilt.⁴²⁷

⁴²³ Vgl. *Czychowski/Reinhardt*, WHG, Kommentar, 10. Auflage 2010, § 6 Rn 2.

⁴²⁴ Vgl. *Czychowski/Reinhardt*, WHG, Kommentar, 10. Auflage 2010, § 3 Rn 46.

⁴²⁵ Siehe Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B56.

⁴²⁶ Vgl. Abschnitt 2.1 Abs. 3 des Runderlasses des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten vom 14. Januar 1999 („*Vollzug des Bundesberggesetzes und der Wassergesetze; hier: Zusammenarbeit*

In der wasserrechtlichen Literatur wird diese Auffassung überwiegend abgelehnt.⁴²⁸ Es ist zwar ausdrücklich geregelt, dass Wasser als solches kein Bodenschatz ist und deshalb nicht dem Bergrecht unterfällt (§ 3 Abs. 1 BBergG). Umgekehrt gibt es aber keine entsprechende Ausnahmeregelung für das Wasserrecht; lediglich Heilquellen können die Länder vom Anwendungsbereich des WHG ausnehmen (§ 2 Abs. 2 Satz 1 WHG).⁴²⁹

Eine solche Ausnahme widerspräche auch dem Regelungszweck des Wasserrechts. Das Wasserrecht zielt auf einen umfassenden Gewässerschutz. Dagegen regelt das Bergrecht allein die Nutzung von Bodenschätzen. Dementsprechend hängt die Einstufung von salzhaltigem Wasser als Sole im Bergrecht davon ab, ab welcher Salzkonzentration das Salz gewinnbar ist. Schon ab Salzgehalten von 5 % wird Salzwasser als Sole eingestuft.⁴³⁰ Für das Wasserrecht spielt dieses Abgrenzungskriterium dagegen keine Rolle. Es liegt auch nur knapp über den üblichen Salzgehalten von Meerwasser (ca. 3,5 %), aus dem bekanntlich ebenfalls Salz gewonnen werden kann, das aber gleichfalls dem Wasserrecht unterfällt (§§ 43 ff., 45a ff. WHG).

Es ist deshalb nicht ersichtlich, weshalb der Anwendungsbereich des Wasserrechts bei Grundwasser anders als bei Meerwasser von dem für den Gewässerschutz unbeachtlichen Gewinnbarkeitskriterium bestimmt werden sollte.

6.2.7.1.2 Abgrenzung zur Begriffsbestimmung des Bodens im BBodSchG.

Nach der gesetzlichen Definition ist Grundwasser nur das unterirdische Wasser in der Sättigungszone (§ 3 Nr. 3 WHG, ebenso in Art. 2 Nr. 2 WRRL). In der Rechtsprechung und der wasserrechtlichen Literatur wird die gesetzliche Beschränkung des Grundwassers auf das Wasser in der Sättigungszone überwiegend im Zusammenhang mit der

zwischen Berg- und Wasserbehörden“), Aktenzeichen X 412 - 5200.290.3, Amtsbl. Schl.-H. 1999, S. 18.

⁴²⁷ So z. B. *Große*, ZUR 2009, 535, 539.

⁴²⁸ *Czychowski/Reinhardt*, WHG § 3 Rn. 48, 34 m. w. Nachweisen; *Breuer*, Öffentliches und privates Wasserrecht, 3. Aufl. 2004, Rn. 146.

⁴²⁹ Vgl. zu früheren Ausnahmen für Solquellen *Pienschulte/Graf Vitzthum*, BBergG, § 56 Rn. 328 mit Hinweis auf den 1989 aufgehobenen § 169 LWG NRW 1979.

⁴³⁰ Vgl. Abschnitt 2.1 Abs. 3 des Runderlasses des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten vom 14. Januar 1999 („Vollzug des Bundesberggesetzes und der Wassergesetze; hier: Zusammenarbeit zwischen Berg- und Wasserbehörden“), Aktenzeichen X 412 - 5200.290.3, Amtsbl. Schl.-H. 1999, S. 18.

Begriffsbestimmung des Bodens im BBodSchG gesehen. Die Ausfüllung des Grundwasserbegriffs wird somit nicht allein von der Legaldefinition in § 3 Nr. 3 WHG geprägt, sondern vollzieht sich vielmehr anhand einer vergleichenden Betrachtung von WHG und BBodSchG, die durch die Legaldefinition im WHG bestätigt wird. Hat sich der Gesetzgeber entschieden, das Umweltmedium Boden einer eigenständigen bundesrechtlichen Regelung zu unterwerfen (BBodSchG vom 17.03.1998, BGBl. I S. 502), so wirkt sich dies notwendig zurück auf den bis dahin umfassenden Geltungsbereich des Wasserrechts.⁴³¹

Erst mit dem Eintreffen in der gesättigten Zone wird das Wasser zu Grundwasser i. S. d. § 3 Nr. 3 WHG und ist damit nach § 2 Abs. 1 BBodSchG nicht mehr erfasst, ungeachtet dessen, ob ein Grundwasserleiter i. S. d. Art. 2 Nr. 11 WRRL besteht oder nicht.

Als ungesättigte Zone wird in der Bodenkunde der Bereich des Bodens bezeichnet, der oberhalb der Grundwasseroberfläche und des durch Kapillaraufstieg gesättigten Kapillarraumes (scheinbare Grundwasseroberfläche) liegt und nicht dauernd wassergesättigt ist. Die Poren sind teilweise mit Luft erfüllt. Die ungesättigte Zone ist im Allgemeinen durch eine abwärts gerichtete Sickerwasserbewegung gekennzeichnet. In der gesättigten Zone sind die Hohlräume hingegen vollständig mit Wasser erfüllt. Dies ist bei (hydrothermalen) Tiefbohrungen im Zielhorizont regelmäßig der Fall.

6.2.7.2 Bewirtschaftungsziele und Reinhaltung des Grundwassers

Neben dem Grundwasserbegriff ist die Frage, wann eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vorliegt, eine zentrale Frage für die Erlaubnisbedürftigkeit und die Erlaubnisfähigkeit einer grundwasserrelevanten Maßnahme.

Wasserrechtliche Anforderungen für Grundwasserbenutzungen ergeben sich aus den einschlägigen Regelungen der §§ 47 und 48 WHG. Danach müssen bestimmte Bewirtschaftungsziele erreicht werden (§ 47 WHG) und durch Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf eine **nachteilige Veränderung der Wasserbeschaf-**

⁴³¹ Czychowski/Reinhardt, WHG § 3 Rn. 45.

fenheit nicht zu besorgen sein (§ 48 Abs. 1 WHG). Diese Anforderungen werden durch die Grundwasserverordnung (GrWV) weiter konkretisiert.

Nach § 47 Abs. 1 WHG ist das Grundwasser grundsätzlich so zu bewirtschaften, dass

1. eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und seines chemischen Zustands vermieden wird;
2. alle signifikanten und anhaltenden Trends ansteigender Schadstoffkonzentrationen auf Grund der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten umgekehrt werden;
3. ein guter mengenmäßiger und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden; zu einem guten mengenmäßigen Zustand gehört insbesondere ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserentnahme und Grundwasserneubildung.

Allerdings relativiert § 47 Abs. 3 WHG das Bewirtschaftungssystem für das Grundwasser durch eine differenzierte Bezugnahme auf einzelne Regelungen über Ausnahmen von den Bewirtschaftungszielen. Zwar gestalten sich die Möglichkeiten, von den Zielen für das Grundwasser abzuweichen, im Ergebnis deutlich enger als von der WRRL vorgeschrieben; strukturell gibt aber auch § 47 Abs. 3 WHG den Rahmen für eine Verhältnismäßigkeitsprüfung unter Berücksichtigung der Kosten für die Erreichung der Bewirtschaftungsziele vor.⁴³²

6.2.7.3 Nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit

Soweit tiefes, ohnehin stark salzhaltiges oder mit sonstigen Schadstoffen belastetes Grundwasser betroffen ist, stellt sich die Frage, ob höhere Schadstoffeinträge akzeptiert werden können als bei nutzbarem oberflächennahem Grundwasser. Damit verbunden ist mithin die Frage nach einer zulässigen Differenzierung des Schutzniveaus für unterschiedliche Grundwässer.

Auffällig sind in diesem Zusammenhang insbesondere zwei unterschiedliche Ausdrücke in den wasserrechtlichen Vorschriften: Zum einen **schädliche Gewässerverände-**

⁴³² Czychowski/Reinhardt, WHG § 47 Rn. 17.

rungen, welche in § 3 Nr. 10 WHG definiert werden als „*Veränderungen von Gewässereigenschaften, die das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, beeinträchtigen oder die nicht den Anforderungen entsprechen, die sich aus diesem Gesetz, aus auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder aus sonstigen wasserrechtlichen Vorschriften ergeben*“, zum anderen **nachteilige Veränderungen** der Gewässereigenschaften bzw. der Wasserbeschaffenheit. Die Wasserbeschaffenheit ist in § 3 Nr. 9 WHG definiert als „*die physikalische, chemische oder biologische Beschaffenheit des Wassers eines oberirdischen Gewässers oder Küstengewässers sowie des Grundwassers*“. Durch die Aufnahme in den Definitionskatalog des § 3 stellt das Gesetz die schädliche Gewässerveränderung in den Vordergrund. Diese soll nach den Ausführungen der Gesetzesmaterialien (vgl. BT-Drs. 16/12775, S. 53 ff.) alle Gewässerveränderungen betreffen, die gegen das Wohl der Allgemeinheit oder gegen sonstige wasserrechtliche Vorschriften einschließlich landesrechtlicher Anforderungen verstoßen. In diesem Sinne sei der Begriff „schädliche Gewässerveränderungen“ als Oberbegriff zu verstehen, der zunächst alle Fälle umfasse, in denen das WHG allgemein auf die nachteilige Veränderung von Gewässereigenschaften abstelle. Darüber hinaus umfasse er aber auch Veränderungen, die nur Teilaspekte des Begriffs „Gewässereigenschaften“ betreffen, wie bspw. die Gewässerbeschaffenheit oder den Gewässerzustand sowie die Veränderungen, die in verschiedenen Stufen unzulässige Gewässerveränderungen darstellen, wie z. B. der Besorgnisgrundsatz mit dem Verbot nachteiliger Veränderungen (u. a. in § 48 Abs. 1 und 2, § 62 Abs. 1 WHG).⁴³³

Kriterien für die Ermittlung, Einstufung und Überwachung des Grundwasserzustands enthält insbesondere die Grundwasserverordnung. Wenn die dort geregelten Schwellenwerte für die Beurteilung des chemischen Zustands (§ 5 i. V. m. Anlage 2 GrwV) und die Kriterien für den guten mengenmäßigen Zustand (§ 4 GrwV) nicht eingehalten werden, liegt eine schädliche Gewässerveränderung vor. Bereits aus praktischen Erwägungen heraus (etwa im Hinblick auf nach §§ 82, 83 WHG aufzustellende Maßnahmenprogramme und Bewirtschaftungspläne) stellt sich aber die Frage, ob Grundwasserkörper i. S. der Definition nach § 3 Nr. 6 WHG der Tiefe nach differenziert betrachtet werden können.

Aus den Anforderungen an einen guten mengenmäßigen und chemischen Zustand des Grundwassers und aus den Regelungszwecken des Grundwasserrechts ergibt sich,

⁴³³ Czychowski/Reinhardt, WHG § 3 Rn. 69 m. w. N.

dass der gute Zustand in Bezug auf bestimmte Funktionen des Grundwassers definiert wird, die nur das oberflächennahe Grundwasser bzw. das damit in Verbindung stehende Grundwasser erfüllt. Der gute mengenmäßige Zustand wird im Hinblick auf das nutzbare Grundwasserdargebot sowie potenzielle Auswirkungen auf Oberflächengewässer und auf grundwasserabhängige Landökosysteme definiert (vgl. § 4 Abs. 2 GrwV). Diese Faktoren spielen auch im Hinblick auf den chemischen Zustand eine entscheidende Rolle (vgl. § 6 Abs. 1 Satz 2 GrwV). Deshalb wird sich auch dann, wenn sich der Beschreibung der potenziell betroffenen Grundwasserleiter keine Tiefenbegrenzung entnehmen lässt (vgl. die Anforderungen an Bestimmung und Beschreibung der Grundwasserkörper in § 2 i. V. m. Anlage 1 GrwV), aus den natürlichen geologischen Gegebenheiten eine Tiefenbegrenzung der für diese Funktionen relevanten Grundwasserkörper ableiten lassen. Unterhalb dieses Tiefenbereichs ist dann auch keine repräsentative Überwachung des Grundwasserkörpers mehr erforderlich (vgl. § 9 i. V. m. Anlage 3 und 4 GrwV).⁴³⁴

Zur weiteren Konkretisierung, ob eine nachteilige Veränderung des Tiefengrundwassers vorliegt, können ferner die für die jeweiligen Schadstoffe einschlägigen Grenz- und Schwellenwerte aus gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen und Empfehlungen herangezogen werden.

Hinzuweisen ist in diesem Zusammenhang u. a. das sog. Geringfügigkeitsschwellenkonzept der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)⁴³⁵, welches im ursprünglichen WHG-Entwurf von 2009⁴³⁶ im WHG sowie bei der Neufassung der GrwV gesetzgebungstechnisch umgesetzt werden sollte, letztlich aber u. a. aufgrund fehlender Zustimmung im Bundesrat⁴³⁷ nicht umgesetzt wurde. Nach dem GFS-Bericht der LAWA aus dem Jahr 2004 bilden Geringfügigkeitsschwellen (GFS) die Grenze zwischen einer geringfügigen Veränderung der chemischen Beschaffenheit des Grundwassers und einer schädlichen Verunreinigung. Im September 2006 hat die LAWA ergänzende Hinweise für die Anwendung der Geringfügigkeitsschwellen bei Benutzungen des Grundwassers in bestimmten Fallgestaltungen veröffent-

⁴³⁴ Vgl. Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B64 f.

⁴³⁵ LAWA, Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser, Dezember 2004 (www.lawa.de).

⁴³⁶ Vgl. BT-Drs. 16/12275, S. 65.

⁴³⁷ Vgl. BT-Drs. 16/13306, S. 10 f.

licht.⁴³⁸ Diese enthalten Hinweise zur Verwendung von Spülflüssigkeiten bei Bohrungen (Nr. 3.6.4) und die chemische Brunnenregenerierung (Nr. 3.6.5). Danach ist das Geringfügigkeitsschwellenkonzept bei Bohrungen insbesondere aufgrund der Kurzzeitigkeit des Eingriffs nicht direkt anwendbar (Nr. 3.6.4 i. V. m. Nr. 3.6 der Hinweise). Stattdessen werden praktische Empfehlungen zur Vermeidung nachteiliger Grundwasserverunreinigungen gegeben. Diese Hinweise beziehen sich aber primär auf oberflächennahe Bohrungen und berücksichtigen nicht die Besonderheiten bei Tiefbohrungen des Bergbaus. In einigen Bundesländern ist das Geringfügigkeitsschwellenkonzept hingegen im Rahmen von Verwaltungsvorschriften umgesetzt worden.⁴³⁹ Auch der gegenwärtige Entwurf der sogenannten „Mantelverordnung“ enthält eine Änderung der GrwV. Danach soll u. a. ein neuer § 13a „Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser“ in die GrwV eingefügt werden.⁴⁴⁰ Solange das Geringfügigkeitsschwellenkonzept nicht als gesetzliche Regelung Verbindlichkeit erlangt hat, können die GFS dennoch maßgebliche Orientierungswerte dafür sein, ob eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit vorliegt.⁴⁴¹

Ausweislich der Begründung zum Entwurf der Mantelverordnung⁴⁴² sind die Umstände des Einzelfalls in Betracht zu ziehen. So können es zum Beispiel **geogen bedingte Belastungen des Grundwassers** oder die natürlichen Schadstoffrückhalte- und Abbauprozesse im Boden ermöglichen, Aktivitäten zu gestatten, die zu Stoffkonzentrationen im Grundwasser führen, die höher als die Prüfwerte sind. Dies muss im Einzelfall durch die zuständigen Behörden abgewogen werden.

⁴³⁸ Siehe hierzu Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B69 mit Verweis auf <http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/wasser/wasserrecht/pdf/lawa-hinweis.pdf>.

⁴³⁹ Siehe hierzu Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B69 mit weiteren Nachweisen.

⁴⁴⁰ Vgl. Entwurf der „Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material“ (sog. Mantelverordnung) vom 31.10.2012., http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/entw_mantelverordnung.pdf

⁴⁴¹ Zur Differenzierung nach dem Geringfügigkeitsschwellenkonzept sowie zu den weiteren Gesetzgeberischen Entwicklungen siehe Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B68 ff.

⁴⁴² Siehe Entwurf-Mantelverordnung vom 31.10.2012 (s.o.), Seite 163.

Nach der im Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B71 f. vertretenen Ansicht ergibt sich die rechtliche Zulässigkeit einer Differenzierung unterschiedlich schutzwürdiger Grundwässer schließlich aus den Begriffsbestimmungen und den grundlegenden Wertungen und Zweckbestimmungen des WHG. Dem ist zuzustimmen. Danach ist zwar grundsätzlich jede nachteilige Veränderung von Gewässereigenschaften zu vermeiden (§ 5 Abs. 1 Nr. 1 WHG). Eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit als Unterfall einer schädlichen Gewässerveränderung liegt jenseits konkreter Grenzwertfestlegungen nur vor, wenn [nach einer Gesamtwertung] die Veränderung das Wohl der Allgemeinheit beeinträchtigt.⁴⁴³ Das Wohl der Allgemeinheit wiederum ist nach Maßgabe der Zweckbestimmung des WHG zu bestimmen. Zweck des WHG ist es, durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen (§ 1 WHG).

Bei tiefem Grundwasser, das weder mit oberflächennahem Grundwasser in Verbindung steht noch für menschliche Nutzungen in Betracht kommt, weil es dafür zu hohe Schadstoffgehalte aufweist oder nicht hinreichend ergiebig ist, sind auch Schadstoffeinträge jenseits der Geringfügigkeitsschwellenwerte keine im Hinblick auf das Wohl der Allgemeinheit nachteiligen Veränderungen der Wasserbeschaffenheit.

Steht tiefes Grundwasser nur eingeschränkt mit oberflächennahem Grundwasser in Verbindung oder kommt es nur für bestimmte Benutzungen in Betracht, muss jeweils im Einzelfall unter Berücksichtigung aller Umstände geprüft und bewertet werden, welche Schadstoffeinträge im Hinblick auf das Allgemeinwohl als nachteilig einzustufen sind. Hängt dies allein von der Verbindung mit oberflächennahem Grundwasser ab, kann z.B. im Rahmen einer Modellierung geprüft und bewertet werden, ob und inwie-

⁴⁴³ Der Verweis auf die in § 3 Nr. 10 WHG enthaltene Definition geht allerdings fehl, da dieser eine schädliche Gewässerveränderung annimmt, wenn sie **entweder** das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, beeinträchtigt **oder**, verkürzt gesprochen, gegen wasserrechtliche Vorschriften verstößt (vgl. Faßbender in Landmann/Rohmer, Umweltrecht, WHG § 3 Rn 74). Nach Czychowski/Reinhardt, WHG § 3 Rn. 69 „erschöpft sich der Erkenntniswert des § 3 Nr. 10 WHG insofern in einer Zusammenstellung von Merkposten, die im assoziativen Umfeld dieser Begriffswelt zu berücksichtigen sind: Es ist vor allem das Wohl der Allgemeinheit, das ohnehin als übergeordnetes wasserhaushaltsgesetzliches Bewirtschaftungsprinzip (§ 6 Abs. 1 Nr. 3 WHG) übergeordnete Auslegungshilfe ist (...).“ Demnach bedarf § 3 Nr. 10 WHG einer erweiterten, über den Wortlaut hinausgehenden Auslegung.

weit Veränderungen des tiefen Grundwassers zu einer nachteiligen Veränderung des oberflächennahen Grundwassers führen.

6.2.7.4 Zwischenergebnis

Grundwasser ist nicht nur das unterirdische Wasser, das in irgendeiner Weise (z. B. für die Wasserversorgung) bereits genutzt wird oder in absehbarer Zeit für bestimmte Nutzungen vorgesehen ist, sondern der gesamte Grundwasserschatz.⁴⁴⁴ Wasser, welches sich in der Sättigungszone befindet und in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht, ist folglich unabhängig von der Tiefe und vom Salzgehalt vom WHG erfasst.⁴⁴⁵ Allerdings sind die Vorbelastungen aufgrund geogener Stoffe zur Begründung von Ausnahmen von den Bewirtschaftungszielen nach § 47 WHG und dem Reinhaltungsgebot nach § 48 WHG (zur Verhinderung nachteiliger Veränderungen der Wasserbeschaffenheit) zu berücksichtigen. Im Ergebnis kann damit an die Tiefengrundwässer ein anderer Maßstab angelegt werden, als an andere Grundwasserkörper, so dass nicht jede stoffliche Beeinflussung eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit darstellt.

6.2.7.5 Erlaubnisse bzw. Bewilligungen der Benutzung eines Gewässers gemäß § 8 WHG im Zusammenhang mit dem Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie

Gemäß § 8 Abs. 1 WHG bedarf die Benutzung eines Gewässers der Erlaubnis oder der Bewilligung, soweit nicht durch das WHG oder auf Grund des WHG erlassener Vorschriften etwas anderes bestimmt ist. Unter welchen Voraussetzungen die Benutzung eines Gewässers vorliegt, ist in § 9 WHG geregelt. Im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen der Tiefengeothermie sind insbesondere die Benutzungstatbestände relevant, die – anders als die Tatbestandsalternativen § 9 Abs. 1 Nr. 1 bis Nr. 3 WHG – jedenfalls auch dann einschlägig sein können, wenn

⁴⁴⁴ Czychowski/Reinhardt, WHG § 48 Rn. 10.

⁴⁴⁵ Zu diesem Ergebnis kommen auch die Verfasser des vom Umweltbundesamts (UBA) beauftragten Gutachtens „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“ – Teil B: Evaluierung rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen, Seite B61“ ausführen, auf das an dieser Stelle verwiesen und auf das ausdrücklich Bezug genommen wird.

Maßnahmen das Grundwasser berühren. Dabei handelt es sich um die folgenden Tatbestandsalternativen:

- Nach § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG stellt das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in Gewässer eine Benutzung im Sinne von § 8 WHG dar.
- Nach § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG handelt es sich beim Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser um Benutzungen im Sinne des § 8 WHG.
- Nach § 9 Abs. 2 Nr. 1 WHG gelten das Aufstauen, Absenken und Umleiten von Grundwasser durch Anlagen, die hierfür bestimmt und geeignet sind, als Benutzungen im Sinne des § 8 WHG.
- Nach § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG gelten zudem Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen als Benutzungen im Sinne des § 8 WHG.

6.2.7.5.1 Maßnahmen im Zusammenhang mit Errichtung und Betrieb von Anlagen der Tiefengeothermie als Benutzungen im Sinne von § 9 WHG

Im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von Kraftwerken der Tiefengeothermie können die o. g. Benutzungstatbestände des § 9 WHG in Abhängigkeit von den natürlichen Bedingungen am Standort und der im Kraftwerk genutzten Technik unter verschiedenen Aspekten von Bedeutung sein. Im Folgenden werden einige Sachverhaltskonstellationen dargestellt, die geeignet sind, ein Erlaubnis- bzw. Bewilligungserfordernis auszulösen.

Bei der hydrothermalen Geothermie, bei der zum Kraftwerksbetrieb Grundwasser durch die Förderbohrung zu Tage gefördert wird und durch die Injektionsbohrung wieder eingeleitet wird, werden regelmäßig die Benutzungstatbestände in § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG (Entnehmen, Zutagefördern, Zutageleiten und Ableiten von Grundwasser) und § 9 Abs. 1 Nr. 4 WHG (Einbringen und Einleiten von Stoffen in Gewässer) erfüllt sein.⁴⁴⁶ Zwar wird vereinzelt vertreten, dass etwas anderes dann gelte, wenn es sich

⁴⁴⁶ Reinhardt, Geothermiebohrungen und Wasserrecht, UPR 2009, S. 289ff.

bei der geförderten Flüssigkeit um Sole handelt, die aufgrund ihres Salzgehalts nicht unter den Grundwasserbegriff im Sinne des WHG falle⁴⁴⁷, doch ist diese Ansicht nach Wortlaut, Systematik und Ziel des WHG – wie unter Punkt 6.2.7.1 dargestellt – nicht zutreffend.

Aber auch jenseits des Zutageförderns und Wiedereinleitens des Grundwassers können Bohrtätigkeiten sowohl bei hydro- als auch bei petrothermalen Systemen eine Erlaubnis- bzw. Bewilligungspflicht nach § 8 WHG auslösen, da beim Niederbringen der Bohrung verschiedene Grundwasserstockwerke durchbohrt werden und bei fehlerhafter Ausführung der Bohrung bzw. des Bohrlochausbaus⁴⁴⁸ z. B. das Risiko eines hydraulischen Kurzschlusses zu einem anderen Grundwasserkörper besteht. In diesem Fall kann sich eine Erlaubnis- bzw. Bewilligungspflicht aus § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG ergeben.⁴⁴⁹ Der § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG hat insofern der Charakter eines Auffangtatbestands.⁴⁵⁰

Daneben könnte es im Einzelfall im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb der Geothermie-Anlage zur Verwendung von Stoffen kommen, die möglicherweise im Sinne von § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG geeignet sind, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen.⁴⁵¹ Dies beträfe hinsichtlich des Primärkreislaufs möglicherweise Fälle im Zusammenhang mit Stimulationsverfahren unter Zugabe von bestimmten (Hilfs-)Stoffen in großer Menge. Die Geothermieanlagenbetreiber und Branchenverbände weisen hierbei aber immer wieder auf deutliche Unterschiede (hinsichtlich der eingesetzten Stoffe und Stoffmengen) zum Hydraulic-Fracturing bei der Gewinnung von Gas aus unkonventionellen Lagerstätten hin.

§ 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG erfasst allerdings regelmäßig nicht den Einsatz wassergefährdender Stoffe im Sekundärkreislauf. Soweit es sich bei den im

⁴⁴⁷ Vgl. *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe – Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, S. 535, 539, unter Bezugnahme auf den Runderlass des Ministeriums für Umwelt, Natur und Forsten Schleswig-Holstein vom 14. 1. 1999, Amtsblatt Schleswig-Holstein 1999, S. 18. („*Be-trägt der Salzgehalt mehr als fünf Prozent, ist die mit der Bohrung geförderte Flüssigkeit nicht länger als Wasser, sondern als Sole zu qualifizieren. Sole gehört gemäß § 3 Abs. 3 BBergG zu den bergfreien Bodenschätzen; es findet folglich nicht das Wasserrecht, sondern das Bergrecht Anwendung.*“)

⁴⁴⁸ Siehe hierzu Punkt 3.5.

⁴⁴⁹ *Reinhardt*, Geothermiebohrungen und Wasserrecht, UPR 2009, S. 289ff; *Große*, Strom und Wärme aus der Tiefe – Zur Genehmigung und Förderung tiefengeothermischer Anlagen, ZUR 2009, S. 535, 540.

⁴⁵⁰ Vgl. *Czychowski/Reinhardt*, WHG § 9 Rn. 82.

⁴⁵¹ Siehe hierzu Punkt 6.2.7.3.

Sekundärkreislauf verwendeten Arbeitsmitteln um wassergefährdende Stoffe im Sinne von § 62 Abs. 3 WHG handelt, sind die Voraussetzungen des Benutzungstatbestandes § 9 Abs. 2 Nr. 2 WHG insbesondere dann nicht erfüllt, wenn Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen unter Beachtung der Anforderungen der §§ 62 f. WHG eingebaut, aufgestellt oder betrieben werden.⁴⁵² Auf die sich im Zusammenhang mit der Verwendung wassergefährdender Stoffe im Sekundärkreislauf ergebenden Fragestellungen wird daher unter Kapitel 6.2.7.6 im Rahmen der Darstellung der Regelungen in den §§ 62 f. WHG eingegangen.

6.2.7.5.2 Erlaubnis- und Bewilligungsvoraussetzungen gemäß § 12 WHG

In § 12 WHG sind die Voraussetzungen für die Erteilung der Erlaubnis und der Bewilligung im Sinne von § 8 WHG geregelt. Gemäß § 12 Abs. 1 WHG sind Erlaubnis bzw. Bewilligung zu versagen, wenn schädliche, auch durch Nebenbestimmungen nicht vermeidbare oder nicht ausgleichbare Gewässerveränderungen zu erwarten sind (§ 12 Abs. 1 Nr. 1 WHG) oder andere Anforderungen nach öffentlich-rechtlichen Vorschriften nicht erfüllt werden (§ 12 Abs. 1 Nr. 2 WHG). Im Übrigen steht die Erteilung der Erlaubnis und der Bewilligung im pflichtgemäßen Ermessen (Bewirtschaftungsermessen) der zuständigen Behörde.

Die Beurteilung der Frage, ob eine schädliche Gewässerveränderung zu erwarten ist, erfordert eine konkrete, fallbezogene Betrachtung.⁴⁵³ Eine schädliche Gewässerveränderung ist dann zu erwarten, wenn sie nach allgemeiner Lebenserfahrung oder den anerkannten fachlichen Regeln wahrscheinlich ist.⁴⁵⁴

Zum behördlichen Prüfprogramm gehören gemäß § 12 Abs. 1 Nr. 1 i. V. m. § 3 Nr. 10 WHG alle Anforderungen, die sich aus diesem Gesetz, aus auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder aus sonstigen wasserrechtlichen Vorschriften ergeben. Dies umfasst etwa die für das jeweilige Gewässer geltenden Bewirtschaftungsziele, das die Bewirtschaftungsziele konkretisierende Verordnungsrecht, die wasserhaushaltsgesetz-

⁴⁵² Mit Verweis auf das OVG Lüneburg *Reinhardt*, in: Czychowski/Reinhardt, WHG, 10. Auflage, 2010, § 9, Rn. 82; vgl. auch *Sanden*, in: Giesberts/Reinhardt, BeckOK, WHG, Edition 21, Stand 01.10.2011, § 62, Rn. 3.

⁴⁵³ Siehe hierzu ausführlich Punkt 6.2.7.3.

⁴⁵⁴ *Reinhardt*, in: Czychowski/Reinhardt, WHG, § 12, Rn. 11; Attendorn, Fracking- zur Erteilung von Gewinnungsberechtigungen und der Zulassung von Probebohrungen zur Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten, ZUR 2011, S. 565, 569.

lichen Reinhaltebestimmungen oder einschlägige Benutzungsbegrenzungen und Verbote in Schutzgebieten.⁴⁵⁵ Daneben gelten die Anforderungen des Landesrechts.⁴⁵⁶

Von Bedeutung für die Anlagen der Tiefengeothermie sind insbesondere die Bewirtschaftungsziele für Grundwasser in § 47 WHG und die Grundwasserverordnung. Nach § 47 Abs. 1 WHG ist das Grundwasser so zu bewirtschaften, dass eine Verschlechterung seines mengenmäßigen und seines chemischen Zustands vermieden wird (Nr. 1), alle signifikanten und anhaltenden Trends ansteigender Schadstoffkonzentrationen auf Grund der Auswirkungen menschlicher Tätigkeiten umgekehrt werden (Nr. 2) und ein guter mengenmäßiger und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. Zu einem guten mengenmäßigen Zustand gehört insbesondere ein Gleichgewicht zwischen Grundwasserentnahme und Grundwasserneubildung (Nr. 3).

Gemäß § 48 Abs. 1 Satz 1 WHG darf eine Erlaubnis für das Einbringen und Einleiten von Stoffen in das Grundwasser nur erteilt werden, wenn eine nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist. Gemäß § 48 Abs. 2 Satz 1 WHG dürfen Stoffe nur so gelagert oder abgelagert werden, dass eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit nicht zu besorgen ist. Das Gleiche gilt für das Befördern von Flüssigkeiten und Gasen durch Rohrleitungen. Konkretisierungen der allgemein gehaltenen Regelungen des WHG zum Grundwasserschutz finden sich in der Grundwasserverordnung.

Auch dann wenn die in § 12 Abs. 1 Nr. 1 und Nr. 2 WHG genannten Versagungsgründe nicht vorliegen, steht die Erteilung der Erlaubnis bzw. Bewilligung nach § 12 Abs. 2 WHG („im Übrigen“) im **Bewirtschaftungsermessen**⁴⁵⁷ der Behörde. Anders als etwa im Bergrecht besteht **kein Rechtsanspruch**⁴⁵⁸ auf die Erlaubnis oder Bewilligung. Bei Ausübung ihres Ermessens hat sich die Behörde an den Grundsätzen in § 6 WHG zu orientieren und ist insbesondere an die in den Maßnahmenprogrammen gemäß § 82 WHG enthaltenen Ge- und Verbote gebunden.

⁴⁵⁵ Zur Festsetzung von Wasserschutzgebieten nach § 51 WHG siehe Punkt 6.2.2.3.1.

⁴⁵⁶ *Reinhardt*, in: Czychowski/Reinhardt, WHG, § 12, Rn. 11.

⁴⁵⁷ In diesem Zusammenhang könnten sich ggf. Konflikte zwischen der gebundenen bergrechtlichen Entscheidung und dem Ermessen im Rahmen des Wasserrechts zeigen, wenn zutagegefordertes Thermalfluid auch als „Sole“, mithin als bergfreier Bodenschatz i. S. d. § 3 Abs. 3 BBergG, gewonnen werden soll.

⁴⁵⁸ Dieser kann sich nur ausnahmsweise etwa über den Gleichheitssatz (Art. 3 Abs. 1 GG) aus der Selbstbindung der Verwaltung oder aus einer in Vorverhandlungen gegebenen Zusicherung ergeben.

6.2.7.5.3 Behördliche Zuständigkeit

Nach § 19 Abs. 2 WHG entscheidet die Bergbehörde über die Erteilung einer Erlaubnis im Sinne von § 8 WHG, wenn ein bergrechtlicher Betriebsplan die Benutzung von Gewässern vorsieht. Dies wird etwa bei der hydrothermalen Geothermie regelmäßig der Fall sein. Die Entscheidung über die Erlaubnis hat die Bergbehörde gemäß § 19 Abs. 3 WHG im Einvernehmen mit der zuständigen Wasserbehörde zu treffen. Das bloße Einholen einer Stellungnahme der zuständigen Wasserbehörde durch die Bergbehörde ist nicht ausreichend um die Anforderungen des § 19 Abs. 3 WHG zu erfüllen.

Nicht erfasst von § 19 Abs. 2 WHG sind die Fälle, in denen die Gewässerbenutzung nicht im bergrechtlich genehmigten Teil des Geothermie-Kraftwerks stattfindet, die Gewässerbenutzung somit auch nicht im Betriebsplan vorgesehen ist. In diesen Fällen verbleibt die Zuständigkeit für Erteilung der Erlaubnis bei der Wasserbehörde. Ebenso verbleibt die Zuständigkeit für die Erteilung einer Bewilligung im Sinne von § 8 WHG grundsätzlich bei der Wasserbehörde.⁴⁵⁹ Da jedoch für Benutzungen im Sinne von § 9 Abs. 1 Nr. 4, Abs. 2 Nr. 2 WHG gemäß § 14 Abs. 1 Nr. 3 WHG eine Bewilligung nicht erteilt werden kann, kommt für die Nutzung der Geothermie regelmäßig nur die Erteilung einer Erlaubnis in Betracht.⁴⁶⁰

6.2.7.6 Geothermieranlage als Anlage im Sinne des § 62 Abs. 1 WHG

§ 62 WHG regelt Anforderungen an Anlagen zum Lagern, Abfüllen, Herstellen und Behandeln wassergefährdender Stoffe sowie Anlagen zum Verwenden wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft und im Bereich öffentlicher Einrichtungen im Sinne von § 62 Abs. 1 Satz 1 WHG.

⁴⁵⁹ Gemäß Art. 75 Abs. 4 Satz 1 Bayerisches Wassergesetz ist die Bergbehörde auch für die Erteilung der Bewilligung zuständig, vgl. hierzu: *Reinhardt*, in: Czychowski/Reinhardt, WHG, § 19, Rn. 21.

⁴⁶⁰ Die Erteilung einer Bewilligung käme nur für Benutzung im Sinne des § 9 Abs. 1 Nr. 5 WHG in Frage. Die Erteilung einer solchen Bewilligung mit dem Inhalt nach § 10 Abs. 1 WHG dürfte aber praktisch nie vorkommen.

6.2.7.6.1 Anlagenteile des Primärkreislaufs als Anlage i. S. d. § 62 Abs. 1 WHG

Fraglich ist, ob der Anlagenbegriff des § 62 Abs. 1 Satz 1 WHG, der nicht gleichzusetzen ist mit dem Anlagenbegriff des § 89 Abs. 2 WHG⁴⁶¹, auch für die Anlagenteile des Primärkreislaufs gilt, die dem Bergrecht unterliegen. So wird in der rechtswissenschaftlichen Literatur⁴⁶² unter Verweis auf parlamentarische Gesetzgebungsunterlagen⁴⁶³ zur Änderung des WHG die Ansicht vertreten, dass mit dem **Tatbestandsmerkmal „im Bereich der gewerblichen Wirtschaft“** nur Wirtschaftszweige außerhalb der „Urproduktion“, d. h. der Land- und Forstwirtschaft, des Bergbaus, der Fischerei und des Gartenbaus umfasst seien. Die als Beleg für einen entsprechenden gesetzgeberischen Willen angeführte BT-Drucksache spricht aber – anders als der entsprechenden Literaturmeinung angegeben – nur davon, dass vom Anlagenbegriff des § 62 Abs. 1 WHG nicht die Landwirtschaft erfasst sei. Auch eine Anlehnung an den von den Erfordernissen der Gefahrenabwehr losgelösten steuerrechtlichen Gewerbebegriff des § 15 EStG spräche entgegen der angeführten Literaturmeinung dafür, den Anlagenbegriff des § 62 Abs. 1 WHG auch auf Anlagen des Bergbaus als „Bereich der gewerblichen Wirtschaft“ zu erstrecken, da nach § 15 Abs. 1 Nr. 1 Satz 2 EStG auch Einkünfte aus Bergbauunternehmen zu den Einkünften aus gewerblichen Unternehmen zählen.

Die Systematik der Regelungen der §§ 62, 63 WHG für Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen spräche ebenfalls gegen eine Ausklammerung bergbaulicher Anlagen. Ausnahmen vom Anwendungsbereich der §§ 62, 63 sieht § 62 Abs. 6 WHG vor.

Eine Subsidiaritätsklausel wie in § 3 Abs. 1 Nr. 10 BBodSchG enthält das WHG nicht. Gleichwohl ist nicht zuletzt aufgrund der klaren Zielrichtung des Bergrechts, unter das Bergrecht fallende Tätigkeiten und Anlagen regelmäßig auch primär dort im Wege der Betriebsplanzulassung zu regeln, mit der o. g. Ansicht davon auszugehen, dass die bergrechtlichen Regelungen spezialgesetzlich den Regelungen der §§ 62 ff. WHG vorgehen. Eine dieser vorangigen Anwendung des BBergG ausdrücklich entgegenste-

⁴⁶¹ Siehe hierzu auch *Roßnagel/Hentschel/Polzer*, Rechtliche Rahmenbedingungen der unkonventionellen Erdgasförderung mittels Fracking, Gutachten im Rahmen des Neutralen Expertenkreises, 2012, Seite 51.

⁴⁶² *Reinhardt*, in: Czychowski/Reinhardt, WHG, § 62, Rn. 28; unter Verweis auf die vorgenannte Kommentierung auch *Roßnagel/Hentschel/Polzer*, aaO, Seite 51.

⁴⁶³ BT-Drucksache 10/5727, Seite 21.

hende Willensbildung des WHG-Gesetzgebers ist trotz der hier aufgezeigten Defizite in der Definition des Anlagenbegriffs des § 62 Abs. 1 WHG nicht erkennbar.

Die dem Bergrecht unterliegenden Anlagenteile des Primärkreislaufs sind folglich keine Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen i. S. d. § 62 Abs. 1 WHG.

6.2.7.6.2 Anlagenteile des Sekundärkreislaufs als Anlage i. S. d. § 62 Abs. 1 WHG

In Geothermie-Kraftwerken kommen vielfach Stoffe zum Einsatz, hinsichtlich derer in Betracht zu ziehen ist, dass es sich um wassergefährdende Stoffe im Sinne der Norm handelt. Sollte dies etwa hinsichtlich der im Sekundärkreislauf einer Kalina-Anlage oder einer ORC-Anlage als Arbeitsmedium eingesetzten Stoffe der Fall sein, so würde es sich bei dem Kraftwerk um eine Anlage zur Verwendung wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft handeln, die die Anforderungen der §§ 62 f. WHG erfüllen muss.

6.2.7.6.3 Umgang mit wassergefährdenden Stoffen in Geothermieranlagen

Nach § 62 Abs. 3 WHG sind wassergefährdende Stoffe im Sinne des Abschnitts feste, flüssige und gasförmige Stoffe, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht unerheblichen Ausmaß nachteilige Veränderungen der Wasserbeschaffenheit herbeizuführen. In § 62 Abs. 4 Nr. 1 WHG wird die Bundesregierung ermächtigt, in einer Rechtsverordnung wassergefährdende Stoffe zu bestimmen und einzustufen. Von dieser Verordnungsermächtigung hat die Bundesregierung bislang keinen Gebrauch gemacht.

Eine Bestimmung der wassergefährdenden Stoffe und eine Einstufung entsprechend ihrer Gefährlichkeit findet sich in der durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit mit Zustimmung des Bundesrates erlassenen allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen (VwVwS). Diese Verwaltungsvorschrift ist auf Grundlage der Vorgängervorschrift zu § 62 Abs. 4 Nr. 1 WHG in § 19g WHG a.F. erlassen worden.

Nach Nr. 2.1.1 i. V. m. Anlage 2 VwVwS handelt es sich bei dem als Arbeitsmedium im Sekundärkreislauf von Kalina-Anlagen eingesetzten Ammoniak um einen wassergefährdenden Stoff der Wassergefährdungsklasse 2. Auch das im Geothermie-Kraftwerk in Landau - einer ORC-Anlage - im Sekundärkreislauf als Arbeitsmedium eingesetzte Isopentan stellt nach Nr. 2.1.1 VwVwS i. V. m. Anlage 2 einen wassergefährdenden Stoff der Wassergefährdungsklasse 2 dar.

Zudem muss in Betracht gezogen werden, dass auch das bei hydrothermalen Geothermie durch die Förderbohrung zu Tage geförderte und durch die Injektionsbohrung wieder eingeleitete Thermalwasser wassergefährdende Stoffe beinhaltet. Ist ein wassergefährdender Stoff Bestandteil des Thermalwassers, so können zur Beurteilung der Frage, ob das Thermalwasser als Stoffgemisch einen wassergefährdenden Stoff im Sinne von § 62 Abs. 3 WHG darstellt, die Regelungen in Nr. 2.2 i. V. m. Anhang 4 VwVwS herangezogen werden.

6.2.7.6.4 Anforderungen an Anlagen im Sinne des § 62 Abs. 1 WHG

Anlagen im Sinne des § 62 Abs. 1 Satz 1 WHG müssen gemäß der Regelung so beschaffen sein und so errichtet, unterhalten, betrieben und stillgelegt werden, dass eine nachteilige Veränderung der Eigenschaften von Gewässern nicht zu besorgen ist. Das gleiche gilt für bestimmte in § 62 Abs. 1 Satz 2 WHG enumerativ aufgezählte Rohrleitungsanlagen. Nach § 62 Abs. 2 WHG müssen Anlagen nach § 62 Abs. 1 WHG mindestens entsprechend den allgemein anerkannten Regeln der Technik beschaffen sein sowie errichtet, betrieben, unterhalten und stillgelegt werden.

6.2.7.6.4.1 Verordnungen zur Konkretisierung der Anforderungen aus § 62 Abs. 1 und 2 WHG

Gemäß § 62 Abs. 4 WHG kann die Bundesregierung durch Rechtsverordnung nähere Regelungen erlassen über

1. die Bestimmung der wassergefährdenden Stoffe und ihre Einstufung entsprechend ihrer Gefährlichkeit, über eine hierbei erforderliche Mitwirkung des Umweltbundesamtes und anderer Stellen sowie über Mitwirkungspflichten von Anlagenbetreibern im Zusammenhang mit der Einstufung von Stoffen,

2. die Einsetzung einer Kommission zur Beratung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit in Fragen der Stoffeinstufung einschließlich hiermit zusammenhängender organisatorischer Fragen,
3. Anforderungen an die Beschaffenheit und Lage von Anlagen nach Absatz 1,
4. technische Regeln, die den allgemein anerkannten Regeln der Technik entsprechen,
5. Pflichten bei der Planung, der Errichtung, dem Betrieb, dem Befüllen, dem Entleeren, der Instandhaltung, der Instandsetzung, der Überwachung, der Überprüfung, der Reinigung, der Stilllegung und der Änderung von Anlagen nach Absatz 1 sowie Pflichten beim Austreten wassergefährdender Stoffe aus derartigen Anlagen; in der Rechtsverordnung kann die Durchführung bestimmter Tätigkeiten Sachverständigen oder Fachbetrieben vorbehalten werden,
6. Befugnisse der zuständigen Behörde, im Einzelfall Anforderungen an Anlagen nach Absatz 1 festzulegen und den Betreibern solcher Anlagen bestimmte Maßnahmen aufzuerlegen,
7. Anforderungen an Sachverständige und Sachverständigenorganisationen sowie an Fachbetriebe und Güte- und Überwachungsgemeinschaften.

Die Bundesregierung macht mit dem derzeitigen Entwurf der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV-E) von den Verordnungsermächtigungen in § 62 Abs. 4 Nr. 1, Nr. 2⁴⁶⁴, Nr. 3, Nr. 4 und Nr. 6 WHG Gebrauch, der aber aufgrund entsprechend geltend gemachter Änderungswünsche einiger Länder im Bundesrat bislang noch nicht in Kraft gesetzt werden konnte.⁴⁶⁵

Von den Verordnungsermächtigungen in § 62 Abs. 4 Nr. 5 und Nr. 7 WHG hat die Bundesregierung dagegen bereits teilweise Gebrauch gemacht und die Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (WasgefStAnIV) erlassen. Diese (Übergangs-) Verordnung beschränkt sich jedoch darauf, die in den §§ 19i

⁴⁶⁴ Schon bisher bestand eine institutionalisierte wissenschaftliche Beratung durch die das BMUB beratende und beim UBA verortete „Kommission Bewertung wassergefährdende Stoffe“ (KBwS), u. a. bei der Auswertung und Berücksichtigung der Entwicklung im europäischen Umfeld, insbesondere im Zusammenhang mit dem neuen Chemikalienmanagement nach der REACH-VO, der Wasserrahmenrichtlinie und der Bodenschutzstrategie sowie der Fortentwicklung der internationalen Einstufungsgrundlagen (GHS). Der Entwurf der AwSV sieht nun weiterhin die KBwS vor, so dass die Kontinuität gesichert ist (siehe *Sanden* in BeckOK, WHG § 62 Rn. 32).

⁴⁶⁵ Siehe hierzu Punkt 6.2.7.6.4.3.

Abs. 1, Abs. 2, Abs. 3 Satz 1, 19k, 19l WHG a.F. enthaltenen Regelungen betreffend Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen wiederzugeben, die im WHG 2009 keine Entsprechung finden.

Auf Länderebene sind detaillierte Regelungen betreffend Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vorhanden. In Rheinland-Pfalz handelt es sich dabei um die auf Grundlage des § 20 Landeswassergesetz Rheinland-Pfalz (LWG RLP) erlassene Landesverordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen und über Fachbetriebe des Landes Rheinland-Pfalz (VAwS RLP). Fraglich ist jedoch, ob die landesrechtlichen Verordnungen nach Überführung des Regelungsbereichs Wasserhaushalt in die konkurrierende Gesetzgebungskompetenz, der Einführung der Verordnungsermächtigungen in § 62 Abs. 4 WHG sowie dem (bestehenden bzw. bevorstehenden) Erlass der o. g. Verordnung(en) über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen durch die Bundesregierung neben der Verordnung des Bundes weiterhin angewendet werden können.

Da es sich bei den Regelungen über den Wasserhaushalt um eine Materie der konkurrierenden Gesetzgebung handelt, haben die Länder nach Art. 72 Abs. 1 GG die Befugnis zur Gesetzgebung grundsätzlich nur solange und soweit der Bund von seiner Zuständigkeit nicht durch Gesetz Gebrauch gemacht hat. Weil es sich bei Regelungen betreffend Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen um anlagenbezogene Regelungen handelt, können die Länder auch nicht gemäß § 72 Abs. 3 Nr. 5 GG abweichende Regelungen treffen.

Vorliegend hat der Bund zunächst in Form der Verordnungsermächtigung in § 62 Abs. 4 Nr. 5 und Nr. 7 WHG von seiner Gesetzgebungszuständigkeit Gebrauch gemacht. Die überwiegende Meinung in der Literatur geht davon aus, dass im Bereich der konkurrierenden Gesetzgebung eine in einem Bundesgesetz enthaltene Verordnungsermächtigung die Länder nicht generell von der Gesetzgebung ausschließt. Dies sei allenfalls dann der Fall, wenn der Gesetzgeber seinen Willen zu einer erschöpfenden Regelung durch eine bloße Verordnungsermächtigung eindeutig und unzweifelhaft zum Ausdruck gebracht habe.⁴⁶⁶ Hierfür liegen derzeit keine Anhaltspunkte vor.

⁴⁶⁶ Eine Übersicht über den Meinungsstand bietet *Jarass*, Regelungsspielräume des Landesgesetzgebers im Bereich der konkurrierenden Gesetzgebung und in anderen Bereichen, NVwZ 1996, S. 1041, 1046.

Es sprechen zudem auch starke Argumente dagegen, dass die auf Grundlage der Verordnungsermächtigung erlassene Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (WasgefStAnIV) vom 31. März 2010⁴⁶⁷ Sperrwirkung entfaltet. Denn diese Verordnung wurde gerade nicht mit der Absicht erlassen, den anlagenbezogenen Umgang mit wassergefährdenden Stoffen abschließend zu regeln. Vielmehr soll die Verordnung lediglich übergangsweise - bis zum Inkrafttreten einer neuen Verordnung - sicherstellen, dass die in den §§ 19i Abs. 1, Abs. 2, Abs. 3 Satz 1, 19k, 19l WHG a.F. enthaltenen Anforderungen an Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, auch nach Außerkrafttreten der Normen, weiterhin zu beachten sind. Mit dem Entwurf der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV-E) wird eine umfangreichere und detailliertere Verordnung derzeit erarbeitet, die die wasserrechtlichen Anforderungen an Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen eindeutig und einheitlich festlegt und die aktuelle Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen ablösen soll (siehe nachfolgend Punkt 6.2.7.6.4.3).

Aus diesen Gründen erscheint es gut vertretbar und zielführend, die landesgesetzlichen Regelungen betreffend Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen neben den Regelungen des Bundes anzuwenden, solange und soweit sie zu diesen Regelungen nicht in Widerspruch stehen.

6.2.7.6.4.2 Wesentliche Inhalte der Landesverordnungen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen

Zentraler Grundsatz der VAWS der Länder ist das so genannte Dichtheitsgebot.⁴⁶⁸ In der VAWS RLP hat das Dichtheitsgebot insbesondere Niederschlag gefunden in § 3 VAWS RLP. Gemäß § 3 Abs. 1 Nr.1 VAWS RLP müssen Anlagen so beschaffen und betrieben werden, dass wassergefährdende Stoffe nicht austreten können. Sie müssen dicht, standsicher und gegen die zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einflüsse hinreichend widerstandsfähig sein. Insbesondere müssen Verlagerungen von Behältern und Rohrleitungen durch Wassereinflüsse, vor allem das Aufschwimmen bei Überflutung, ausgeschlossen sein. Einwandige unterirdische Behälter sind unzulässig. Nach § 3 Abs. 1 Nr. 2 VAWS RLP müssen Undichtheiten aller An-

⁴⁶⁷ BGBl. I 2010, S. 377.

⁴⁶⁸ Sanden in BeckOK, WHG, Edition 21, Stand 01.10.2011, § 62 Rn. 9.

lagenteile, die mit wassergefährdenden Stoffen in Berührung stehen, schnell und zuverlässig erkennbar sein. Daneben verlangt § 3 Abs. 1 Nr. 3 VAWS RLP, dass austretende wassergefährdende Stoffe schnell und zuverlässig erkannt, zurückgehalten und verwertet oder ordnungsgemäß entsorgt werden. Die Anlagen müssen mit einem dichten und beständigen Auffangraum ausgerüstet werden, sofern sie nicht doppelwandig und mit Leckageanzeigergeräten versehen sind. Im Schadensfall anfallende Stoffe, die mit ausgetretenen wassergefährdenden Stoffen verunreinigt sein können, müssen nach § 3 Abs. 1 Nr. 4 VAWS RLP zurückgehalten und verwertet oder ordnungsgemäß entsorgt werden. Nach § 3 Abs. 1 Nr. 5 VAWS RLP dürfen Auffangräume keine Abläufe haben.

Zur näheren Auslegung von § 62 Abs. 2 WHG, wonach Anlagen im Sinne von § 62 Abs. 1 WHG nur entsprechend den allgemein anerkannten Regeln der Technik beschaffen sein sowie errichtet, unterhalten, betrieben und stillgelegt werden dürfen, sind Regelungen in den VAWS der Länder enthalten, wonach als allgemein anerkannte Regeln der Technik insbesondere die technischen Vorschriften und Baubestimmungen gelten, die die oberste Wasserbehörde oder die oberste Bauaufsichtsbehörde durch Verwaltungsvorschrift eingeführt hat.⁴⁶⁹ Beispielhaft sei an dieser Stelle auf Nr. 4 der Verwaltungsvorschrift zum Vollzug der VAWS NRW verwiesen, wo es diesbezüglich heißt, dass für den Vollzug der VAWS neben den Regeln wie EN- oder DIN-Normen, AD-Merkblätter, VDI-Richtlinien, VDE-Richtlinien, AGI-Merkblätter, TRbF, TRB, TRR, TRD usw. insbesondere die Technischen Regeln für wassergefährdende Stoffe (TRwS) gelten.⁴⁷⁰

6.2.7.6.4.3 Neue Anlagenverordnung zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV)

Die landesrechtlichen Verordnungen über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (VAWS) gehörten in Deutschland bisher zu den wichtigsten Rechtsgrundlagen für den Boden- und Gewässerschutz. Seit 2010 wird daran gearbeitet, dass

⁴⁶⁹ Vgl. § 5 VAWS RLP oder § 4 VAWS NRW.

⁴⁷⁰ Auf der Website des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen findet sich eine Zusammenstellung der TRwS: <http://www.lanuv.nrw.de/wasser/pdf/ZuTRwS.pdf>

die 16 Anlagenverordnungen der Bundesländer in eine Bundesanlagenverordnung (AwSV) übergehen.⁴⁷¹

Ein erster Entwurf für die Bundesanlagenverordnung stammt aus dem Dezember 2010. Seither folgten als Ergebnis von schriftlichen und mündlichen Anhörungen sowie Resortabstimmungen weitere Entwürfe. Der Entwurf vom 22.07.2013 wurde dabei in etlichen Punkten geändert. Nachdem aber der Bundesrat auch dem aktuellen Verordnungsentwurf (AwSV-E) vom 26.02.2014⁴⁷² am 23.05.2014 nur mit erheblichen Änderungen zugestimmt hat⁴⁷³, muss die Bundesregierung als nächstes über die Annahme der verlangten Änderungen entscheiden.

Inwieweit naturbedingt erhöhte Schadstoffgehalte (geogene Belastungen) des Thermalwassers (erhöhte Konzentration an Salzen und anderen gelösten Stoffen) im Rahmen der nach § 3 ff. AwSV-E durchzuführenden Einstufung von Stoffen und Gemischen zu berücksichtigen sind, ist fraglich. Bereits von der Begrifflichkeit her erscheint es befremdlich, Thermalwasser, welches – wie oben unter Punkt 6.2.7.1 dargestellt – ebenfalls dem Grundwasserbegriff unterfällt, ggf. selbst in eine Wassergefährdungsklasse (WGK) einzuordnen. Dass in diesem Zusammenhang aber auch behördlicherseits Unsicherheiten dahingehend bestehen, das jeweilige Thermalwasser im Einzelfall korrekt einzuordnen, zeigt u. a. die Drucksache 16/110 vom 7.7.2011 vom Landtag Rheinland-Pfalz und das Abschlussdokument der Mediation Tiefe Geothermie Vorderpfalz⁴⁷⁴.

6.2.7.6.5 Eignungsfeststellung gemäß § 63 WHG

Anlagen zum Lagern, Abfüllen oder Umschlagen wassergefährdender Stoffe dürfen nur errichtet und betrieben werden, wenn ihre Eignung gemäß § 63 Abs. 1 Satz 1 WHG von der zuständigen Behörde festgestellt worden ist. Das Erfordernis der Eignungsfeststellung als Vorwegkontrolle **gilt** hingegen **nicht für** die ebenfalls von § 62 Abs. 1

⁴⁷¹ Siehe hierzu auch *Holländer/Unnerstall/Skiba et al.*, Bundeseinheitliche Regelung des Umgangs mit wassergefährdenden Stoffen, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3707 48 300, März 2010.

⁴⁷² BR-Drs 77/14.

⁴⁷³ Vgl. BR-Drs 77/14 (Beschluss).

⁴⁷⁴ Abrufbar unter <http://www.mwkel.rlp.de/Wirtschaft/Rohstoffwirtschaft,-Geologie/Mediation-Tiefe-Geothermie-Vorderpfalz/Dokumente/> (zuletzt abgerufen am 31.03.2014).

WHG erfassten **Anlagen zum Herstellen, Behandeln und Verwenden wassergefährdender Stoffe (sog. HBV-Anlagen)**.

Immer dann, wenn im Sekundärkreislauf eines Geothermie-Kraftwerks ein wassergefährdendes Arbeitsmedium verwendet wird, ist es aber zumindest denkbar, dass auch zusätzliche Anlagen zum Lagern des Mediums im räumlichen Zusammenhang mit dem Geothermie-Kraftwerk vorhanden sind, z. B. wenn der Sekundärkreislauf gewartet gehen soll. Die der Lagerung dienenden Vorrichtungen bedürften dann grundsätzlich einer Eignungsfeststellung gemäß § 63 Abs. 1 Satz 1 WHG. Dies gilt unabhängig von der Frage, ob es sich bei den Lagervorrichtungen um eigenständige Anlagen im Sinne des § 63 Abs. 1 Satz 1 WHG handelt oder ob sie als Anlagenbestandteile gemeinsam mit den Anlagenteilen zur Verwendung wassergefährdender Stoffe eine einheitliche Anlage bilden. Denn gemäß § 62 Abs. 1 Satz 2 WHG kann eine Eignungsfeststellung auch für Anlagenteile erteilt werden.

Bei der Eignungsfeststellung handelt es sich um eine behördliche Bescheinigung in Form eines Verwaltungsaktes, dass bestimmte Anlagen oder Anlagenteile den wasserrechtlichen Anforderungen der §§ 62, 63 WHG genügen.⁴⁷⁵

Nach § 63 Abs. 3 WHG entfällt die Eignungsfeststellung für Anlagen, Anlagenteile oder technische Schutzvorrichtungen, bei denen nach den bauordnungsrechtlichen Vorschriften über die Verwendung von Bauprodukten, Bauarten oder Bausätzen auch die Einhaltung der wasserrechtlichen Anforderungen sichergestellt wird (§ 63 Abs. 3 Nr. 2 WHG), die nach immissionsschutzrechtlichen Vorschriften unter Berücksichtigung der wasserrechtlichen Anforderungen der Bauart nach zugelassen sind oder einer Bauartzulassung bedürfen (§ 63 Abs. 3 Nr. 3 WHG) oder für die eine Genehmigung nach baurechtlichen Vorschriften erteilt worden ist, sofern bei der Genehmigung die wasserrechtlichen Anforderungen zu berücksichtigen sind (§ 63 Abs. 3 Nr. 4 WHG).

6.2.7.7 Sonstige wasserrechtliche Anforderungen

Von Bedeutung im Zusammenhang mit der Tiefengeothermie können im Übrigen die landesrechtlichen Generalklauseln (vgl. z. B. § 93 Abs. 4 LWG RLP) sein. Nach § 93

⁴⁷⁵ Reinhardt, in: Czychowski/Reinhardt, WHG § 63, Rn. 6f.

Abs. 4 LWG RLP sind bspw. die zuständigen Wasserbehörden befugt, im Einzelfall die notwendigen Maßnahmen anzuordnen, um zu gewährleisten, dass die nach dem WHG, dem LWG RLP oder aufgrund dieser Gesetze begründeten Verpflichtungen erfüllt werden und vermeidbare Beeinträchtigungen unterbleiben. Auf Grundlage dieser Regelungen könnte die Wasserbehörde beispielsweise die Einhaltung der Anforderungen aus § 62 WHG auch dann durchsetzen, wenn eine präventive Kontrolle der Anlage zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen nach § 63 WHG nicht vorgesehen ist.

Grundsätzlich kann sich eine Möglichkeit der präventiven Kontrolle von Bohrungen durch die Behörde zudem aus § 49 WHG („Erdaufschlüsse“) i. V. m. landesrechtlichen Vorschriften (z. B. § 43 LWG RLP) ergeben. Nach § 49 Abs. 1 Satz 1 WHG sind Arbeiten, die so tief in den Boden eindringen, dass sie sich unmittelbar oder mittelbar auf die Bewegung, die Höhe oder die Beschaffenheit des Grundwassers auswirken können, der zuständigen Behörde einen Monat vor Beginn der Arbeiten anzuzeigen. Zu überwachen sind Erdarbeiten, unabhängig von ihrer Art und der sie tragenden Intention. Dazu zählen auch Arbeiten im Vorfeld einer Benutzung nach § 9 WHG sowie Tätigkeiten, die keinen Bezug zu einer Gewässerbenutzung haben.⁴⁷⁶ Entscheidend ist allein, dass sie sich – unmittelbar oder mittelbar – auf bestimmte Eigenschaften des Grundwassers (Bewegung, Höhe oder Beschaffenheit) auswirken können. Auf den Eintritt tatsächlicher Auswirkungen kommt es nicht an. Andererseits reicht die schlichte Besorgnis möglicher Einwirkungen nicht aus; angesichts des abweichenden Wortlauts gegenüber entsprechenden anderen wasserrechtlichen Normen muss insoweit eine „hinreichende Wahrscheinlichkeit“ bestehen.⁴⁷⁷

6.2.7.8 Grundwassermonitoring

Nach § 9 Abs. 1 GrwV sind in jedem Grundwasserkörper Messstellen für eine repräsentative Überwachung des mengenmäßigen Grundwasserzustands nach Maßgabe der Anlage 3 und des chemischen Grundwasserzustands nach Maßgabe der Anlage 4 Nummer 1 zu errichten und zu betreiben.

⁴⁷⁶ Posser in BeckOK, WHG § 49 Rn. 2 mit weiteren Nachweisen.

⁴⁷⁷ Posser in BeckOK, WHG § 49 Rn. 2.

Wie unter Punkt 6.2.7.3 ausgeführt, muss aber nicht jeder noch so tiefe Grundwasserkörper i. S. der Definition nach § 3 Nr. 6 WHG überwacht werden.⁴⁷⁸ Wesentliches Element der Überwachung ist die Repräsentativität der Messstellen und der analytischen Kontrolle. Die Messstellen müssen so ausgewählt sein, dass sie die Nutzungen (Landwirtschaft, Siedlung, Industrie, Forst etc.) entsprechend ihrem Risikopotential erfassen.⁴⁷⁹ Dabei spielen die potentiellen Eintragspfade, das Transportverhalten und auch die hydrogeologischen Verhältnisse des Grundwasserkörpers eine entscheidende Rolle. Sofern keine konkreten Hinweise auf Schadstoffrisiken bestehen, ist eine Überblicksüberwachung, bei der Auffälligkeiten oder Hinweise auf Schadstoffeinträge erfasst werden können, ausreichend. Besteht bereits ein konkretes Risiko, dass die Bewirtschaftungsziele des Wasserhaushaltsgesetzes im Hinblick auf einen für die öffentliche Wasserversorgung relevanten Grundwasserleiter nicht erreicht werden, ist eine zeitlich und räumlich verdichtete operative Überwachung erforderlich. § 9 Abs. 3 GrwV verweist hinsichtlich der Kontroll- und Analysemethoden auf eine entsprechende Auflistung in Anlage 5 der GrwV. Damit sollen Zuverlässigkeit und Vergleichbarkeit der Analysewerte sichergestellt werden.

Anzahl, Lage und Tiefe der Messstellen werden von den zuständigen Behörden auf der Grundlage der lokalen hydrogeologischen und hydraulischen Gegebenheiten im Rahmen der Genehmigungsverfahren festgelegt. Die wasserrechtlichen Vorgaben zur Einrichtung und zum Betrieb von Grundwassermeßstellen werden u. a. durch das untergesetzliche Regelwerk des DVGW weiter konkretisiert (siehe insbesondere die Arbeitsblätter W 108 „Messnetze zur Überwachung der Grundwasserbeschaffenheit in Wassergewinnungsgebieten“, W 112 „Grundsätze der Grundwasserprobenahme aus Grundwassermessstellen“, W 121 „Bau und Ausbau von Grundwassermessstellen“ sowie W 129 „Eignungsprüfung von Grundwassermessstellen“).

Mit einer transparenten Darstellung der Überwachung der für die öffentliche Wasserversorgung relevanten Grundwasserleiter, möglicherweise ergänzt um weitere tiefendiffe-

⁴⁷⁸ Losgelöst von den Grundwassermessstellen zur Überwachung der Grundwasserkörper sind auch für den Betrieb der Geothermieanlage zuverlässige Wasser und Gasanalysen nötig. Insbesondere ein On-line-Gasmonitoringsystem, das im geschlossenen System in kurzen Abständen die Zusammensetzung der im Thermalwasser gelösten Gase und das Gas/Wasser-Verhältnis bestimmt, wäre eine gute Basis für einen revisionsarmen Betrieb der Geothermieanlage (vgl. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 0329937A „Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen – Aspekte der langfristigen Betriebssicherheit und der zukünftigen Technologie geothermischer Anlagen in Deutschland“, Seite 133).

⁴⁷⁹ *Keppner* in Landmann/Rohmer UmweltR, GrwV § 9 Rn. 1.

renzierte Grundwassermeßstellen, ließe sich etwaigen Sorgen der Wasserwirtschaft und der Tiefengeothermie kritisch gegenüberstehender Teile der Bevölkerung begegnen.

6.2.7.9 Zwischenergebnis Wasserrecht

Grundwasser ist nicht nur das unterirdische Wasser, das in irgendeiner Weise (z. B. für die Wasserversorgung) bereits genutzt wird oder in absehbarer Zeit für bestimmte Nutzungen vorgesehen ist, sondern der gesamte Grundwasserschatz. Wasser, welches sich in der Sättigungszone befindet und in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht, ist folglich unabhängig von der Tiefe und vom Salzgehalt vom WHG erfasst. Allerdings sind die Vorbelastungen aufgrund geogener Stoffe zur Begründung von Ausnahmen von den Bewirtschaftungszielen nach § 47 WHG und dem Reinhaltungsgebot nach § 48 WHG (zur Verhinderung nachteiliger Veränderungen der Wasserbeschaffenheit) zu berücksichtigen. Im Ergebnis kann damit an die Tiefengrundwässer ein anderer Maßstab angelegt werden, als an andere Grundwasserkörper, so dass nicht jede stoffliche Beeinflussung eine nachteilige Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit darstellt.

Im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von Anlagen der Tiefengeothermie kommen im Rahmen des § 9 WHG je nach Sachverhalt mehrere (echte und unechte) Benutzungstatbestände in Betracht (§ 9 Abs. 1 Nr. 4 und Nr. 5 sowie § 9 Abs. 2 Nr. 1 und Nr. 2 WHG). Aus Gründen der Rechtssicherheit beim behördlichen Vollzug könnte daher das Aufbrechen von Gesteinen unter hydraulischem Druck aus Tiefbohrungen heraus zur Aufsuchung oder Gewinnung von Erdgas, Erdöl oder Erdwärme als eigener Benutzungstatbestand im Rahmen des § 9 WHG ausgestaltet werden.

Zum behördlichen Prüfprogramm für die Erteilung einer wasserrechtlichen Erlaubnis zur Benutzung eines Gewässers gehören gemäß § 12 Abs. 1 Nr. 1 i. V. m. § 3 Nr. 10 WHG alle Anforderungen, die sich aus diesem Gesetz, aus auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder aus sonstigen wasserrechtlichen Vorschriften ergeben. Dies umfasst etwa die für das jeweilige Gewässer geltenden Bewirtschaftungsziele, das die Bewirtschaftungsziele konkretisierende Verordnungsrecht, die wasserhaushaltsgesetzlichen Reinhaltbestimmungen oder einschlägige Benutzungsbegrenzungen und Verbote in Schutzgebieten.

Um etwaigen Sorgen der Wasserwirtschaft und der Tiefengeothermie kritisch gegenüberstehender Teile der Bevölkerung zu begegnen, könnte der Besorgnisgrundsatz in § 48 WHG um eine Formulierung ergänzt werden, wonach eine Erlaubnis für das Aufbrechen von Gesteinen unter hydraulischem Druck aus Tiefbohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas, Erdöl oder Erdwärme nur erteilt werden darf, wenn dem Grundwasser keine Stoffe oder Gemische zugesetzt werden, die nach der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 („CLP-Verordnung“) als gefährlich und in eine höhere Wassergefährdungsklasse als Wassergefährdungsklasse 1 einzustufen sind (Einstufung bisher nach der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe (VwVwS); die Einstufung erfolgt zukünftig nach dem in der AwSV-E geregelten Verfahren).⁴⁸⁰ So wird einerseits verdeutlicht, dass der Schutz des Trinkwassers als wichtigstes Lebensmittel absolute Priorität hat. Eine solche Formulierung wird andererseits keine größeren Einschränkungen für die Tiefengeothermie mit sich bringen.

Die dem Bergrecht unterliegen Anlagenteile des Primärkreislaufs sind keine Anlagen zum Umgang mit wassergefährdeten Stoffen i. S. d. § 62 Abs. 1 WHG. Kommen hingegen im Sekundärkreislauf einer Kalina-Anlage oder ORC-Anlage wassergefährdende Stoffe i. S. des § 62 Abs. 3 WHG zum Einsatz, handelt es sich bei dem Kraftwerk um eine Anlage zur Verwendung wassergefährdender Stoffe im Bereich der gewerblichen Wirtschaft, die die Anforderungen der §§ 62 f. WHG erfüllen muss.

Hinsichtlich der Anforderung des § 9 Abs. 1 GrwV, wonach in jedem Grundwasserkörper Messstellen für eine repräsentative Überwachung des mengenmäßigen Grundwasserzustands nach Maßgabe der Anlage 3 und des chemischen Grundwasserzustands nach Maßgabe der Anlage 4 Nummer 1 zu errichten und zu betreiben sind, ist hinsichtlich der Bewirtschaftbarkeit bzw. Funktion der Grundwasserkörper zu differenzieren. In großer Tiefe ist insofern regelmäßig keine repräsentative Überwachung des Grundwasserkörpers mehr erforderlich.

Mit einer transparenten Darstellung der Überwachung der für die öffentliche Wasserversorgung relevanten Grundwasserleiter, möglicherweise ergänzt um weitere tiefendifferenzierte Grundwassermeßstellen, ließe sich etwaigen Sorgen der Wasserwirtschaft

⁴⁸⁰ Zur Schnittmenge der Rechtsregime der wassergefährdenden Stoffe und des (Europäischen) Chemikalienrechts siehe ausführlich *Sanden*, Wassergefährdende Stoffe und Europäisches Chemikalienrecht, ZfW 2010, Seite 32 ff.

und der Tiefengeothermie kritisch gegenüberstehender Teile der Bevölkerung begegnen.

6.2.8 Immissionsschutzrecht

Die oberirdischen Anlagenteile des **Sekundärkreislaufs** zur Stromerzeugung unterliegen nicht dem Bergrecht⁴⁸¹, sondern dem **Immissionsschutzrecht** und **Baurecht**. Immissionsschutzrechtlich sind Anlagen des Bergwesens grundsätzlich nur genehmigungsbedürftig, wenn sie gemäß § 4 Abs. 2 Satz 1 BImSchG über Tage errichtet und betrieben werden. Die über Tage liegenden Teile geothermischer Anlagen sind jedoch nicht explizit als spezieller Anlagentyp im Anhang der 4. BImSchV (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) aufgeführt und deshalb nicht per se genehmigungsbedürftige Anlagen i. S. d. § 4 Abs. 1 Satz 3 BImSchG.

6.2.8.1 Immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit

Somit stellt sich die Frage, inwieweit für die immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit der ORC-Prozess- sowie der Kalina-Anlagen die stoffliche Einstufung der eingesetzten Arbeitsmittel sowie deren Funktion in der Anlage entscheidend sind. In Betracht käme eine immissionsschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit der oberirdischen Anlage (Sekundärkreislauf, Kraftwerksteil), wenn diese unter die Kategorie 9 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (Lagerung, Be- und Entladen von Stoffen und Gemischen) fällt. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Verordnung konstitutiv wirkt. In der Verordnung nicht aufgeführte Anlagen sind nicht [immissionsschutzrechtlich] genehmigungsbedürftig, auch wenn sie zu erheblichen Umweltbeeinträchtigungen führen.⁴⁸² Der Kreis der im Anhang 1 zur 4. BImSchV aufgeführten Anlagen ist weit gesteckt. Trotz des weiten Anwendungsbereichs des Anhangs 1 zur 4. BImSchV gibt es aber immer wieder Anlagen mit großen Emissionen, die nicht erfasst werden. Dann ist *de lege ferenda* seitens des Gesetzgebers zu überlegen, die Kriterien für die im-

⁴⁸¹ Die [verarbeitende] Nutzung von Erdwärme wird nach § 4 Abs. 3 Satz 2 zweiter Halbsatz. BBergG einer „Weiterverarbeitung“, d.h. einer sonstigen Bearbeitung oder Verarbeitung von Bodenschätzen, gleichgestellt. Anders als bspw. Kokereien, deren Tätigkeit als „Aufbereitung“ im Sinne des § 4 Abs. 3 Satz 1 BBergG gilt, unterliegen die Fernwärmeauskopplung und Stromerzeugung aus Erdwärme, also die Tätigkeiten jenseits des Primärkreislaufs, nicht dem Bergrecht (siehe hierzu Kapitel 6.2.5).

⁴⁸² Vgl. Jarass, BImSchG, § 4 Rn. 16 ff.

immissionschutzrechtliche Genehmigungsbedürftigkeit zu verändern oder einen neuen Anlagentyp in den Anhang 1 der 4. BImSchV aufzunehmen.

Die im Anhang zur 4. BImSchV verwendeten, die Genehmigungsbedürftigkeit konstituierenden Begriffe dürfen einerseits nicht zu eng verstanden werden; andererseits ist die Verordnung abschließend, weshalb eine Analogie nicht möglich ist.⁴⁸³ Entscheidend ist, ob eine Anlage ihrer Zweckbestimmung und technischen Natur nach unter eine der in der 4. BImSchV genannten Anlagentypen fällt. Bleiben Zweifel, kommt es darauf an, ob die betreffende Anlagenart typischerweise mit den für die fragliche Anlagenart bedeutsamen Umweltgefährdungen verbunden ist. Stellt die fragliche Bestimmung im Anhang der 4. BImSchV, wie das meist geschieht, auf einen bestimmten Zweck ab, muss dieser bestimmungsgemäß und für eine gewisse Dauer verfolgt werden.⁴⁸⁴

Lagerung ist der zentrale Begriff der Nummer 9. Er wird in § 3 BImSchG aber nicht definiert. Im Schrifttum wird unter Lagerung die Aufbewahrung von Stoffen zwecks späterer Verwendung verstanden.⁴⁸⁵ Lagern findet insofern, seinem Wesen entsprechend, vorübergehend statt. Nach Artikel 3 Nr. 8 der Richtlinie 96/82/EG (Seveso-II-Richtlinie), die national in die 12. BImSchV, die Störfall-Verordnung, umgesetzt wurde ist „Lagerung“ das Vorhandensein einer Menge gefährlicher Stoffe zum Zweck der Einlagerung, der Hinterlegung zur sicheren Aufbewahrung oder der Lagerhaltung. Nach § 2 Abs. 6 der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV) ist Lagern das „Aufbewahren zur späteren Verwendung sowie zur Abgabe an andere“.⁴⁸⁶

Die Frage, ob das Vorhalten des Betriebsmittels im Sekundärkreislauf wirklich unter den Begriff der Lagerung fällt, kann damit nicht eindeutig beantwortet werden.

Sofern man aber davon ausgeht, dass der oberirdische Anlagenteil des Sekundärkreislaufs mit dem Kraftwerkteil seiner Zweckbestimmung und technischen Natur zu den in der 4. BImSchV unter Nummer 9 genannten Anlagentypen zählt, dann würde die Überschreitung der dort genannten Mengenschwellen, eine immissionschutzrechtliche Genehmigungspflicht auslösen.

⁴⁸³ So *Jarass*, BImSchG, § 4 Rn. 20 m. w. N..

⁴⁸⁴ *Jarass*, BImSchG, § 4 Rn. 20 m. w. N..

⁴⁸⁵ Vgl. *Schulte/Michalk* in BeckOK BImSchG § 3 Rn. 82; *Jarass*, BImSchG, § 3 Rn. 76.

⁴⁸⁶ *Feldhaus*, BImSchG, B 2.4.4 Kommentierung und Erläuterung zur 4. BImSchV, Anhang 1 Nr. 9 Rn. 17.

Die Arbeitsmittel Isobutan und Propan fallen unter die Nr. 9.1.1.2 des Anhangs 1 der 4. BImSchV (Lagerung, Be- und Entladen von Stoffen und Gemischen). Die Mengenschwellen für Isobutan und Propan liegen für die Durchführung des vereinfachten Verfahrens ohne Öffentlichkeitsbeteiligung nach § 19 BImSchG zwischen 3 t bis weniger als 30 t. Darüber hinaus ist ein Genehmigungsverfahren mit Öffentlichkeitsbeteiligung gemäß § 10 BImSchG durchzuführen. Dasselbe gilt für Ammoniak, der als Stoff in der Stoffliste des Anhangs 2 zur 4. BImSchV aufgeführt ist und somit unter die Nr. 9.3.1 bzw. Nr. 9.3.2 des Anhang 1 fällt. Zu beachten ist jedoch, dass bei Kalina-Anlagen ein Ammoniak-Wassergemisch als Betriebsmittel zum Einsatz kommt, so dass hier auch das Mischungsverhältnis eine weitere Rolle spielt. Isopentan würde als Arbeitsmittel unter die Nr. 9.2.2 fallen, wobei die untere Mengenschwelle von 5.000 t für ORC-Anlagen nicht erreicht werden wird.

6.2.8.2 Anforderungen an immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen

Falls – was wohl in der Praxis regelmäßig anzunehmen ist – die Mengenschwellen hinsichtlich der verwendeten Betriebsmittel nicht überschritten werden, müssen bei geothermischen Anlagen – wie bei anderen immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen – lediglich die **Maßgaben der §§ 22 ff. BImSchG** beachtet werden. Diese sind im bauordnungsrechtlichen Genehmigungsverfahren nach der jeweiligen LBauO zu beachten. Nach § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG sind nicht genehmigungsbedürftige Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass

1. schädliche Umwelteinwirkungen verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind,
2. nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden und
3. die beim Betrieb der Anlagen entstehenden Abfälle ordnungsgemäß beseitigt werden können.

Bestehende Anlagen müssen im Falle einer geänderten Sach- und Rechtslage, z. B. bei Fortentwicklung des **Standes der Technik**⁴⁸⁷, durch geeignete Abhilfemaßnahmen des Anlagenbetreibers den neuen Anforderungen angepasst werden; mithin besitzen die Grundpflichten des § 22 Abs. 1 BImSchG einen **dynamischen Charakter**⁴⁸⁸. Die Struktur der Regelung des § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG entspricht daher im Wesentlichen derjenigen des § 5 BImSchG. Im Vergleich zu den Pflichten der Betreiber genehmigungsbedürftiger Anlagen nach § 5 BImSchG sind die Grundpflichten des § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG reduziert. So bezieht sich der Katalog des § 22 Abs. 1 BImSchG anders als derjenige des § 5 BImSchG nur auf schädliche Umwelteinwirkungen⁴⁸⁹, nicht auch auf sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und Belästigungen für die Allgemeinheit. Dem Wortlaut der Vorschrift des § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG fehlt des Weiteren das in § 5 Abs. 1 Nr. 2 BImSchG enthaltene Vorsorgeprinzip. Nach § 22 Abs. 2 BImSchG bleiben weitergehende öffentlich-rechtliche Vorschriften unberührt.

Um ihre volle Wirksamkeit zu entfalten, werden die Grundpflichten des § 22 Abs. 1 Satz 1 BImSchG in vielen Fällen durch Rechtsverordnung nach § 22 Abs. 1 Satz 2 BImSchG, § 23 BImSchG oder durch Einzelanordnung nach § 24 BImSchG konkretisiert. Die Bundesregierung (§ 23 Abs. 1 BImSchG) oder, soweit die Bundesregierung von der Ermächtigung keinen Gebrauch macht, die Landesregierungen (§ 23 Abs. 2 BImSchG) sind ermächtigt, durch Rechtsverordnung Vorschriften über die Anforderungen an die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb nicht genehmigungsbedürftiger Anlagen zu erlassen. Von der Ermächtigung zum Erlass von spezifischen Rechtsverordnungen wurde im unmittelbaren Bezug zu den obertägigen Anlagen der Tiefengeothermie (mangels Bedarf) kein Gebrauch gemacht. Relevanz haben in der Praxis daher vielmehr die nach § 24 BImSchG möglichen Anordnungen der zuständigen Behörde im Einzelfall.

⁴⁸⁷ **Stand der Technik** im Sinne des BImSchG ist nach § 3 Abs. 6 BImSchG der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere die in der Anlage zum BImSchG aufgeführten Kriterien zu berücksichtigen.

⁴⁸⁸ BeckOK UmweltR/Enders BImSchG § 22 Rn. 9 mit Verweis auf BVerwG NVwZ 2000, 1050, 1053; VGH München NVwZ-RR 2004, 735; Jarass, BImSchG, § 22 Rn 12.

⁴⁸⁹ Schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne des BImSchG sind nach der Definition des § 3 Abs. 1 BImSchG Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen.

Hinsichtlich der mehrmonatigen Tiefbohrungen und des Kraftwerksbetriebs sind die Einhaltung der TA Lärm⁴⁹⁰ bzw. der Richtlinien für Baulärm (AVV Baulärm)⁴⁹¹ zu sichern. Die Anwendung der verschiedenen Regelungen ist derzeit strittig. Jedenfalls hat der Antragsteller der Bergbehörde im Rahmen der Hauptbetriebsplan-Unterlagen in einer Immissionsprognose nachzuweisen, dass die entsprechenden Immissionsrichtwerte eingehalten werden können.

Auch die Vorschriften des Zweiten und Vierten Teils der Störfall-Verordnung⁴⁹² können unter Umständen bei größeren Anlagen gelten. Mit Ausnahme der §§ 9 bis 12 Störfall-Verordnung gelten diese für Betriebsbereiche, in denen gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Anhang I Spalte 4 der Störfall-Verordnung genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten. Für Betriebsbereiche, in denen gefährliche Stoffe in Mengen vorhanden sind, die die in Anhang I Spalte 5 genannten Mengenschwellen erreichen oder überschreiten, gelten außerdem die Vorschriften der §§ 9 bis 12 der Störfall-Verordnung.

Bei großen Anlagen mit z. B. mehr als 10 t hochentzündlichem Stoff⁴⁹³ als Arbeitsfluid (z. B. Isopenthan) besteht insofern die Notwendigkeit eines Störfallkonzeptes (§ 8) und der Anzeigepflicht (§ 7) nach der Störfall-Verordnung.

Nach § 1 Abs. 2 der Störfall-Verordnung kann die zuständige Behörde im Einzelfall dem Betreiber eines Betriebsbereichs, soweit es zur Verhinderung von Störfällen oder zur Begrenzung ihrer Auswirkungen erforderlich ist, Pflichten nach den §§ 9 bis 12 auch dann auferlegen, wenn die in dem Betriebsbereich vorhandenen gefährlichen Stoffe die in Anhang I Spalte 5 genannten Mengenschwellen nicht erreichen.

⁴⁹⁰ Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm, kurz TA Lärm, wurde als sechste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) erlassen und hat ihre rechtliche Grundlage in § 48 BImSchG. In ihr werden die gesetzlichen Anforderungen im Bereich des Immissionsschutzes zum Thema Lärm konkretisiert. Allgemeine Verwaltungsvorschriften dienen dazu, eine einheitliche Rechtsanwendung der Behörden zu gewährleisten und wenden sich daher unmittelbar nur an die zuständigen Behörden, nicht jedoch an den ebenfalls betroffenen Bürger. Da die Behörde zur Anwendung der Verwaltungsvorschriften verpflichtet ist, haben diese jedoch auch für die Bürger regelmäßig rechtliche Bedeutung.

⁴⁹¹ Ob bei dem Betrieb einer Baustelle schädliche Umwelteinwirkungen bei den Anwohnerinnen und Anwohnern entstehen, wird nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Schutz gegen Baulärm - Geräuschimmissionen (AVV Baulärm) beurteilt. Die AVV Baulärm enthält neben Immissionsrichtwerten das Verfahren zur Ermittlung des Beurteilungspegels.

⁴⁹² Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall-Verordnung - 12. BImSchV).

⁴⁹³ Siehe Anhang I Spalte 4 Nr. 8 der 12. BImSchV.

6.2.8.3 Betreiber-eigene und behördliche Überwachung

Instrumente der zuständigen Behörde sind ferner insbesondere die §§ 26 – 29a, 52 – 58e BImSchG (Betreiber-eigene Überwachung) und der § 52 (behördliche Überwachung).

Nach § 26 BImSchG kann beispielsweise die zuständige Behörde anordnen, dass der Betreiber einer genehmigungsbedürftigen Anlage oder einer nicht genehmigungsbedürftigen Anlage Art und Ausmaß der von der Anlage ausgehenden Emissionen sowie die Immissionen im Einwirkungsbereich der Anlage durch eine der von der zuständigen Behörde eines Landes bekannt gegebenen Stellen ermitteln lässt, wenn zu befürchten ist, dass durch die Anlage schädliche Umwelteinwirkungen hervorgerufen werden. Die zuständige Behörde ist befugt, Einzelheiten über Art und Umfang der Ermittlungen sowie über die Vorlage des Ermittlungsergebnisses vorzuschreiben.

6.2.8.4 Zwischenergebnis Immissionsschutzrecht

Die oberirdischen Anlagenteile des Sekundärkreislaufs zur Stromerzeugung sind mangels ausdrücklicher Nennung als spezifischer Anlagentyp im Anhang 1 der 4. BImSchV (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen) bzw. mangels entsprechend vorhandener Stoffmengen von Arbeitsmitteln in der Regel nicht immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftig nach § 4 Abs. 1 BImSchG.

Sollte im Einzelfall doch aufgrund entsprechend vorhandener Stoffmengen von Arbeitsmitteln eine Genehmigungspflicht bestehen, würde die Konzentrationswirkung der immissionsschutzrechtlichen Genehmigung nach § 13 BImSchG jedenfalls nicht die Zulassungen bergrechtlicher Betriebspläne sowie wasserrechtliche Erlaubnisse und Bewilligungen einschließen. In einer (regelmäßigen) Genehmigungsbedürftigkeit nach BImSchG mit der Folge der Konzentrationswirkung des § 13 BImSchG bezogen auf andere die Anlage betreffende behördliche Entscheidungen wäre nach jetziger Rechtslage insofern keine zielführende und sachgerechte Vereinfachung des Genehmigungsverfahrens zu sehen.

Anlagen der Tiefengeothermie sind auch nicht von der Richtlinie 2010/75/EU über Industrieemissionen⁴⁹⁴ erfasst, welche die europäische Technik Klausel der „besten verfügbaren Techniken (BVT)“ einführt und die u. a. durch das „Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen“⁴⁹⁵ ins nationale Immissionsschutzrecht umgesetzt wurde. Anlagen nach der Industrieemissions-Richtlinie werden im Anhang 1 der 4. BImSchV mit einem „E“ gekennzeichnet und umfassen die meisten großen und gefährlichen Anlagen, wie sie insbesondere in der Industrie zu finden sind. Die damit verbundene Systematik mit BVT-Merkblättern der Europäischen Kommission, welche eine Branche mit ihren typischen Produktionsprozessen, den Umweltbelastungen und Techniken zur Emissionsbegrenzung sowie die mit den Techniken verbundenen Kosten und Umweltwirkungen beschreiben, sowie den zugehörigen und verbindlichen BVT-Schlussfolgerungen erstreckt sich somit nicht auf Anlagen der Tiefengeothermie.

⁴⁹⁴ Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung), ABl. L 334 Seite 17 ff.

⁴⁹⁵ Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie über Industrieemissionen vom 8. April 2013, BGBl. I 2013, 734 ff.

6.2.9 Anlagensicherheitsrecht (übertägiger Anlagenteil)

Das Recht der technischen Sicherheit im Bereich der leitungsgebundenen Energie ist kein in sich geschlossenes Rechtsgebiet und weist dementsprechend auch keine klare Struktur oder einheitliche Konzeption auf. Technische Sicherheit ist eine interdisziplinäre Aufgabe, für deren Erledigung in erster Linie die entsprechenden (Fach-)Ingenieure zuständig sind.⁴⁹⁶ Diese müssen bei ihren Überlegungen und Entscheidungen allerdings die Rechtslage mit den verschiedenen Schutzgütern in den Blick nehmen. Das Nebeneinander rechtlicher Vorschriften mit unterschiedlichen Schutzziele und unterschiedlich klarem Anforderungsprofil hat mehrere Ursachen: den schnellen technischen Fortschritt in einem sich rasant entwickelnden Wirtschaftszweig, das Auftreten neuer Rechtsetzungsorgane wie der Europäischen Gemeinschaft, den Wandel in der Bewertung von technischen Risiken durch den Gesetzgeber und das Hinzukommen neuer Schutzziele. Diese werden z. T. in Rechtsvorschriften über die technische Sicherheit der Energieversorgung, z. T. in eigenständigen Bestimmungen geregelt (z. B. zum Arbeitsschutz und im Umweltrecht).⁴⁹⁷

Im Bereich des Anlagensicherheitsrechts bedeutet die zunehmende Modifizierung nationaler Regelungen durch europäische (Richtlinien-)Vorgaben im Rahmen des sog. „*New Approach*“ u. a., dass das Zusammenspiel von Anlagenbeschaffenheit und -betrieb (also technische und organisatorische Lösungen) zur Erreichung des gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsniveaus stärker der Eigenverantwortung der Betreiber zugewiesen ist. Generalklauseln ersetzen zunehmend Detailregelungen. Dies bringt dem Betreiber zwar mehr Flexibilität zur Anpassung an seine spezifischen betrieblichen Anforderungen, erfordert aber auch mehr eigenes Know-how zur Beurteilung der Gefahren und der Ableitung von notwendigen Maßnahmen. Dieses Know-how müssen sich insbesondere kleinere Unternehmen häufig durch externe Experten einholen.

Auffälliges gemeinsames Merkmal der Rechtsvorschriften zur technischen Sicherheit von Energieanlagen ist die Zurückhaltung des Staates bei der Festlegung von detaillierten technischen Anforderungen. Er beschränkt sich weitestgehend auf die Festle-

⁴⁹⁶ Vgl. *Vieweg*, Technische Sicherheit im digitalen Zeitalter, Seite 439, 440.

⁴⁹⁷ *Van Rienen/Wasser* in *Danner/Theobald*, Energierecht, Kommentar, VII Technische Sicherheit, Rn 1.

gung von Schutzziele und überträgt ein Höchstmaß an Verantwortung für die Realisierung der technischen Sicherheit auf die Unternehmen.⁴⁹⁸

Der Staat sieht seine Aufgabe darin, die geeigneten Rahmendaten für die technische Sicherheit zu setzen. Innerhalb dieser Rahmendaten haben die Unternehmen eigenverantwortlich die notwendigen Maßnahmen zu treffen. Die Behörden haben dann eine Kontrollfunktion, nicht das Recht der Mitentscheidung. Sofern auf diese Weise das festgelegte Ziel – also die Sicherheit der Energieversorgung – nicht gewährleistet ist, verbleibt die Möglichkeit staatlicher Eingriffe und – falls erforderlich – staatlicher statt unternehmerischer Maßnahmen.⁴⁹⁹

6.2.9.1 Produktsicherheitsgesetz (ProdSG)

Das Produktsicherheitsgesetz (ProdSG), das zum 1. Dezember 2011 das Geräte- und Produktsicherheitsgesetz (GPSG) ersetzte, enthält Regelungen zu den Sicherheitsanforderungen an technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte. Es gilt gemäß § 1 Abs. 2 ProdSG auch für die Errichtung und den Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen, die gewerblichen oder wirtschaftlichen Zwecken dienen oder durch die Beschäftigte gefährdet werden können, mit Ausnahme u. a. der überwachungsbedürftigen Anlagen in Unternehmen des Bergwesens, ausgenommen in deren Tagesanlagen.

Hinsichtlich der Frage, nach welchem Regelungsregime sich die Anforderungen an die technische Sicherheit der obertägigen Anlagenteile bestimmen, kommt es entscheidend darauf an, ob es sich bei der Anlage um eine nach dem ProdSG **überwachungsbedürftige Anlage** handelt, auf die das ProdSG und die auf Grundlage des ProdSG ergangenen Verordnungen, wie etwa die Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) oder die Druckgeräteverordnung (14. ProdSV), Anwendung finden.

Von vornherein vom Anwendungsbereich des ProdSG ausgenommen sind nach § 1 Abs. 2 Nr. 3 ProdSG die untertägigen Anlagen der Unternehmen des Bergwesens.

Gemäß § 2 Nr. 30 ProdSG sind überwachungsbedürftige Anlagen unter anderem

⁴⁹⁸ Van Rienen/Wasser in Danner/Theobald, Energierecht, Kommentar, VII Technische Sicherheit, Rn 3; Siehe zu diesem Themenkomplex auch kritisch Just, Reformbedarf bei überwachungsbedürftigen Anlagen? Erfahrungen aus Sicht der hessischen Arbeitsschutzaufsicht - in Pieper/Lang, Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2009 - 2010 der Bergischen Universität Wuppertal, Band 6, Seite 58, 63.

⁴⁹⁹ Van Rienen/Wasser in Danner/Theobald, Energierecht, Kommentar, VII Technische Sicherheit, Rn 3 ff.

- gemäß § 2 Nr. 30 b) ProdSG Druckbehälteranlagen außer Dampfkesseln,
- gemäß § 2 Nr. 30 c) ProdSG Anlagen zur Abfüllung von verdichteten, verflüssigten oder unter Druck gelösten Gasen,
- gemäß § 2 Nr. 30 d) ProdSG Leitungen unter innerem Überdruck für brennbare, ätzende oder giftige Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten,
- gemäß § 2 Nr. 30 f) ProdSG Anlagen in explosionsgefährdeten Bereichen und
- gemäß § 2 Nr. 30 i) ProdSG Anlagen zur Lagerung, Abfüllung und Beförderung von brennbaren Flüssigkeiten.

Zu beachten ist, dass zu den unter b), c) und d) bezeichneten überwachungsbedürftigen Anlagen nicht die Energieanlagen im Sinne des EnWG gehören. Für Energieanlagen gelten die Anforderungen des § 49 EnWG⁵⁰⁰.

Es stellt sich somit die Frage, ob es sich bei einer Anlage der Tiefengeothermie um eine Energieanlage i. S. d. § 3 Nr. 15 EnWG handelt.

Gemäß § 3 Nr. 15 EnWG sind Energieanlagen Anlagen zur Erzeugung, Speicherung, Fortleitung oder Abgabe von Energie, soweit sie nicht lediglich der Übertragung von Signalen dienen, dies schließt die Verteileranlagen der Letztverbraucher sowie bei der Gasversorgung auch die letzte Absperrereinrichtung vor der Verbrauchsanlage ein. Der für das Gesetz grundlegende Begriff der Energie umfasst nach der Definition in § 3 Nr. 14 EnWG Elektrizität (Strom) und Gas, soweit sie zur leitungsgebundenen Energieversorgung verwendet werden.

Wenn eine Anlage der Tiefengeothermie nicht nur zur Fernwärme- sondern auch Stromproduktion dient, handelt es sich somit um eine Energieanlage i. S. d. § 3 Nr. 15 EnWG. In diesem Fall greift dann der Ausschluss der Definition der überwachungsbedürftigen Anlagen nach § 2 Nr. 30 b), c) und d) ProdSG.⁵⁰¹

Unter Gesichtspunkten des technischen Sicherheitsrechts und hinsichtlich der Anwendung des Produktsicherheitsgesetzes sowie der auf dem Produktsicherheitsgesetz beruhenden Verordnungen bedarf es daher einer Abgrenzung des untertägigen bergrechtlichen Anlagenbereichs und der Energieanlagen im Sinne von § 3 Nr. 15 EnWG i. V. m. § 2 Nr. 30 b), c), d) ProdSG vom übrigen Anlagenbereich.

⁵⁰⁰ Siehe Kapitel 6.2.9.4.

⁵⁰¹ Fraglich ist aber, ob die Einstufung als überwachungsbedürftige Anlage nach § 2 Nr. 30 f) oder i) ProdSG dennoch in Frage kommt, bzw. ob hinsichtlich der oberirdischen Anlage eine sinnvolle Differenzierung in verschiedene Anlagenteile möglich ist. Übrig bliebe dann wohl nur der übertägige, dem Bergrecht unterliegende Teil des Primärkreislaufs.

Bei einer Anlage der Tiefengeothermie, die nicht nur zur Fernwärme- sondern auch Stromproduktion dient, handelt es sich mithin um keine überwachungsbedürftige Anlage i. S. d. ProdSG.

6.2.9.2 Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)

Die BetrSichV ist die deutsche Umsetzung der Arbeitsmittelrichtlinie 89/655/EWG, später ersetzt durch Richtlinie 2009/104/EG, und regelt in Deutschland die Bereitstellung von Arbeitsmitteln durch den Arbeitgeber, die Benutzung von Arbeitsmitteln durch die Beschäftigten bei der Arbeit sowie den Betrieb von überwachungsbedürftigen Anlagen im Sinne des Arbeitsschutzes.

Nach § 1 Abs. 2 BetrSichV gilt die BetrSichV nicht in Betrieben, die dem BBergG unterliegen, soweit dafür entsprechende Rechtsvorschriften bestehen. Abweichend von § 1 Abs. 2 Satz 1 BetrSichV gilt sie jedoch für überwachungsbedürftige Anlagen in Tagesanlagen, mit Ausnahme von Rohrleitungen nach Anhang 2 Abschnitt 4 Nummer 2.1 Satz 1 Buchstabe d.

Ausgenommen sind danach dem Bergrecht unterfallende Rohrleitungsanlagen in Tagesanlagen unter innerem Überdruck für Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten, die nach der Verordnung (EG) Nr. 1272/2008 in deren Anhang I wie folgt eingestuft sind:

- a) als entzündbare Gase in Nummer 2.2,
- b) als entzündbare Flüssigkeiten in Nummer 2.6, sofern sie einen Flammpunkt von höchstens 55 Grad Celsius haben,
- c) als pyrophore Flüssigkeiten in Nummer 2.9,
- d) als akut toxisch in Nummer 3.1.2 Kategorie 1 oder 2 oder
- e) als ätzend in Nummer 3.2.2.6.

Von dem vorgenannten Ausschluss dürften regelmäßig keine übertägigen, dem Bergrecht unterfallende Anlagenteile einer Geothermieanlage erfasst sein. Somit gilt die BetrSichV [Abschnitt 3] für überwachungsbedürftige Anlagen in Tagesanlagen. Hierzu enthält das Bergrecht keine spezielleren Vorschriften.

Die Frage, inwieweit es sich bei einem Geothermie-Kraftwerk um eine überwachungsbedürftige Anlage handelt, ist auch für die Anwendung der Betriebssicherheitsverord-

nung (BetrSichV) von Bedeutung, da für überwachungsbedürftige Anlagen die besonderen Vorschriften des Abschnitts 3 der BetrSichV gelten. Überwachungsbedürftige Anlagen sind nach § 2 Abs. 13 BetrSichV Anlagen nach § 2 Nr. 30 des Produktsicherheitsgesetzes, soweit sie in Anhang 2 der BetrSichV genannt sind. Hier ergeben sich mithin die o. g. Abgrenzungsschwierigkeiten zu den Energieanlagen i. S. d. § 3 Nr. 15 EnWG.

Subsidiär gilt die BetrSichV auch für sonstige Anlagenteile, die dem Bergrecht unterliegen, soweit dafür keine entsprechenden Rechtsvorschriften bestehen (vgl. § 1 Abs. 2 Satz 1 BetrSichV). Die Sachverhalte des Abschnitts 2 BetrSichV werden durch bergrechtliche Vorschriften – und hier insbesondere durch die Bestimmungen der Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung - ABergV) – geregelt. Die Abschnitte 1, 2 und 4 sowie die Anhänge der Betriebssicherheitsverordnung sind anzuwenden, soweit in Abschnitt 3 BetrSichV auf diese Bezug genommen wird.⁵⁰²

6.2.9.3 Druckgeräteverordnung (14. ProdSV)

Armaturen und Rohrleitungen (im Primärkreislaufsystem) müssen nach den Anforderungen der Druckgeräteverordnung (14. ProdSV) gebaut und nach den Anforderungen der Tiefbohrverordnung (BVOT) von Sachverständigen geprüft werden. Die 14. ProdSV gilt nach § 1 Abs. 2 jedoch nicht für Bohrlochkontrollgeräte, die für die industrielle Exploration und Gewinnung von Erdöl, Erdgas oder Erdwärme sowie für Untertagespeicher verwendet werden und dazu bestimmt sind, den Bohrlochdruck zu halten oder zu regeln. Hierzu zählen der Bohrlochkopf (Eruptionskreuz), die Blowout-Preventer (BOP), die Leitungen und Verteilersysteme sowie die jeweils davor befindlichen Geräte. Hierzu enthalten die Tiefbohrverordnungen der Länder entsprechende Vorgaben.

⁵⁰² Vgl. Vollzugshilfe zur Betriebssicherheitsverordnung für den bergbaulichen Bereich vom 11.05.2004. Diese Vollzugshilfe für den bergbaulichen Bereich wurde im Auftrag des Länderausschuss Bergbau (LAB) erarbeitet. Auf seiner 124. Sitzung am 11.05.2004 hat sie der LAB zustimmend zur Kenntnis genommen und den Ländern zur Einführung empfohlen.

6.2.9.4 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG)

Neben der Zweckbestimmung in § 1 EnWG, eine möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas, ist § 49 EnWG die zentrale Norm des Energiewirtschaftsrechts, welche Anforderungen an die technische Sicherheit von Energieanlagen formuliert.

Nach § 49 Abs. 1 EnWG sind Energieanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass die technische Sicherheit gewährleistet ist. Dabei sind vorbehaltlich sonstiger Rechtsvorschriften die allgemein anerkannten Regeln der Technik zu beachten.

Nach § 49 Abs. 2 Satz 1 EnWG wird die Einhaltung der allgemein anerkannten Regeln der Technik vermutet, wenn bei Anlagen zur Erzeugung, Fortleitung und Abgabe von

1. Elektrizität die technischen Regeln des Verbandes der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.,
2. Gas die technischen Regeln der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.

eingehalten worden sind.

Nach § 49 Abs. 3 EnWG ist bei Anlagen oder Bestandteilen von Anlagen, die nach den in einem anderen Mitgliedstaat der Europäischen Union oder in einem anderen Vertragsstaat des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum geltenden Regelungen oder Anforderungen rechtmäßig hergestellt und in den Verkehr gebracht wurden und die gleiche Sicherheit gewährleisten, davon auszugehen, dass die Anforderungen nach § 49 Abs. 1 EnWG an die Beschaffenheit der Anlagen erfüllt sind. In begründeten Einzelfällen ist auf Verlangen der nach Landesrecht zuständigen Behörde nachzuweisen, dass die Anforderungen nach Satz 1 erfüllt sind.

Nach § 49 Abs. 4 EnWG wird das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie ermächtigt, zur Gewährleistung der technischen Sicherheit, der technischen und betrieblichen Flexibilität von Energieanlagen sowie (...) durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates

1. Anforderungen an die technische Sicherheit dieser Anlagen, ihre Errichtung und ihren Betrieb festzulegen;
2. das Verwaltungsverfahren zur Sicherstellung der Anforderungen nach Nummer 1 zu regeln, insbesondere zu bestimmen,
 - a. dass und wo die Errichtung solcher Anlagen, ihre Inbetriebnahme, die Vornahme von Änderungen oder Erweiterungen und sonstige die Anlagen betreffenden Umstände angezeigt werden müssen,
 - b. dass der Anzeige nach Buchstabe a bestimmte Nachweise beigefügt werden müssen und
 - c. dass mit der Errichtung und dem Betrieb der Anlagen erst nach Ablauf bestimmter Prüffristen begonnen werden darf;
3. Prüfungen vor Errichtung und Inbetriebnahme und Überprüfungen der Anlagen vorzusehen und festzulegen, dass diese Prüfungen und Überprüfungen durch behördlich anerkannte Sachverständige zu erfolgen haben;
4. behördliche Anordnungsbefugnisse festzulegen, insbesondere die Befugnis, den Bau und den Betrieb von Energieanlagen zu untersagen, wenn das Vorhaben nicht den in der Rechtsverordnung geregelten Anforderungen entspricht;
5. zu bestimmen, welche Auskünfte die zuständige Behörde vom Betreiber der Energieanlage gemäß Absatz 6 Satz 1 verlangen kann;
6. die Einzelheiten des Verfahrens zur Anerkennung von Sachverständigen, die bei der Prüfung der Energieanlagen tätig werden, sowie der Anzeige der vorübergehenden Tätigkeit von Sachverständigen aus anderen Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder eines Vertragsstaates des Abkommens über den Europäischen Wirtschaftsraum zu bestimmen;
7. Anforderungen sowie Meldepflichten festzulegen, die Sachverständige nach Nummer 6 und die Stellen, denen sie angehören, erfüllen müssen, insbesondere zur Gewährleistung ihrer fachlichen Qualifikation, Unabhängigkeit und Zuverlässigkeit;
8. Anforderungen an die technische und betriebliche Flexibilität neuer Anlagen zur Erzeugung von Energie zu treffen.

Die Regelungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes bleiben davon unberührt.

Die nach Landesrecht zuständige Behörde kann nach § 49 Abs. 5 EnWG im Einzelfall die zur Sicherstellung der Anforderungen an die technische Sicherheit von Energieanlagen erforderlichen Maßnahmen treffen.

Gemäß § 49 Abs. 6 EnWG haben die Betreiber von Energieanlagen auf Verlangen der nach Landesrecht zuständigen Behörde Auskünfte über technische und wirtschaftliche Verhältnisse zu geben, die zur Wahrnehmung der Aufgaben nach Absatz 5 erforderlich sind. Der Auskunftspflichtige kann die Auskunft auf solche Fragen verweigern, deren Beantwortung ihn selbst oder einen der in § 383 Abs. 1 Nr. 1 bis 3 der Zivilprozessordnung bezeichneten Angehörigen der Gefahr strafrechtlicher Verfolgung oder eines Verfahrens nach dem Gesetz über Ordnungswidrigkeiten aussetzen würde.

Die von der nach Landesrecht zuständigen Behörde mit der Aufsicht beauftragten Personen sind berechtigt, Betriebsgrundstücke, Geschäftsräume und Einrichtungen der Betreiber von Energieanlagen zu betreten, dort Prüfungen vorzunehmen sowie die geschäftlichen und betrieblichen Unterlagen der Betreiber von Energieanlagen einzusehen, soweit dies zur Wahrnehmung der Aufgaben nach Absatz 5 erforderlich ist (§ 49 Abs. 7 EnWG).

6.2.9.5 Pläne für ein IT-Sicherheitsgesetz (Entwurf eines Gesetzes zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme, Referentenentwurf des BMI vom 05.03.2015)

Aufgrund der immer weiter zunehmenden Automatisierung und technischen Verknüpfung von bislang getrennten Prozessen, beschäftigen IT-Sicherheitsthemen (z. B. zur Netzanbindung und Fernwartung von Systemen oder zum Schutz von Steuerungs- und Leittechnik vor Manipulation) nicht mehr nur Fachgremien, sondern rücken zunehmend auch in den Fokus der Politik. Die IT-Sicherheitslage in Deutschland ist angespannt. Manipulationen und Sabotageakte können weitreichende Folgen haben.⁵⁰³ Besondere Bedeutung kommt im Bereich der IT-Sicherheit denjenigen Infrastrukturen zu, die für das Funktionieren unseres Gemeinwesens zentral sind. Insbesondere mit Blick auf die Betreiber solcher „**kritischen Infrastrukturen**“ hat das Bundesministerium des Innern (BMI) im März 2013 den „Entwurf eines Gesetzes zur Erhöhung der Sicherheit informationstechnischer Systeme“ (Referentenentwurf)⁵⁰⁴ vorgelegt, mit dem die Betreiber dieser kritischen Infrastrukturen wegen der weitreichenden gesellschaftlichen Folgen

⁵⁰³ Die katastrophalen Auswirkungen eines großflächigen Stromausfalls beschreibt bspw. *Marc Elsberg* in seinem im Jahr 2012 erschienenen Roman „Blackout – Morgen ist es zu spät“.

⁵⁰⁴ Abrufbar unter http://www.computerundrecht.de/Entwurf_it-sicherheitsgesetz.pdf (zuletzt abgerufen am 10.9.2013)

eines Ausfalls und ihrer besonderen Verantwortung für das Gemeinwohl verpflichtet werden sollen, einen Mindeststandard an IT-Sicherheit einzuhalten und dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) erhebliche IT-Sicherheitsvorfälle zu melden.

In diesem Zusammenhang soll insbesondere das Gesetz über das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI-Gesetz) vom 14. August 2009 (BGBl. I, S. 2821)⁵⁰⁵ dahingehend geändert werden, dass Einrichtungen, Anlagen oder Teile davon in den Sektoren Energie, Informationstechnik und Telekommunikation, Transport und Verkehr, Gesundheit, Wasser, Ernährung sowie Finanz- und Versicherungswesen, die von hoher Bedeutung für das Funktionieren des Gemeinwesens sind und durch deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe oder erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit eintreten würden, als „Kritische Infrastrukturen“ einem besonderen Fokus und besonderen Anforderungen in Bezug auf die IT-Sicherheit unterworfen werden.

Betreiber kritischer Infrastrukturen wären demnach verpflichtet, binnen zwei Jahren nach Inkrafttreten einer näher bestimmten Rechtsverordnung angemessene organisatorische und technische Vorkehrungen und sonstige Maßnahmen zum Schutz derjenigen informationstechnischen Systeme, Komponenten oder Prozesse zu treffen, die für die Funktionsfähigkeit der von ihnen betriebenen kritischen Infrastrukturen maßgeblich sind. Dabei ist der Stand der Technik zu berücksichtigen. Der Gesetzentwurf sieht ferner vor, dass Betreiber kritischer Infrastrukturen und ihre Branchenverbände branchenspezifische Sicherheitsstandards erarbeiten können. Das Bundesamt erkennt die branchenspezifischen Sicherheitsstandards im Benehmen mit den zuständigen Aufsichtsbehörden auf Antrag an, wenn diese geeignet sind, die Anforderungen nach dem neuen § 8a Abs. 1 BSI-Gesetz zu gewährleisten.

Auch Anlagen der Tiefengeothermie dürften nach den bisherigen Entwürfen (Stand 05.03.2013) von den Regelungen erfasst sein. Ausnahmen vom Anwendungsbereich formuliert der neu ins BSI-Gesetz aufzunehmende § 8a Abs. 5, wonach die in den Absätzen 1 bis 4 des neuen § 8a BSI-Gesetz enthaltenen Anforderungen an die Sicherheit der Informationstechnik kritischer Infrastrukturen keine Anwendung finden,

⁵⁰⁵ Abrufbar unter http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bsig_2009/gesamt.pdf (zuletzt abgerufen am 10.9.2013).

„soweit aus oder auf Grund von Rechtsvorschriften des Bundes weitergehende Anforderungen an die informationstechnischen Systeme, Komponenten oder Prozesse kritischer Infrastrukturen anzuwenden sind“.

6.2.9.6 Zwischenergebnis Anlagensicherheitsrecht

In der Praxis ergeben sich einige Schwierigkeiten bei der Bestimmung der anzuwendenden Regelungen im Bereich der Anlagensicherheit, vor allem dann, wenn mehrere (gleichzeitig) anwendbare Regelungen auch dieselben Schutzziele verfolgen und ein Anwendungsvorrang nicht immer eindeutig erkennbar ist. In der Praxis führt diese für den Anwender nicht immer zu überblickende rechtliche Situation nur dann nicht zu unlösbaren Konflikten, wenn die gleichzeitig anwendbaren Rechtsvorschriften keine einander ausschließenden technischen Anforderungen enthalten.

6.2.10 Strahlenschutzrecht

6.2.10.1 Anwendung der Strahlenschutzverordnung im Bereich der geothermischen Energiegewinnung

Der Mensch ist in seiner natürlichen Umgebung ständig ionisierender Strahlung ausgesetzt. Sie setzt sich zusammen aus der Strahlung der überall im Boden vorkommenden natürlichen radioaktiven Stoffe wie z. B. Uran, Thorium oder Kalium (terrestrische Strahlung) sowie aus einer Strahlung, die ihren Ursprung im Weltraum hat und von der ein gewisser Teil die Erdoberfläche erreicht (Höhenstrahlung, kosmische Strahlung). Radioaktive Stoffe wie radioaktives Cäsium (Cs-137), die z. B. durch den Reaktorunfall in Tschernobyl auf dem Boden abgelagert wurden, tragen nur noch wenig zur gemessenen Gamma-Ortsdosisleistung bei.

Die natürliche Strahlenexposition in Deutschland beträgt je nach örtlicher Gegebenheit zwischen 2 und 5 mSv a⁻¹ und kann in einzelnen Gebieten bis zu 10 mSv a⁻¹ betragen. Im Mittel liegt die Strahlenexposition des Menschen bei ca. 2,1 mSv a⁻¹. Davon beträgt die Strahlenexposition von außen ca. 0,7 mSv a⁻¹, durch Nahrungsaufnahme etwa

0,3 mSv a⁻¹ und durch Einatmung des radioaktiven Edelgases Radon beziehungsweise seiner gleichfalls radioaktiven Folgeprodukte etwa 1,1 mSv a⁻¹.⁵⁰⁶

Die Inhalation von luftgetragenen, natürlichen radioaktiven Stoffen trägt damit zu rund 50 % zur gesamten natürlichen Strahlenexposition (2,1 mSv/a) bei. Der Großteil der Inhalationsdosis kommt durch den Aufenthalt in Räumen zustande, in denen sich Radon und seine Folgeprodukte in der Raumluft anreichern. Die Inhalationsdosis durch Aufenthalt im Freien ist dagegen vergleichsweise gering und beträgt meist nicht mehr als 0,2 mSv/a.⁵⁰⁷

Industrielle Geothermiekraftwerke gewinnen Strom aus in der Regel 130 - 160°C heißem Thermalwasser, welches mit einer hohen Fließrate aus ca. 2500 bis 4000 m Tiefe gepumpt wird. Der größte Teil der Erdwärme (50 bis 70 %) im Erdinneren beruht auf dem Zerfall von radioaktiven Isotopen der Uran- und Thoriumzerfallsreihen.⁵⁰⁸ Hierbei werden große Energiemengen frei, die das umgebende Gestein und das in diesem zirkulierende Wasser erhitzen. Neben teils beträchtlichen Frachten gelöster Elemente enthält das geförderte Thermalwasser auch häufig signifikante Konzentrationen der natürlichen Radionuklide Ra-226, Pb-210, Ra-228, Ra-224 und K-40. Die Änderungen der thermodynamischen Parameter des Thermalwassers beim Durchfluss durch ein Geothermiekraftwerk führen zu Ablagerungen (sog. „Scales“) an den inneren Oberflächen des Thermalwasserkreises (Primärkreislaufs) der Anlagen. Die sich mit dem Betrieb der Anlage stetig aufbauenden Scales führen zu Effizienzverlusten in den Anlagen, z. B. wegen einer deutlichen Absenkung des Wärmeübertrags in den Wärmetauschern, zu höherem Materialverschleiß und damit zu mehr Wartungsarbeiten.

Beim Betrieb der Anlage fallen mithin verschiedene radioaktive Materialien an, bei deren Handhabung die Möglichkeit einer Strahlenexposition besteht. Dabei kommen als Szenarien vor allen

⁵⁰⁶ Vgl. Bundesamt für Strahlenschutz, Lagebericht Gamma-Ortsdosisleistung – Radiologische Lage in der Bundesrepublik Deutschland: Gamma-Ortsdosisleistung – Normalpegel
<http://www.bfs.de/imis/aktuell/einfuehrung.pdf> (letztes Aufrufdatum 15.11.2011)

⁵⁰⁷ Vgl. Bundesamt für Strahlenschutz, Lagebericht Aktivitätskonzentration Luft – Radiologische Lage in der Bundesrepublik Deutschland: Aktivitätskonzentration in der Luft
<http://www.bfs.de/imis/aktuell/fachbegriffe.pdf> (letztes Aufrufdatum 15.11.2011)

⁵⁰⁸ Gärtner/Tachlinski, Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, Seite 45 ff..

- Mobilisierung und Ablagerungsprozesse natürlicher Radionuklide (Scaling), Bodenkontamination
- Arbeiten im Bereich inwändig kontaminierter Anlagenteile
- Arbeiten an geöffneten Anlagenteilen, Entsorgung von kontaminierten Materialien
- Lagerung von Thermalwasser an der Oberfläche, Zusammensetzung des Dampfes, der aus der Geothermieanlage entweicht

in Betracht (Strahlenschutzaspekte in der Anlage, beim Umgang mit Abfällen).

Es ist deshalb notwendig, die Strahlenexposition der Beschäftigten abzuschätzen, um einerseits gegenüber den zuständigen Behörden die Einhaltung von Grenzwerten nachweisen zu können und um andererseits den Beschäftigten durch klare Handlungsanweisungen die nötige Sicherheit bei den Arbeiten in der Anlage zu vermitteln.

Von den im Laufe des Kraftwerksbetriebs - insbesondere an den Wärmetauschern - aufwachsenden Scales kann eine Gammakontaktdosisleistung von bis zu einigen 10 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ausgehen und somit zu einer entsprechenden Strahlenexposition führen. Ein Teil der in den Scales vorhandenen Radionuklide sind zudem Alphastrahler, die einen großen Beitrag zur inneren Exposition liefern können.⁵⁰⁹

Mit der **im Jahr 2001 neu gefassten Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)** wurde u. a. die Richtlinie 96/29/EURATOM über die Grundnormen für den Strahlenschutz (ABl. L 159 vom 29.06.1996, S. 1 ff.) in deutsches Recht umgesetzt. Gleichzeitig sollte die StrlSchV auf den neuen wissenschaftlichen Stand gebracht, neu gefasst und dabei Inhalt und Struktur übersichtlicher gestaltet werden. Auch wurden **erstmalig Regelungen zum Strahlenschutz bei Strahlenexpositionen durch natürliche Strahlungsquellen** in die StrlSchV aufgenommen. Die StrlSchV wurde in fünf Teile gegliedert, wobei Teil 1 allgemeine Vorschriften enthält, die übergreifend gelten. Teil 2 stellte neu formulierte Strahlenschutzgrundsätze und Grundpflichten voran und übernahm unter Einführung der neuen Grenzwerte im Wesentlichen die bisherigen Regelungen der Strahlenschutzverordnung, die dem Schutz des Menschen und der Umwelt bei der zielgerichteten Nutzung radioaktiver Stoffe oder ionisierender Strahlung dienen, wobei als zielgerichtet die Nutzung aufgrund ihrer Radioaktivität, als Kernbrennstoff oder zur

⁵⁰⁹ Gärtner/Tachlinski, Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, Seite 47.

Erzeugung von Kernbrennstoff zu verstehen ist. **Teil 3 enthält die aufgrund des Titels VII der Richtlinie 96/29/EURATOM neu geschaffenen Regelungen für Expositionen durch natürliche Strahlungsquellen (außerhalb der zielgerichteten Nutzung).** Teil 4 enthält die aufgrund von Artikel 4 und Artikel 6 der Richtlinie geschaffenen Regelungen über den Zusatz von radioaktiven Stoffen zu Produkten im verbrauchernahen Bereich oder deren Aktivierung. Teil 5 enthält weitere gemeinsame Vorschriften, die für alle Teile der Verordnung gelten.⁵¹⁰

6.2.10.2 Darstellung der aktuellen Regelungen zum Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlungsquellen

Die Regelungen des Teil 3 der aktuell gültigen StrSchV besitzen allerdings, wie auch die Richtlinie 96/29/EURATOM, nicht die gleiche Regelungsbreite und -tiefe wie die Bestimmungen in den anderen Teilen der Verordnung, da vor allem die Einwirkungsmöglichkeiten auf natürlicherweise vorhandene radioaktive Quellen zwangsläufig erheblich geringer als die auf künstliche radioaktive Quellen sind.⁵¹¹ Die Vorschriften gelten nur für diejenigen Arbeitsfelder und Verwendungen von Materialien, die ausdrücklich im Einzelnen in den Vorschriften und den dazugehörenden Anlagen XI und XII genannt sind, wobei sowohl die Art der Arbeitsfelder bzw. Materialien als auch quantitative Kriterien festgelegt wurden.⁵¹² Auch die für die Tätigkeiten geltenden Strahlenschutzgrundsätze (Rechtfertigung, Grenzwerte, Reduzierung der Strahlenexposition) werden für den Bereich der natürlichen radioaktiven Stoffe modifiziert.

6.2.10.2.1 Abgrenzung zwischen Tätigkeiten und Arbeiten

Bereits die Richtlinie 96/29/EURATOM differenziert zwischen **Tätigkeiten**, die mit einer Gefährdung durch ionisierende Strahlung aus einer künstlichen Strahlenquelle oder aus einer natürlichen Strahlenquelle verbunden sind, wenn hierbei natürliche Radionuklide aufgrund ihrer Radioaktivität, Spaltbarkeit oder Bruteigenschaft verarbeitet werden oder verarbeitet worden sind (also zielgerichtete Nutzung der Radioaktivität), und **Arbeiten**, die nicht unter die Definition der „Tätigkeit“ in Art. 2 Abs. 1 der Richtlinie fallen, bei denen aber natürliche Strahlenquellen vorhanden sind und durch die sich die

⁵¹⁰ Vgl. BR-Drucksache 207/01, Seite 208 (Gesetzesbegründung Seite 198).

⁵¹¹ Vgl. BR-Drucksache 207/01, Seite 210 (Gesetzesbegründung Seite 200).

⁵¹² Vgl. BR-Drucksache 207/01, Seite 210 (Gesetzesbegründung Seite 200).

Exposition der Arbeitskräfte oder von Einzelpersonen der Bevölkerung so erheblich erhöht, dass dies aus der Sicht des Strahlenschutzes nicht außer Acht gelassen werden darf.

Nach Art. 40 Abs. 2 der Richtlinie 96/29/EURATOM stellen die Mitgliedstaaten sicher, dass anhand von Untersuchungen oder anderen geeigneten Mitteln die Arbeiten ermittelt werden, die möglicherweise von Belang sind. Hierbei handelt es sich insbesondere um

- a) Arbeiten, bei denen die Arbeitnehmer und gegebenenfalls Einzelpersonen der Bevölkerung Thoron- oder Radonfolgeprodukten oder Gammastrahlungen oder einer sonstigen an Arbeitsplätzen auftretenden Exposition ausgesetzt sind; dies betrifft z. B. Arbeiten in Badeanlagen, Stollen, Bergwerken, unterirdischen Arbeitsstätten und oberirdischen Arbeitsstätten in bestimmten Bereichen;
- b) Arbeiten, die die Verwendung und Lagerung von Stoffen beinhalten, die normalerweise nicht als radioaktiv gelten, jedoch natürliche Radionuklide enthalten, die die Exposition der Arbeitskräfte und gegebenenfalls von Einzelpersonen der Bevölkerung erheblich erhöhen;
- c) Arbeiten, bei deren Durchführung Rückstände entstehen, die normalerweise nicht als radioaktiv gelten, jedoch natürliche Radionuklide enthalten, die die Exposition von Einzelpersonen der Bevölkerung und gegebenenfalls von Arbeitskräften erheblich erhöhen;
- d) den Betrieb von Flugzeugen.

Nach Art. 40 Abs. 3 der Richtlinie finden die Artikel 41 (Schutz vor Exposition durch terrestrische natürliche Strahlenquellen) und 42 (Schutz des fliegenden Personals) Anwendung, **wenn die Mitgliedstaaten erklärt haben, dass die Exposition durch natürliche Strahlenquellen aufgrund der gemäß Abs. 2 ermittelten Arbeiten zu berücksichtigen und überwachungspflichtig ist.**

Bei der Umsetzung der Richtlinie in die nationalen Regelungen der StrlSchV wurde die **Tiefengeothermie als Arbeitsfeld**, bei dem erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können, und die bei der Erdwärmegewinnung anfallenden Rückstände **nicht explizit aufgeführt** (Anlagen XI und XII der StrlSchV). Infolgedessen finden die §§ 93 ff. StrlSchV vom Wortlaut her keine unmittelbare Anwendung.

Eine richtlinienkonforme Auslegung der nationalen Normen der StrlSchV oder eine direkte Anwendung der Richtlinie, etwa unter dem Gesichtspunkt einer unzureichenden Umsetzung, dürfte wegen des eindeutigen Wortlauts der Richtlinie, wonach die Mitgliedsstaaten die relevanten Arbeiten zu ermitteln und zu erklären haben, nicht in Betracht kommen.

6.2.10.2.2 Anwendbarkeit der Regelungen des Teil 3 der StrlSchV (§§ 93 bis 104)

Obwohl die Tiefengeothermie nicht explizit in den entsprechenden Arbeitsfeldern bzw. Rückstandsstandgruppen der Anlagen XI und XII StrlSchV genannt ist, ist es gängige Praxis, die Regelungen der StrlSchV auch auf die Tiefengeothermie anzuwenden.⁵¹³

Insofern bieten die **Auffangtatbestände in §§ 96 Abs. 5, 102 StrlSchV** einen teilweisen Ausweg.

Soweit in anderen als den in Anlage XI Teil B genannten Arbeitsfeldern Expositionen auftreten, die denen der in Anlage XI Teil B genannten Arbeitsfeldern entsprechen, kann die zuständige Behörde gemäß § 96 Abs. 5 StrlSchV in entsprechender Anwendung der Absätze 1 bis 4 und des § 95 die erforderlichen Anordnungen treffen. Die Anlage XI Teil B bezieht sich jedoch nur auf Arbeitsfelder mit erhöhten Expositionen durch Uran und Thorium und deren Zerfallsprodukte ohne Radon. Fraglich ist zudem, ob die Arbeiten und Expositionen in Anlagen der Tiefengeothermie denen der in Anlage XI Teil B genannten Arbeitsfelder „entsprechen“. Hiervon wird im Folgenden aber ausgegangen.

Da in der Praxis vor allem die Aktivitäten der Uran-Zerfallsprodukte Ra-226 und Pb-210 eine große Rolle bei den Scales in oberirdischen Anlagenteilen (z. B. Wärmetauschern) spielen, sind somit die wesentlichen radioaktiven Scales vom Auffangtatbestand des § 96 Abs. 5 StrlSchV erfasst, so dass die zuständige Behörde aufgrund dieser Ermächtigungsgrundlage die erforderlichen Anordnungen treffen kann⁵¹⁴.

⁵¹³ Vgl. *Degering/Köhler*, Natürliche Radionuklide in Anlagen der tiefen Geothermie, Beitrag „Der Geothermiekongress 2009“ Bochum, Seite 8.

⁵¹⁴ Anders als bei den ausdrücklich in Anlage XI genannten Arbeitsfeldern trifft den Betriebsstätteninhaber/Arbeitgeber - zumindest nach den Regelungen der StrlSchV - keine automatische Pflicht zur Expositionsabschätzung seiner Beschäftigten.

Vom Wortlaut des § 96 Abs. 5 StrlSchV nicht erfasst sind allerdings erhöhte Radon-222-Expositionen, da nicht auf Anlage XI Teil A verwiesen wird.

Die Praxis versucht diesen Konflikt mitunter dadurch zu lösen, dass eine Anlage der Tiefengeothermie als Anlage der Wassergewinnung betrachtet wird, welche ausdrücklich in Anlage XI Teil A aufgeführt wird. Ob dies wirklich rechtskonform möglich ist, ist fraglich. In Frage kommt dieser Weg zudem wohl auch nur bei hydrothermalen Systemen.

6.2.10.2.3 Grundlagen zur Berechnung der Strahlenexposition

Entsprechend den skizzierten Problemen, die bei der Anwendung von Teil 3 Kapitel 2 StrlSchV auf Anlagen der Tiefengeothermie entstehen, stellen sich auch Fragen bei der korrekten Berechnung der Strahlenexposition, z. B. durch Anwendung der Richtlinie für die Überwachung der Strahlenexposition bei Arbeiten nach Teil 3 Kapitel 2 StrlSchV (Richtlinie Arbeiten) vom 15. Dezember 2003 oder der Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau - BglBb). Gleiches gilt für Störfallberechnungsgrundlagen.

6.2.10.3 Fortentwicklung strahlenschutzrechtlicher Regelungen zu NORM – die neue „Euratom Basic Safety Standards Directive“

Das deutsche Strahlenschutzrecht ist schon seit Jahrzehnten durch europäische Richtlinien geprägt, die ein europaweit hohes Schutzniveau gewährleisten sollen.

Gerade im Bereich der natürlichen Radioaktivität sind allerdings Defizite identifiziert worden. 2009 leitete daher die Kommission eine Konsultation zu einem Vorschlag für neue Bestimmungen zu natürlichen Strahlenquellen in der Richtlinie über grundlegende Sicherheitsnormen ein. Die Arbeitsgruppe für natürliche Strahlenquellen der Sachverständigengruppe nach Artikel 31 schlug ein umfassendes Konzept für die Regulierung der NORM-Industriezweige, der Radonstrahlung und der Baumaterialien vor.

Dieses Dokument wurde auf der Website der Kommission veröffentlicht. Die erste Konsultation fand vom 2. Februar bis zum 20. April 2009 statt.⁵¹⁵

Mittlerweile haben sich die EU-Mitgliedsstaaten im zuständigen Ausschuss des Europäischen Rats auf einen Richtlinienentwurf verständigt. Der Wortlaut des nun von der Kommission vorgelegten Entwurfs entspricht in weiten Teilen dem des Entwurfs, zu dem die Sachverständigenengruppe nach Artikel 31 Stellung genommen hat. Es wurden aber einige redaktionelle Änderungen vorgenommen und einige Definitionen hinzugefügt. Das Europäische Parlament wird voraussichtlich im September 2013 zu dem Richtlinienentwurf Stellung nehmen. Anschließend wird der Rat voraussichtlich noch in diesem Jahr die Richtlinie beschließen. Danach müssten die Mitgliedsstaaten die Richtlinie innerhalb der in Artikel 107 des Richtlinienentwurfs vorgegebenen Frist von vier Jahren in nationales Recht umsetzen.

Die „Gewinnung geothermischer Energie“ ist im Richtlinienentwurf in die Liste industrieller Tätigkeiten mit Einsatz natürlich vorkommender radioaktiver Materialien aufgenommen worden. Die Mitgliedsstaaten haben daher in Zukunft die Geothermie bei der Ermittlung von Tätigkeiten, die mit natürlich vorkommenden radioaktiven Materialien verbunden sind und die zu einer Exposition von Arbeitskräften und Einzelpersonen der Bevölkerung führen, die unter Strahlenschutzgesichtspunkten nicht außer Acht gelassen werden kann, zu berücksichtigen. Die Richtlinie wäre in nationales Recht umzusetzen und würde für eine entsprechende Klarstellung in der StrlSchV sorgen.

6.2.10.4 Keine Umgangsgenehmigung nach § 7 Abs. 1 StrlSchV erforderlich

Eine Umgangsgenehmigung nach § 7 Abs. 1 StrlSchV ist hinsichtlich des Umgangs mit Thermalwässern und Ablagerungen an Anlagenteilen, die eine signifikante Konzentrationen natürlicher Radionuklide enthalten können, nicht erforderlich. Der Anwendungsbereich des Teil 2 der StrlSchV ist mangels Klassifizierung als „Tätigkeit“ i. S. d. § 3 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchV nicht eröffnet. Zwar enthalten insbesondere die Ablagerungen

⁵¹⁵ Vorschlag für Richtlinie des Rates zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (KOM(2011) 593 vom 03.10.2011), Seite 7.

(Scale) radioaktive Stoffe i. S. d. § 2 Abs. 1 AtG.⁵¹⁶ Die Nutzung der Erdwärme stellt keine zielgerichtete Nutzung der Radioaktivität dieser Stoffe i. S. d. Atom- und Strahlenschutzrechts dar. Es bedarf somit auch nicht erst der Ausnahmeregelung nach § 7 Abs. 3 StrlSchV. Radioaktive Bodenschätze im Sinne dieser Vorschrift sind alle bergrechtlich relevanten Bodenschätze, also nicht nur Uranerz, soweit diese radioaktive Stoffe sind oder solche enthalten und das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten erfolgt, um die radiologischen Eigenschaften der Bodenschätze zu nutzen. Bergbauliche Aktivitäten, die zu anderen Zwecken erfolgen, fallen nicht unter die Genehmigungspflicht nach § 7 Abs. 1 StrlSchV. Sie sind dem Bereich der Arbeiten nach Teil 3 der Verordnung dann zuzuordnen, wenn sie mit erhöhten Expositionen verbunden sind.⁵¹⁷

6.2.10.5 Sonstige strahlenschutzrechtliche Regelungen

6.2.10.5.1 Strahlenschutzvorsorgegesetz (StrVG)

Das StrVG, welches nach dem schwerwiegenden Unfall von Tschernobyl im April 1986 im Dezember desselben Jahres verfasst wurde, dient dem Zweck (vgl. § 1 Nr. 1 und 2 StrVG), zum Schutz der Bevölkerung u. a.

- die Radioaktivität in der Umwelt zu überwachen und
- die Strahlenexposition der Menschen und die radioaktive Kontamination der Umwelt im Falle radioaktiver Unfälle oder Zwischenfälle so gering wie möglich zu halten.

Es unterscheidet zwischen Aufgaben für den Bund und die Länder. Aufgabe der Länder ist es bspw., die Radioaktivität im Grundwasser und im Trinkwasser zu ermitteln. Die Länder üben ihre Aufgaben im Auftrag des Bundes aus (§ 10 StrVG).

⁵¹⁶ Hinsichtlich der komplexen Rechtslage zum Umgang mit radioaktiven Scales – auch in Bezug auf die abfallrechtliche Problematik – wird auf das Kapitel 6.2.12.3 verwiesen.

⁵¹⁷ BT-Drs. 207/01, Seite 213.

6.2.10.5.2 Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §§ 40 Abs. 2, 95 Abs. 3 StrlSchV und § 35 Abs. 2 RöV (AVV Strahlenpass) vom 20.04.2004

Sofern für Beschäftigte in Geothermieranlagen der Dosisrichtwert von 1 Millisievert pro Jahr unter ungünstigen Umständen überschritten werden könnte⁵¹⁸, ist zu prüfen, welche Maßnahmen zur Dosisminderung mit geringem Aufwand eingeführt werden können. Hierzu zählen beispielsweise das Tragen persönlicher Schutzausrüstung, eine Änderung der Betriebsabläufe etc. Folge einer u. U. nach § 96 Abs. 5 i. V. m. § 95 Abs. 1, Abs. 3 durchzuführenden Dosisabschätzung könnte es im Einzelfall sein, dass Beschäftigte, sofern sie unter die Definition einer beruflich strahlenexponierten Person i. S. d. § 3 Abs. 2 Nr. 23 StrlSchV fallen (effektive Dosis im Kalenderjahr von mehr als 6 Millisievert), die einen bei der zuständigen Behörde registrierten Strahlenpass mit sich führen müssen. Die „Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 40 Abs. 2, § 95 Abs. 3 Strahlenschutzverordnung und § 35 Abs. 2 Röntgenverordnung („AVV Strahlenpass“) vom 20. Juli 2004 legt in diesem Zusammenhang Form und Inhalt des Strahlenpasses für beruflich strahlenexponierte Personen und die Anforderungen an die Registrierung und das Führen eines Strahlenpasses fest.

6.2.11 Sonstige Regelungen im Bereich Arbeits- und Gesundheitsschutz

Neben den in den vorangegangenen Abschnitten skizzierten besonderen Schutzbereichen des Strahlenschutzrechts und des Wasserrechts existieren zahlreiche weitere Regelungen, die dem Arbeitsschutz der Beschäftigten im Bergbaubetrieb und dem allgemeinen Gesundheitsschutz der Bevölkerung dienen.

⁵¹⁸ Siehe zur entsprechenden Einschätzung des BfS hinsichtlich der Strahlenexposition http://www.bfs.de/de/ion/anthroppg/rueckstaende/geothermie_rueckstaende.html
Für die Bevölkerung ist hingegen aus heutiger Sicht unter konservativen Annahmen nicht von einer Überschreitung des Dosisrichtwertes auszugehen.

6.2.11.1 Bergrechtliche Regelungen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz

6.2.11.1.1 Bundesberggesetz (BBergG)

Das Bergrecht selbst enthält im BBergG und in den aufgrund entsprechender Ermächtigungen erlassenen bundes- und landesrechtlichen Verordnungen spezielle Regelungen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz.

So ist nach § 1 Nr. 2 und 3 BBergG (auch) Zweck des Gesetzes,

- die Sicherheit der Betriebe und der Beschäftigten des Bergbaus zu gewährleisten sowie
- die Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus bergbaulicher Tätigkeit für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter ergeben, zu verstärken und den Ausgleich unvermeidbarer Schäden zu verbessern.

Die bergrechtliche **Aufsuchungserlaubnis** (hier: für den bergfreien Bodenschatz Erdwärme) ist durch die zuständige bergrechtliche Genehmigungsbehörde nach § 11 Nr. 10 zu versagen, wenn überwiegende öffentliche Interessen die Aufsuchung im gesamten Feld ausschließen. Unter den Begriff der öffentlichen Interessen sind auch Umwelt- und Gesundheitsschutzaspekte zu subsumieren.⁵¹⁹ Allerdings findet an dieser Stelle aufgrund der gebundenen bergrechtlichen Entscheidung (kein Ermessen der Bergbehörde!) lediglich eine Abwägung statt. Entsprechendes gilt auch für die Versagung der **Gewinnungsbewilligung** nach § 12 BBergG. Allerdings können **Auflagen** unter den Voraussetzungen des § 36 VwVfG und des § 16 Abs. 3 BBergG erlassen werden.

Nach § 55 Abs. 1 Nr. 3 BBergG ist die **Zulassung eines Betriebsplanes** i. S. d. § 52 BBergG zu erteilen, wenn *die erforderliche Vorsorge gegen Gefahren für Leben, Gesundheit und zum Schutz von Sachgütern, Beschäftigter und Dritter im Betrieb, insbesondere durch die den allgemein anerkannten Regeln der Sicherheitstechnik entsprechenden Maßnahmen, sowie dafür getroffen ist, dass die für die Errichtung und Durchführung eines Betriebes auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder geltenden*

⁵¹⁹ Vgl. *Attendorn*, ZUR 2011, S. 565, 566.

Vorschriften und die sonstigen Arbeitsschutzvorschriften eingehalten werden. Für die Erteilung der Zulassung eines Abschlussbetriebsplanes gilt nach § 55 Abs. 2 entsprechendes u. a. mit der Maßgabe, dass der Schutz Dritter vor den durch den Betrieb verursachten Gefahren für Leben und Gesundheit auch noch nach Einstellung des Betriebes sichergestellt sein muss.

Der **Bergbauunternehmer ist nach § 61 Absatz 1 BBergG verpflichtet**, für eine ordnungsgemäße Errichtung des Betriebs und einen ordnungsgemäßen Betriebsablauf zu sorgen und die erforderlichen Maßnahmen und Vorkehrungen zu treffen, um Beschäftigte und Dritte vor Gefahren für Leben, Gesundheit und Sachgüter zu schützen (Nr. 1 Buchstabe a). Er ist darüber hinaus verpflichtet, bei Zuständen oder Ereignissen im Betrieb, die eine unmittelbare Gefahr für Leben oder Gesundheit Beschäftigter oder Dritter herbeizuführen geeignet sind oder herbeigeführt haben, die zur Abwehr der Gefahr oder zur Rettung von Verunglückten geeigneten Maßnahmen zu treffen (Nr. 2). **Detailliertere Schutzmaßnahmen finden sich u. a. in verschiedenen Rechtsverordnungen**, die auf der Grundlage der Ermächtigungen in § 66 ff. BBergG erlassen wurden (siehe hierzu die Kapitel 6.2.11.1.2 bis 6.2.11.1.6).

Die zuständige **Bergaufsichtsbehörde** übt ihre **Aufsicht gemäß § 69 BBergG** bis zum Zeitpunkt nach Durchführung des Abschlussbetriebsplanes aus, *in dem nach allgemeiner Erfahrung nicht mehr damit zu rechnen ist, dass durch den Betrieb Gefahren für Leben und Gesundheit Dritter, für andere Bergbaubetriebe und für Lagerstätten, deren Schutz im öffentlichen Interesse liegt, oder gemeinschädliche Einwirkungen eintreten werden.* Sie kann gemäß § 71 BBergG im Einzelfall anordnen, welche Maßnahmen zur Durchführung der Vorschriften dieses Gesetzes, der auf Grund dieses Gesetzes erlassenen und der nach § 176 Abs. 3 BBergG aufrechterhaltenen Rechtsverordnungen zu treffen sind. Dabei können Anordnungen, die über die auf Grund einer Rechtsverordnung oder eines zugelassenen Betriebsplans gestellten Anforderungen hinausgehen, nur getroffen werden, soweit dies zum Schutz von Leben, Gesundheit und Sachgütern Beschäftigter oder Dritter erforderlich ist. Unter den Voraussetzungen des § 71 Abs. 2 BBergG kann die zuständige Behörde anordnen, dass der Betrieb bis zur Herstellung des ordnungsgemäßen Zustandes vorläufig ganz oder teilweise eingestellt wird.

Schließlich sei noch auf die **Regelungen zum Bergschadensrecht** (§ 110 ff. BBergG) sowie die **Bußgeld- und Strafvorschriften** (§ 145 f. BBergG) hingewiesen, die ebenfalls den Bergunternehmer zum rechtskonformen und umsichtigen Handeln anhalten.

6.2.11.1.2 Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (ABBergV)

Die auf der Grundlage von § 66 Satz 1 Nr. 1 Buchstabe b, Nr. 2, 4 Buchstabe a und d, Nr. 5, 6, 9, 10 und Satz 3, des § 67 Nr. 1 und 8 und des § 68 Abs. 2, in Verbindung mit § 126 Abs. 1 Satz 1 und Abs. 3 und den §§ 128 und 129 BBergG erlassene ABBergV regelt die Sicherheit und den Gesundheitsschutz sowie den Umweltschutz u. a. bei

- dem Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen und der damit zusammenhängenden Wiedernutzbarmachung der Oberfläche (Nr. 1),
- Einrichtungen, die überwiegend Tätigkeiten nach den Nummern 1 bis 4 dienen oder zu dienen bestimmt sind⁵²⁰ (Nr. 5),

auf dem Festland sowie im Bereich des Festlandssockels und der Küstengewässer.

Nach § 2 ABBergV hat der Bergbauunternehmer zur Gewährleistung der Sicherheit und zum Schutz der Gesundheit der Beschäftigten die jeweils erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der die Arbeit berührenden Umstände zu treffen. Die Maßnahmen müssen darauf ausgerichtet sein, dass

1. **die Arbeitsstätten so geplant, errichtet, ausgestattet, in Betrieb genommen, betrieben und unterhalten werden, dass die Beschäftigten die ihnen übertragenen Arbeiten ausführen können, ohne ihre eigene Sicherheit und Gesundheit oder die der anderen Beschäftigten zu gefährden;**
2. Arbeitsstätten, die mit Beschäftigten belegt sind, der Beaufsichtigung durch eine verantwortliche Person unterliegen;
3. die mit einem besonderen Risiko verbundenen Arbeiten nur fachkundigen Beschäftigten übertragen und entsprechend den Anweisungen ausgeführt werden;
4. alle zu erteilenden Sicherheitsanweisungen für alle Beschäftigtengruppen geeignet und verständlich sind;
5. angemessene Einrichtungen zur Leistung von Erster Hilfe bereitstehen;
6. die erforderlichen Sicherheitsübungen in regelmäßigen Zeitabständen durchgeführt werden.

⁵²⁰ Auch oberirdische Anlagenteile (insbesondere solche des Primärkreislaufs) können somit in den Anwendungsbereich der ABBergV fallen (parallel zur Regelung in § 2 Abs. 1 Nr. 3 BBergG).

Die vorgenannten **Maßnahmen**, einschließlich der Vorkehrungen für ihre Verwirklichung, hat der Unternehmer gemäß § 2 Abs. 2 ABBERgV **regelmäßig auf ihre Übereinstimmung mit dieser Verordnung und anderen Rechtsvorschriften, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten regeln, zu prüfen und erforderlichenfalls sich ändernden Gegebenheiten anzupassen**. Dabei hat er eine Verbesserung der bestehenden Arbeitsbedingungen im Hinblick auf Sicherheit und Gesundheitsschutz anzustreben. Der Unternehmer hat gemäß § 2 Abs. 3 ABBERgV Vorkehrungen zu treffen, dass die Maßnahmen bei allen Tätigkeiten und auf jeder Führungsebene beachtet werden, und dass die Beschäftigten ihren Mitwirkungspflichten nachkommen können. Ferner hat der Unternehmer nach § 2 Abs. 4 ABBERgV von folgenden allgemeinen Grundsätzen auszugehen:

- Die Arbeit ist so zu gestalten, dass Risiken für Leben und Gesundheit möglichst nicht entstehen;
- verbleibende Risiken sind sorgfältig abzuschätzen und möglichst zu verringern;
- Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen;
- bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen, insbesondere im Hinblick auf eine Erleichterung bei eintöniger Arbeit und bei maschinenbestimmtem Arbeitsrhythmus sowie auf eine Verringerung ihrer gesundheitsschädigenden Auswirkungen;
- bei der Planung der Gefahrenverhütung ist eine sachgerechte Verknüpfung von Technik, Arbeitsorganisation, sonstigen Arbeitsbedingungen, sozialen Beziehungen und Einflüssen der Umwelt auf den Arbeitsplatz anzustreben;
- individuelle Schutzmaßnahmen kommen erst in Betracht, wenn durch andere Maßnahmen ein ausreichender Schutz nicht gewährleistet werden kann;
- spezielle Gefahren für besonders schutzbedürftige Beschäftigtengruppen und besondere Belange von Behinderten entsprechend Art und Schwere der Behinderung sind zu berücksichtigen.

Schließlich hat der Unternehmer gemäß § 2 Abs. 5 ABBERgV außerbetriebliche Sachverständige oder sachverständige Stellen hinzuzuziehen, wenn die eigenen Möglichkeiten im Betrieb nicht ausreichen.

Die ABBERgV enthält **weitere Pflichten und Vorgaben für spezifische Schutzmaßnahmen** (z. B. hinsichtlich der Verhinderung des Entstehens und Ausbreitens von Bränden und Explosionen sowie gesundheitsgefährdender Atmosphäre, § 11 Abs. 1

Nr. 1 ABergV). In § 13 ABergV finden sich besondere Vorgaben für Arbeitsstätten zur Aufsuchung und Gewinnung durch Bohrungen.

6.2.11.1.3 Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV)

Die GesBergV gilt für gesundheitliche Vorsorgemaßnahmen u. a. bei der Aufsuchung, Gewinnung und Aufbereitung von Bodenschätzen. Sie enthält Vorschriften zu den Voraussetzungen für die Beschäftigung, zu arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen und zum Schutz vor gesundheitlichen Schäden.

6.2.11.1.4 Bergverordnung über vermessungstechnische und sicherheitliche Unterlagen (UnterlagenBergV)

Die UnterlagenBergV enthält u. a. Berichtspflichten (§ 10 Mitteilung von Unfällen) sowie Dokumentationspflichten (§ 11 Nachweis über Beschäftigte).

6.2.11.1.5 Tiefbohrverordnung, BVOT (Landesrecht, z. B. Rheinland-Pfalz, Hessen)

Das Bundesberggesetz (BBergG) ermächtigt in § 32 und § 68 Abs. 1 die Landesregierungen zum Erlass von Rechtsverordnungen. So haben mehrere Länder, im Interesse bundeseinheitlicher Regelungen, untereinander abgestimmte Tiefbohrverordnungen erlassen.

Die Tiefbohrverordnungen regeln im Wesentlichen

- das Aufsuchen und Gewinnen von den Berggesetzen unterliegenden Bodenschätzen, wie Erdöl, Erdgas, Erdwärme oder Sole durch Bohrungen,
- das Herstellen und Betreiben von Tiefspeichern,
- das Einleiten von Stoffen durch Übertagebohrungen.

Sonstige Bohrungen, z. B. nach Grundwasser, die tiefer als 100 m in den Boden vordringen sollen, unterliegen gemäß § 127 BBergG ebenfalls der Bergaufsicht; bei solchen Bohrungen kommen die BVT/BVOT erst zur Anwendung, wenn die Antriebsleistung des Bohrwerkzeuges mehr als 20 kW beträgt.

Armaturen und Rohrleitungen im Primärkreislaufsystem müssen nach den Anforderungen der Druckgeräteverordnung (14. ProdSV) gebaut und nach den Anforderungen der Tiefbohrverordnung (BVOT) von Sachverständigen geprüft werden. Die Thermalwasserrückhaltebecken sind mit einer doppelwandigen Folie zu versehen, deren Einbau ebenfalls durch Sachverständige überwacht wird. Ferner werden in den Zulassungsbescheiden der Bergbehörde besondere Auflagen für die Baudurchführung und die Durchführung von Prüfungen, u. a. durch Sachverständige vor Inbetriebnahme und in wiederkehrenden Zeitabständen, gemacht.

6.2.11.2 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG)

Das Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG) lässt Pflichten, die die Arbeitgeber zur Gewährleistung von Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit nach sonstigen Rechtsvorschriften haben, unberührt. Die bspw. in § 4 ArbSchG enthaltenen allgemeinen Grundsätze

1. Die Arbeit ist so zu gestalten, dass eine Gefährdung für Leben und Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird;
2. Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen;
3. bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse zu berücksichtigen;
4. Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluss der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen;
5. individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen;
6. spezielle Gefahren für besonders schutzbedürftige Beschäftigtengruppen sind zu berücksichtigen;
7. den Beschäftigten sind geeignete Anweisungen zu erteilen;
8. mittelbar oder unmittelbar geschlechtsspezifisch wirkende Regelungen sind nur zulässig, wenn dies aus biologischen Gründen zwingend geboten ist.

bilden eine normative Grundlage und ergänzen im Einzelfall fehlende Spezialregelungen.

6.2.11.3 Chemikaliengesetz (ChemG), Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)

Neben vielen anderen arbeitsschutzrechtlichen und stoffrechtlichen Regelungen ist auch die Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV) zu nennen. Die Verordnungsermächtigung ist im Chemikaliengesetz (ChemG) enthalten. Seit 2005 ist auch das Arbeitsschutzgesetz gesetzliche Grundlage für die GefStoffV. Sie enthält Regelungen zu Gefährlichkeitsmerkmalen, Einstufungen und Kennzeichnungen, Sicherheitsdatenblättern, Gefährdungsbeurteilungen und Grundpflichten sowie entsprechenden Schutzmaßnahmen. Das nationale Chemikalienrecht wird allerdings zunehmend durch einheitliche europäische Regelungen modifiziert und verdrängt.⁵²¹

6.2.11.4 Siebtes Buch – Sozialgesetzbuch – gesetzliche Unfallversicherung

Auch das Sozialversicherungsrecht enthält im Siebten Buch des Sozialgesetzbuchs - Gesetzliche Unfallversicherung (SGB 7) Vorgaben, die für den Arbeitsschutz relevant sind. So finden sich in den §§ 14 ff. SGB 7 Regelungen zu Präventionsmaßnahmen. Nach § 15 SGB 7 können die Unfallversicherungsträger unter Mitwirkung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e. V. als autonomes Recht Unfallverhütungsvorschriften über Maßnahmen zur Verhütung von Arbeitsunfällen, Berufskrankheiten und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren oder für eine wirksame Erste Hilfe erlassen, soweit dies zur Prävention geeignet und erforderlich ist und staatliche Arbeitsschutzvorschriften hierüber keine Regelung treffen.

⁵²¹ Zur Schnittmenge der Rechtsregime der wassergefährdenden Stoffe und des (Europäischen) Chemikalienrechts siehe ausführlich *Sanden*, Wassergefährdende Stoffe und Europäisches Chemikalienrecht, ZfW 2010, Seite 32 ff.

6.2.12 Abfallrecht

6.2.12.1 Allgemeines

Bei der Errichtung und dem Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie fallen Abfälle unterschiedlicher Art an. Diese lassen sich in die folgenden „Abfallgruppen“ aufteilen⁵²²:

- **Abwässer (Flowback)**

Im Zuge geothermaler Stimulationsverfahren⁵²³ wird Wasser (z. T. mit Additiven vermischt) in tiefe Formationen eingebracht und in der Regel mit Thermalwässern zurückgeführt. Diese Rückflüsse (Flowback) können u. a. natürlich vorkommende radioaktive Substanzen (sog. NORM, naturally occurring radioactive materials) enthalten. Für die Entsorgung des Flowbacks kommen insbesondere die folgenden Verfahren in Betracht: Verpressung über Disposalbohrungen, Aufbereitung zur Einleitung in Oberflächenwasser oder in die Kanalisation, Wiederverwendung für weitere Stimulationsverfahren.

- **Ablagerungen (Scale)**

Die Änderungen der thermodynamischen Parameter des Fluids beim Durchfluss durch die geothermale Anlage sowie Wechselwirkungen mit dem Material der Anlagenkomponenten führen dazu, dass an den Filtern und auf den inneren Oberflächen der Bauteile bzw. des Thermalkreises (z. B. Wärmetauscher, Rohrleitungen, Armaturen, Pumpen) Ablagerungen (sog. Scale) auftreten.⁵²⁴ Soweit in dem Fluid natürliche Radionuklide enthalten sind, finden sich diese auch regelmäßig in den Scale wieder. Im Strahlenschutz werden die radioaktiven Ablagerungen als TE-NORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials) bezeichnet.⁵²⁵

⁵²² Vgl. hierzu umfassend: *Gärtner/Tachlinski*, Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, S. 45 (45 ff.).

⁵²³ Siehe hierzu Punkt 5.6.4.

⁵²⁴ *Degering/Köhler*, Natürliche Radionuklide in Anlagen der tiefen Geothermie, Beitrag „Der Geothermiekongress 2009“ Bochum, Germany, 17-19 November 2009, S. 6.

⁵²⁵ *Degering/Köhler*, Natürliche Radionuklide in Anlagen der tiefen Geothermie, Beitrag „Der Geothermiekongress 2009“ Bochum, Germany, 17-19 November 2009, S. 8.

- **Reinigungsabfälle**

Um einen wegen der Scale sinkenden Wirkungsgrad eines Geothermiekraftwerks wieder zu erhöhen, werden regelmäßig Reinigungsarbeiten durchgeführt. Hierbei fallen Reinigungsabfälle an (pastöse Rückstände bzw. Glasperlen, vermischt mit abgelösten Scale), die ebenfalls natürliche radioaktive Stoffe enthalten können.

- **Anlagenteile**

Es kann auch eine Entsorgung ausgedienter Anlagenteile (z. B. Rohre, Pumpen) erforderlich werden. Diese Gegenstände können durch den Kontakt mit Thermalwässern radioaktiv kontaminiert worden sein.

- **Betriebsabfälle**

Zudem entstehen Abfälle aus der Verwendung von persönlicher Schutzausstattung (z. B. Handschuhe, Einweg-Overalls, Atemschutz) und anderen Hilfsstoffen (z. B. Folien). Auch diese Gegenstände können, wenn eine Berührung mit radioaktivem Thermalwasser stattgefunden hat, eine radioaktive Kontamination aufweisen.

Bei der Entsorgung der oben genannten Abfälle sind Aspekte unterschiedlicher Rechtsgebiete, insbesondere des Abfall-, Strahlenschutz-, Berg-, Wasser- und Transport- und Gefahrgutrechts zu berücksichtigen.

6.2.12.2 Kreislaufwirtschaftsgesetz

Für die Entsorgung von Abfällen gelten grundsätzlich die Anforderungen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG)⁵²⁶.

Das KrWG zielt darauf ab, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen (§ 1 KrWG). Es gilt für **sämtliche abfall-relevanten Maßnahmen**, also für die Vermeidung, die Verwertung und die Beseitigung von Abfällen sowie für alle sonstigen Maßnahmen der Abfallbewirtschaftung (§ 2 Abs. 1 KrWG). § 6 Abs. 1 KrWG nennt die **fünf Stufen der Abfallhierarchie**: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung und Beseitigung.

⁵²⁶ Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG) v. 24.2.2012 (BGBl. I S. 212), zuletzt geändert am 22.5.2013 (BGBl. I S. 1324).

Bestimmte Bereiche sind nach § 2 Abs. 2 KrWG vom **Geltungsbereich des KrWG ausgeschlossen**. Hierzu zählen u. a. Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe i. S. des Atomgesetzes (s. hierzu Punkt 6.2.12.3), Abfälle, die unmittelbar beim Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten sowie bei der damit zusammenhängenden Lagerung von Bodenschätzen in Betrieben anfallen, die der Bergaufsicht unterstehen und die nach dem Bundesberggesetz (BBergG) und den auf Grund des BBergG erlassenen Rechtsverordnungen unter Bergaufsicht entsorgt werden (s. hierzu Punkt 6.2.12.4) sowie Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden (s. hierzu Punkt 6.2.12.5).

Soweit Abfälle, die bei der Errichtung und dem Betrieb eines Geothermiekraftwerks anfallen, als Abfälle i. S. des KrWG zu qualifizieren sind und nicht einem Anwendungsausschluss nach § 2 Abs. 2 KrWG unterfallen, sind bei ihrer Entsorgung die Vorschriften des KrWG zu beachten.

Abfälle i. S. des KrWG sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss (§ 3 Abs. 1 Satz 1 KrWG). Bei einem Stoff kann es sich um eine **feste, flüssige oder gasförmige Materie** handeln; jede Substanz kann sich unabhängig von ihrem Aggregatzustand als Abfall i. S. des KrWG erweisen.⁵²⁷

Beim Betrieb einer geothermalen Anlage fallen sowohl flüssige Stoffe (z. B. Flowback) als auch feste Stoffe (z. B. Scale) sowie körperliche Gegenstände (z. B. Anlagenteile) an. In der Regel will sich der Bergbauunternehmer dieser Stoffe und Gegenstände entledigen. In Bezug auf den Flowback ist dies jedoch dann nicht der Fall, wenn er den Flowback wiederverwenden will und eine solche Verwendung berg- und ggf. wasserrechtlich zulässig ist.⁵²⁸ Ist eine dieser beiden Bedingungen nicht erfüllt, ist der Flowback Abfall.⁵²⁹ Ein Großteil der Stoffe und Gegenstände, die beim Betrieb eines Geothermiekraftwerks anfallen, unterfallen dem Abfallbegriff des KrWG. Soweit für sie ein Bereichsausschluss nach § 2 Abs. 2 KrWG nicht greift, sind die Vorschriften des KrWG

⁵²⁷ Vgl. *Versteyl*, in: *Versteyl/Mann/Schomerus, Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar*, 3. Auflage, 2012, § 3 Rn. 8 f.

⁵²⁸ *Meiners/Denneborg/Müller et al.*, *Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen*, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz- und Reaktorsicherheit, FG II. 2.1, FKZ 37112399, S. B 108.

⁵²⁹ *Meiners/Denneborg/Müller et al.*, a.a.O., S. B 108.

auf sie anwendbar. In diesem Fall erfolgt ihre Beseitigung in der Regel in Form einer Deponierung (z. B. Scale, Reinigungsrückstände). Betriebsabfälle mit organischen Anteilen (z. B. persönliche Schutzausrüstung, Filtersäcke) können einer thermischen Abfallbehandlung (Verbrennung mit anschließender Deponierung) zugeführt werden. Für metallische Komponenten (Rohre, Pumpen etc.) besteht die Möglichkeit des Recyclings.⁵³⁰

Abfälle eines Geothermiekraftwerks erlangen auch im Zusammenhang mit der **Abfallüberwachung** Bedeutung. Regelungen hierzu finden sich in den §§ 47 ff. KrWG.

§ 47 KrWG enthält die **Grundsätze der allgemeinen Überwachung** und legt in diesem Zusammenhang die Pflichten der Betroffenen und die korrespondierenden Befugnisse der zuständigen Behörden fest.⁵³¹ Die Überwachung nach § 47 KrWG gilt für die Abfallvermeidung und Abfallbewirtschaftung und bezieht sich auf alle Abfallarten. § 47 Abs. 3 KrWG normiert die zur Durchführung der allgemeinen Überwachung notwendigen Auskunftspflichten sowie spezifische Duldungspflichten der Betroffenen. Die „geothermalen Abfälle“, auf die die Vorschriften des KrWG anwendbar sind, unterliegen unabhängig von ihrer Gefährlichkeit der abfallrechtlichen Überwachung nach § 47 KrWG.

An die Entsorgung und **Überwachung gefährlicher Abfälle** sind gemäß § 48 Satz 1 KrWG besondere Anforderungen zu stellen. So sind beispielsweise die Erzeuger und Besitzer gefährlicher Abfälle verpflichtet, ein Register zu führen, in denen die Entsorgung dieser Abfälle dokumentiert wird (§ 49 Abs. 3 i. V. m. Abs. 1 KrWG). Die Register sind den zuständigen Behörden auf Verlangen vorzulegen oder Angaben aus diesen Registern mitzuteilen (§ 49 Abs. 4 KrWG). Darüber hinaus bestehen für die Erzeuger und Besitzer gefährlicher Abfälle bestimmte Nachweispflichten, die ebenfalls die Entsorgung dieser Abfälle betreffen (§ 50 Abs. 1 Satz 1 KrWG).

Ob Abfälle als **gefährlich i. S. des KrWG** gelten, richtet sich nach § 3 Abs. 5 KrWG. Danach sind die Abfälle gefährlich, die durch Rechtsverordnung nach § 48 Satz 2 KrWG oder auf Grund einer solchen Rechtsverordnung bestimmt worden sind. Nicht gefährlich i. S. des KrWG sind alle übrigen Abfälle. Die Einstufung von Abfällen nach

⁵³⁰ Gärtner/Tachlinski, Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, S. 45 (50).

⁵³¹ Bundestag-Drucksache 17/6052, S. 96.

ihrer Gefährlichkeit erfolgt in der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV)⁵³² (§ 1 Nr. 2 AVV). Die AVV enthält als Anlage ein **Abfallverzeichnis**, in dem zahlreiche Abfallarten aufgelistet und mit sechsstelligen „Abfallschlüsseln“ versehen sind. Gemäß § 3 Abs. 1 Satz 1 AVV sind die mit einem Sternchen (*) versehenen Abfallarten gefährlich i. S. des § 48 KrWG.

Das erste Kapitel des Abfallverzeichnisses behandelt Abfälle, die beim Aufsuchen, Ausbeuten und Gewinnen sowie bei der physikalischen und chemischen Behandlung von Bodenschätzen entstehen. Als gefährlich sind hier u. a. die folgenden Abfallarten gekennzeichnet:

- 010505 Ölhaltige Bohrschlämme und -abfälle
- 010506 Bohrschlämme und andere Bohrabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten

Bei der Errichtung und dem Betrieb eines Geothermiekraftwerks können solche Bohrschlämme und -abfälle anfallen. Ob Stoffe in Bohrschlämmen und anderen Bohrabfällen „gefährliche Stoffe“ i. S. der AVV sind, beurteilt sich nach der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV)⁵³³ (vgl. Abfallverzeichnis, Einleitung Nr. 3 AVV). Die Gefährlichkeit von Stoffen ist hiernach u. a. dann zu bejahen, wenn sie giftig, gesundheitsschädlich, krebserzeugend oder umweltgefährlich sind (§ 3 Satz 2 GefStoffV).

Die im Zusammenhang mit der Geothermie anfallenden Bohrschlämme und Bohrabfälle weisen häufig Stoffe auf, die diese Eigenschaften erfüllen. Sie wären damit als „gefährliche Stoffe“ im Sinne der GefStoffV zu qualifizieren mit der Folge, dass es sich bei den betroffenen Bohrschlämmen und Bohrabfällen um gefährliche Abfälle i. S. des KrWG handeln würde. Dies gilt aber nur, **soweit diese Stoffe nicht vom Anwendungsbereich des KrWG ausgeschlossen sind.**

6.2.12.3 Abgrenzung zum Strahlenschutzrecht

Nach § 2 Abs. 2 Nr. 5 KrWG sind Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe i. S. des Atomgesetzes (AtG) vom Anwendungsbereich des KrWG ausgenommen.

⁵³² Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV) v. 10.12.2001 (BGBl. I 3379), zuletzt geändert am 24.2.2012 (BGBl. I 212).

⁵³³ Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) v. 26.11.2010 (BGBl. I 1643, 1644), zuletzt geändert am 15.7.2013 (BGBl. I S. 2514).

Dem Anwendungsausschluss nach § 2 Abs. 2 Nr. 5 KrWG kommt im Zusammenhang mit der Geothermie in der Praxis erhebliche Bedeutung zu. Eine Vielzahl der „geothermalen Abfälle“ erfüllt die Eigenschaften eines radioaktiven Stoffes i. S. des AtG und unterfällt demzufolge – bis zur Entlassung aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung – nicht dem Abfallregime des KrWG.

Radioaktive Stoffe (Kernbrennstoffe und sonstige radioaktive Stoffe) i. S. des AtG sind alle Stoffe, die ein Radionuklid oder mehrere Radionuklide enthalten und deren Aktivität oder spezifische Aktivität im Zusammenhang mit der Kernenergie oder dem Strahlenschutz nach den Regelungen des AtG oder einer aufgrund des AtG erlassenen Rechtsverordnung nicht außer Acht gelassen werden kann (§ 2 Abs. 1 Satz 1 AtG).

Die im Zuge des Betriebes einer geothermalen Anlage zutage geförderten Thermalwässer können natürliche Radionuklide enthalten. Die in den Thermalwässern enthaltenen Radionuklide können sich sowohl im Flowback als auch in den Scale und den Reinigungsabfällen wiederfinden. Ist dies der Fall, handelt es sich bei den genannten Abfallarten um Stoffe, die Radionuklide enthalten.

Ob die Aktivität eines Stoffes im Zusammenhang mit der Kernenergie oder dem Strahlenschutz außer Acht gelassen werden kann, beurteilt sich nach § 2 Abs. 2 AtG.

Die Aktivität oder spezifische Aktivität eines Stoffes kann u. a. dann außer Acht gelassen werden, wenn dieser die in Anlage III Tabelle 1 Spalte 2 und 3 StrlSchV enthaltenen **Freigrenzen** unterschreitet (vgl. § 2 Abs. 2 Satz 1 Nr. 1 AtG). Die Freigrenzen der StrlSchV entfalten jedoch nur in Bezug auf **Tätigkeiten** i. S. des § 2 Abs. 1 Nr. 1 und § 3 Abs. 1 Nr. 1 StrlSchV unmittelbare rechtliche Bedeutung (vgl. § 3 Abs. 2 Nr. 16 StrlSchV). Bei dem Betrieb eines Geothermiekraftwerks handelt es sich nicht um eine solche Tätigkeit.⁵³⁴

Aus demselben Grund ist auch § 2 Abs. 2 Satz 1 Nr. 2 AtG nicht einschlägig, denn darin wird vorausgesetzt, dass es sich um einen Stoff handelt, der im Rahmen einer **genehmigungspflichtigen Tätigkeit** nach dem AtG oder nach einer auf Grund des AtG erlassenen Rechtsverordnung angefallen ist. Zum einen werden im Zuge der geothermalen Stromerzeugung keine Tätigkeiten i. S. der StrlSchV vorgenommen, zum anderen bedarf es für den Betrieb einer Geothermieanlage keiner **atom- oder**

⁵³⁴ Zum Strahlenschutzrecht siehe auch Punkt 6.2.10.

strahlenschutzrechtlichen Genehmigung. Insbesondere ist eine Umgangsgenehmigung nach § 7 Abs. 1 StrlSchV nicht erforderlich.⁵³⁵

Dass die Aktivität „geothermaler Abfälle“ im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz oftmals nicht außer Acht gelassen werden kann, lässt sich aber aus § 2 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG folgern. Hiernach ist ein „Außerachtlassen“ u. a. gegeben, soweit es sich um einen **Stoff natürlichen Ursprungs** handelt, der nicht **auf Grund seiner Radioaktivität genutzt** wird und nicht **der Überwachung nach dem AtG oder einer auf Grund des AtG erlassenen Rechtsverordnung unterliegt**.

Bei den geförderten Thermalwässern handelt es sich um Stoffe natürlichen Ursprungs, die nicht auf Grund ihrer Radioaktivität genutzt werden.⁵³⁶ Vielmehr eignen sich die Wässer wegen ihrer hohen Temperaturen für die geothermale Stromerzeugung. Die Wärmeentwicklungen beruhen zwar auch auf radioaktiven Zerfallsprozessen; die Radioaktivität in den zutage geförderten Wässern ist für die eigentliche Stromerzeugung jedoch ohne Bedeutung.

Die Frage, ob bzw. welche Stoffe der strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen, beurteilt sich nach den §§ 97 bis 102 StrlSchV, die den **Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen** betreffen. Zu diesem Zweck werden bestimmte Materialien bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen der Überwachung durch die Strahlenschutzbehörden unterstellt. Die StrlSchV unterteilt Materialien in **Rückstände** und **sonstige Materialien**. Während Rückstände dem Anwendungsbereich der §§ 97 bis 101 StrlSchV unterfallen, stellt § 102 StrlSchV einen Auffangtatbestand für die Überwachung sonstiger Materialien dar.

Materialien sind Stoffe, die natürlich vorkommende Radionuklide enthalten oder mit solchen Stoffen kontaminiert sind (§ 3 Abs. 2 Nr. 20 StrlSchV). Rückstände sind Materialien, die in den in Anlage XII Teil A StrlSchV genannten industriellen und bergbauartigen Prozessen anfallen und die dort genannten Voraussetzungen erfüllen (§ 3 Abs. 2 Nr. 27 StrlSchV). Zu Letzteren zählen beispielsweise Schlämme und Ablagerungen

⁵³⁵ Siehe Punkt 6.2.10.4; nach der Definition in § 3 Abs. 2 Nr. 34 StrlSchV „Umgang mit radioaktiven Stoffen“ bezieht sich dieser nicht auf Arbeiten i. S. der StrlSchV („..., soweit es sich nicht um Arbeiten handelt, ...“).

⁵³⁶ Siehe Punkt 6.2.10.4.

aus der Gewinnung, Verarbeitung und Aufbereitung von Erdöl und Erdgas soweit ihre spezifische Aktivität über 0,2 Bq/g liegt.

Der Flowback, die Scale und die Reinigungsabfälle können natürlich vorkommende Radionuklide enthalten. Die Anlagenteile und Betriebsabfälle werden oftmals infolge der Berührung mit diesen Stoffen radioaktiv kontaminiert. Damit handelt es sich – soweit die genannten Voraussetzungen erfüllt sind – bei sämtlichen Abfallarten, die bei der Errichtung und dem Betrieb eines Geothermiekraftwerks anfallen, um Materialien i. S. der StrlSchV. Da die genannten Abfälle aber nicht in der Anlage XII Teil A StrlSchV genannt werden, gelten sie nicht als Rückstände i. S. der StrlSchV mit der Folge, dass die §§ 97 bis 101 StrlSchV auf sie **nicht unmittelbar anwendbar** sind. Die Abfälle sind vielmehr als sonstige Materialien i. S. des § 102 StrlSchV zu qualifizieren.

Die **strahlenschutzrechtliche Überwachungsbedürftigkeit** beurteilt sich bei Rückständen und sonstigen Materialien nach unterschiedlichen Kriterien:

Rückstände sind gemäß § 97 Abs. 2 Satz 1 StrlSchV überwachungsbedürftig, es sei denn, es ist sichergestellt, dass bei ihrer Beseitigung oder Verwertung die **Überwachungsgrenzen** in Anlage XII Teil B StrlSchV und die dort genannten Beseitigungs- oder Verwertungswege eingehalten werden. Rückstände, bei denen diese Voraussetzung nicht erfüllt ist bzw. später wegfällt, fallen als überwachungsbedürftige Rückstände in den Anwendungsbereich der §§ 97 ff. StrlSchV und sind somit radioaktive Stoffe i. S. des AtG.⁵³⁷ Sie können allerdings nach § 98 Abs. 1 StrlSchV unter bestimmten Voraussetzungen auf Grund der Entscheidung der Strahlenschutzbehörde **aus der Überwachung entlassen** werden – mit der Folge, dass für ihre Verwertung oder Beseitigung allein das Abfallrecht zur Anwendung kommt, weil die Stoffe mit der Entlassung aus der Überwachung die Eigenschaft eines radioaktiven Stoffes i. S. des Strahlenschutzrechts verlieren.⁵³⁸ Eine Entlassung aus der Überwachung darf nur erfolgen, wenn aufgrund der Umstände des Einzelfalls und der getroffenen Schutzmaßnahmen der erforderliche Schutz der Bevölkerung vor Strahlenexposition gewährleistet ist. Maßstab hierfür ist, dass als Richtwert hinsichtlich der durch die Beseitigung oder Verwertung bedingten Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung eine **effektive Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr** auch ohne weitere Maßnahmen nicht über-

⁵³⁷ Vgl. Bundesrat-Drucksache 207/01, S. 287.

⁵³⁸ Vgl. Bundesrat-Drucksache 207/01, S. 287.

schritten wird. Eine abfallrechtliche Verwertung oder Beseitigung ohne Entlassung ist nicht zulässig. Eine Entlassung darf ferner nur dann erfolgen, wenn der beabsichtigten Verwertung oder Beseitigung **keine abfallrechtlichen Bedenken** entgegenstehen (§ 98 Abs. 3 Satz 1 StrlSchV). Voraussetzung für die Entlassung ist deshalb, dass der zuständigen Strahlenschutzbehörde eine Erklärung des Antragsstellers über den Verbleib des künftigen Abfalls und eine Annahmeerklärung des Verwerterers oder Beseitigers vorgelegt wird. Eine Kopie der Annahmeerklärung ist der zuständigen Abfallbehörde zuzuleiten. Die Abfallbehörde kann von der Strahlenschutzbehörde verlangen, dass Einvernehmen hinsichtlich der Anforderungen an den Verwertungs- oder Beseitigungsweg hergestellt wird. Die Bestimmungen des KrWG zur Führung von Nachweisen über die ordnungsgemäße Entsorgung von Abfällen bleiben unberührt.

Für sonstige Materialien beurteilt sich die strahlenschutzrechtliche Überwachungsbedürftigkeit nach § 102 StrlSchV. Sofern die **zuständige Behörde**⁵³⁹ **feststellt**, dass durch Arbeiten mit bestimmten Materialien die Strahlenexposition so erheblich erhöht werden kann, dass Strahlenschutzmaßnahmen notwendig sind, kann sie **geeignete Maßnahmen anordnen**. Solange die Behörde diese Feststellung nicht getroffen hat, sind die Materialien keine radioaktiven Stoffe i. S. des AtG.⁵⁴⁰ Ob eine erheblich erhöhte Strahlenexposition im Zusammenhang mit sonstigen Materialien vorliegt, unterliegt der Beurteilung der Behörde im **Einzelfall**.⁵⁴¹ Da diese Materialien gegenüber den überwachungsbedürftigen Rückständen nach § 97 Abs. 2 Satz 1 StrlSchV bewusst als eigenständig zu behandelnde Kategorie ausgestaltet wurde, kann das Vorhandensein einer erheblich erhöhten Strahlenexposition hier nicht unter schematischer Übernahme der für die überwachungsbedürftigen Rückstände geltenden Maßstäbe begründet werden. Dies schließt jedoch nicht aus, dass sich die Behörde bei **materiell vergleichbaren Bewertungssachverhalten** im Rahmen der von ihr zu treffenden Einzelbeurteilung an bestimmten Schutzprinzipien der Rückstandsregelung orientiert. Entsprechendes gilt für die Festlegung der erforderlichen Maßnahmen. Wegen der Vielfältigkeit der bei den sonstigen Materialien denkbaren Fallgestaltungen sieht § 102 StrlSchV hier auch auf der Rechtsfolgenseite ein **offenes und flexibles Handlungs-**

⁵³⁹ Siehe hierzu die landesrechtlichen Zuständigkeitsverordnungen, welche die behördliche Zuständigkeit für die Durchführung der StrlSchV regeln. In Rheinland-Pfalz ist dies z. B. die „Landesverordnung über Zuständigkeiten auf dem Gebiet des Atom- und Strahlenschutzrechts“ vom 25. Januar 2006. In der Regel ist eine ausschließliche Zuständigkeit der Bergbehörden in Bezug auf Anlagen oder Betriebe gegeben, die der Bergaufsicht unterliegen.

⁵⁴⁰ Vgl. Bundesrat-Drucksache 207/01, S. 295.

⁵⁴¹ Bundesrat-Drucksache 207/01, S. 296.

instrumentarium vor, das der Behörde im Einzelfall situationsangepasste Maßnahmen zur Herbeiführung eines strahlenschutzgerechten Zustandes ermöglicht.⁵⁴² Für die **Entlassung sonstiger Materialien** aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung existiert keine ausdrückliche mit § 98 StrlSchV vergleichbare Vorschrift. In der betrieblichen Praxis wird aber über die Heranziehung des § 102 StrlSchV eine Prüfung veranlasst, in deren Rahmen die Möglichkeit der Entlassung aus der Überwachung **analog** der Vorgaben der §§ 97 ff. StrlSchV und der zugehörigen Anlage XII nachzuweisen ist.⁵⁴³ Mit der Entlassung aus der Überwachung sind die zu entsorgenden Materialien **keine radioaktiven Stoffe** i. S. der StrlSchV.

Es bleibt festzuhalten, dass sich die strahlenschutzrechtliche Überwachungsbedürftigkeit von Rückständen nach „starren“ Überwachungsgrenzen beurteilt. Bei sonstigen Materialien obliegt es dagegen der zuständigen Strahlenschutzbehörde im Einzelfall zu entscheiden, ob im Zusammenhang mit derartigen Materialien eine erheblich erhöhte Strahlenexposition vorliegt. In der Praxis wird oftmals eine erhöhte spezifische Aktivität der zu entsorgenden Materialien aus der Geothermie vermutet, so dass nach § 102 StrlSchV eine Einordnung als sonstiges überwachungsbedürftiges Material erfolgt.⁵⁴⁴ Ein Großteil dieser Abfälle unterliegt damit – bis zur Entlassung – der strahlenschutzrechtlichen Überwachung.

Bei Abfällen, die im Zusammenhang mit der Geothermie anfallen und **die per Gesetz oder behördlicher Anordnung der strahlenschutzrechtlichen Überwachung unterliegen**, sind die Voraussetzungen des § 2 Abs. 2 Satz 1 Nr. 3 AtG nicht erfüllt, so dass die Aktivität oder spezifische Aktivität dieser Stoffe im Zusammenhang mit dem Strahlenschutz nach der StrlSchV **nicht außer Acht** gelassen werden kann. Solange diese Stoffe nicht aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung entlassen worden sind, handelt sich um radioaktive Stoffe i. S. des AtG, die nach § 2 Abs. 2 Nr. 5 KrWG vom Anwendungsbereich des KrWG ausgeschlossen sind.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der Betreiber eines Geothermiekraftwerks nicht der **Ablieferungspflicht nach § 76 Abs. 4 StrlSchV** unterliegt. Hiernach sind radioaktive Abfälle bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen an eine **Landes-**

⁵⁴² Bundesrat-Drucksache 207/01, S. 295 f.

⁵⁴³ *Gärtner/Tachlinski*, Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, S. 45 (50).

⁵⁴⁴ Vgl. *Degering/Köhler*, Natürliche Radionuklide in Anlagen der tiefen Geothermie, Beitrag „Der Geothermiekongress 2009“ Bochum, Germany, 17-19 November 2009, S. 9.

sammelstelle abzuliefern. Es ist schon zweifelhaft, ob es sich bei „geothermalen Abfällen“, die als radioaktive Stoffe i. S. des AtG gelten, um **radioaktive Abfälle i. S. der StrlSchV** handelt. Hierzu zählen radioaktive Stoffe i. S. des § 2 Abs. 1 AtG, die nach § 9a AtG geordnet beseitigt werden müssen (§ 3 Abs. 2 Nr. 1 lit. a) StrlSchV). Die **Pflicht zur „geordneten Beseitigung“** wird in § 9a Abs. 1 Satz 1 AtG jedoch ausschließlich im Zusammenhang mit kerntechnischen Anlagen sowie Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen genannt; Geothermiekraftwerke werden hiervon nicht erfasst. Auch aus § 9a Abs. 2 Satz 1 i. V. m. Abs. 3 AtG lässt sich nichts anderes folgern. Danach hat derjenige, der radioaktive Abfälle besitzt, diese an eine Landessammelstelle abzuliefern. Letztendlich kann es aber auch dahinstehen, ob Abfälle, die im Rahmen des Betriebs eines Geothermiekraftwerks anfallen, radioaktive Abfälle i. S. des Atom- und Strahlenschutzrechts sind, da vorliegend **keine der übrigen Voraussetzungen des § 76 Abs. 4 StrlSchV gegeben** ist. Die Abfälle stammen nämlich weder aus einem Umgang nach § 7 Abs. 1 StrlSchV⁵⁴⁵ noch aus einem genehmigungsbedürftigen Betrieb von Anlagen zur Erzeugung ionisierender Strahlen.

Obwohl die Betreiber von Geothermieanlagen nicht der Ablieferungspflicht nach § 76 Abs. 4 StrlSchV unterliegen, kann die zuständige Behörde nach **§ 102 Satz 2 Nr. 2 StrlSchV** anordnen, dass „geothermale Abfälle“, die natürlich vorkommende Radionuklide enthalten oder mit solchen Stoffen kontaminiert sind und infolgedessen als sonstige Materialien gelten, bei einer von ihr zu bestimmenden Stelle (z. B. Landessammelstelle) aufzubewahren oder zu verwahren sind.

6.2.12.4 Abgrenzung zum Bergrecht

Nach § 2 Abs. 2 Nr. 7 KrWG gelten die Vorschriften des KrWG nicht für Abfälle, die unmittelbar beim Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten sowie bei der damit zusammenhängenden Lagerung von Bodenschätzen in Betrieben anfallen, die der Bergaufsicht unterstehen und die nach dem Bundesberggesetz (BBergG)⁵⁴⁶ in der jeweils geltenden Fassung und den aufgrund des BBergG erlassenen Rechtsverordnungen unter Bergaufsicht entsorgt werden.

⁵⁴⁵ Siehe hierzu Punkt 6.2.10.4.

⁵⁴⁶ Bundesberggesetz (BBergG) v. 13.8.1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert am 7.8.2013 (BGBl. I S. 3154).

Gemäß § 22a Abs. 1 ABergV⁵⁴⁷ hat der Bergunternehmer für die Entsorgung von Abfällen nach § 2 Abs. 2 Nr. 7 KrWG, die unmittelbar beim Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten sowie bei der damit zusammenhängenden Lagerung von Bodenschätzen auf dem Festland und im Bereich der Küstengewässer anfallen (bergbauliche Abfälle), unbeschadet der Vorschriften über die Betriebsplanpflicht für die Errichtung, Führung und Einstellung des Betriebes **geeignete Maßnahmen** zu treffen, um **Auswirkungen auf die Umwelt** sowie sich daraus ergebende **Risiken für die menschliche Gesundheit** so weit wie möglich zu vermeiden oder zu vermindern. Er hat dabei den Stand der Technik im Hinblick auf die Eigenschaften der Abfallentsorgungseinrichtung, ihres Standortes und der Umweltbedingungen am Standort zu berücksichtigen. Der Einsatz einer bestimmten Technik wird hierdurch nicht vorgeschrieben.⁵⁴⁸

Nach § 22a Abs. 2 ABergV hat der Unternehmer hat für die Entsorgung von bergbaulichen Abfällen einen Abfallbewirtschaftungsplan gemäß Anhang 5 der ABergV aufzustellen und diesen durch Vorlage bei der zuständigen Behörde rechtzeitig, spätestens zwei Wochen vor Aufnahme der Tätigkeiten, anzuzeigen.⁵⁴⁹ Der Unternehmer hat den Abfallbewirtschaftungsplan alle fünf Jahre zu überprüfen und anzupassen, soweit sich der Betrieb der Abfallentsorgungseinrichtung oder der bergbauliche Abfall wesentlich verändert hat. Anpassungen sind der zuständigen Behörde anzuzeigen.

Geothermiebetriebe unterliegen der **Bergaufsicht** nach § 69 Abs. 1 BBergG.⁵⁵⁰ Für die Durchführung der Bergaufsicht ist in den Ländern das jeweilige **Bergamt** zuständig.⁵⁵¹ Es bestimmt grundsätzlich nach pflichtgemäßem Ermessen, ob und welche konkreten **Überwachungsmaßnahmen** getroffen werden.⁵⁵² Inhaltlich ist die Bergaufsicht auf die in **§ 55 BBergG** bezeichneten Rechtsgüter und Belange beschränkt.⁵⁵³ Hiernach müssen u. a. anfallende Abfälle ordnungsgemäß verwendet oder beseitigt werden (§ 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 6 BBergG). Durch die Zuständigkeitsregelungen der Länder wird sichergestellt, dass in den der Bergaufsicht unterliegenden Betrieben nicht nur die berggesetzlichen, sondern fast alle staatlichen Aufsichtsfunktionen von der Bergbehörde

⁵⁴⁷ Bergverordnung für alle bergbaulichen Bereiche (Allgemeine Bundesbergverordnung – ABergV) v. 23.10.1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert am 24.2.2012 (BGBl. I S. 212).

⁵⁴⁸ Zur Erläuterung und einheitlichen Handhabung der Regelungen des § 22a ABergV hat der Länderausschuss Bergbau (LAB) Vollzugshinweise zu § 22 a ABergV erarbeitet. Siehe hierzu bspw. Verfügung des LBEG vom 13.01.2009 – B I a 6 II 2008-003 (Nr. 21.1 der Sammlung der Rundverfügungen).

⁵⁴⁹ Zum Abfallbewirtschaftungsplan nach § 22a ABergV siehe ausführlich *Brockhoff*, UPR 2013, 254 ff.

⁵⁵⁰ Siehe hierzu ausführlich Kapitel 6.2.5.

⁵⁵¹ *Boldt/Weller*, Bundesberggesetz Kommentar, 1984, § 69 Rn. 5.

⁵⁵² *Boldt/Weller*, Bundesberggesetz Kommentar, 1984, § 69 Rn. 23.

⁵⁵³ Vgl. *Boldt/Weller*, Bundesberggesetz Kommentar, 1984, § 69 Rn. 10.

wahrgenommen werden. So überwachen die Bergbehörden beispielsweise in den ihrer Aufsicht unterstehenden Betrieben die Einhaltung der Vorschriften der Strahlenschutzverordnung.⁵⁵⁴

Der Ausschluss der Anwendung des KrWG setzt voraus, dass die fraglichen Abfälle „**unmittelbar**“ beim Bergbau anfallen. Vorausgesetzt wird eine Unmittelbarkeitsbeziehung zwischen den in § 2 Abs. 2 Nr. 7 KrWG genannten bergbaulichen Tätigkeiten des Aufsuchens, Gewinnens, Aufbereitens und Lagerns und den als Abfall zu qualifizierenden Stoffen.⁵⁵⁵ Grundsätzlich geht der Unmittelbarkeitsbezug verloren, wenn die Bergbaubabfälle in einem außerhalb der Bergaufsicht unterstehenden Betrieb entsorgt werden, d. h. sobald sie die durch den bergbaulichen Betriebsplan bestimmte räumliche und sachliche Sphäre des Bergbaubetriebes verlassen.⁵⁵⁶

Dies gilt insbesondere für die Scale, Reinigungsabfälle, Anlagenteile und Betriebsabfälle. Abfälle wie Scale und Reinigungsrückstände werden in der Regel auf **Deponien** beseitigt, während Betriebsabfälle mit organischen Anteilen in **Verbrennungsanlagen** gegeben werden.⁵⁵⁷ Für metallische Komponenten (z. B. Rohre, Pumpen) besteht die Möglichkeit des Recyclings in einer **Schmelzanlage**.⁵⁵⁸

Bezüglich des Flowbacks bedarf es hingegen einer differenzierenden Betrachtung. Die bergrechtlichen Vorschriften finden auf den Flowback nur dann Anwendung, wenn seine **Behandlung als Abfall** (z. B. Aufbereitung zur Wiederverwendung) im Rahmen des bergbaulichen Betriebes stattfindet.⁵⁵⁹ Wird er hingegen Dritten mit dem Ziel überlassen, ihn als Abfall zu beseitigen, unterliegt er jedenfalls mit dem Zeitpunkt des Verlassens des Bergbaubetriebes abfallrechtlichen Vorschriften.⁵⁶⁰ Soll der Flowback **verpresst oder als Abwasser entsorgt** werden, sind wasserrechtliche Anforderungen zu beachten (s. hierzu Kapitel 6.2.7).

⁵⁵⁴ *Boldt/Weller*, Bundesberggesetz Kommentar, 1984, § 69 Rn. 29 f.

⁵⁵⁵ Vgl. *Schomerus*, in: Versteyl/Mann/Schomerus, Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar, 3. Auflage, 2012, § 2 Rn. 26.

⁵⁵⁶ *Schomerus*, in: Versteyl/Mann/Schomerus, Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar, 3. Auflage, 2012, § 2 Rn. 26 m.w.N.

⁵⁵⁷ *Gärtner/Tachlinski*, in: Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, S. 45 (45).

⁵⁵⁸ *Gärtner/Tachlinski*, in: Geothermie und Strahlenschutz, Strahlenschutzpraxis 2/2013, S. 45 (45).

⁵⁵⁹ *Schink*, Flowback beim Fracking, AbfallR 1/2013, S. 36 (38).

⁵⁶⁰ *Schink*, Flowback beim Fracking, AbfallR 1/2013, S. 36 (39).

6.2.12.5 Abgrenzung zum Wasserrecht

Die Vorschriften des KrWG gelten gemäß § 2 Abs. 2 Nr. 9 KrWG nicht für Stoffe, sobald sie in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden.

Die Bereichsausnahme nach § 2 Abs. 2 Nr. 9 KrWG entfaltet in der Geothermie rechtliche Bedeutung insbesondere im Zusammenhang mit dem Flowback, soweit dieser als Abwasser entsorgt wird. Es gilt das wasserrechtliche Regime, sobald der Flowback in ein Gewässer oder in eine Abwasseranlage eingeleitet oder eingebracht wird.⁵⁶¹ Dies ist auch dann der Fall, wenn der Flowback mit einem Tankwagen transportiert wird, um ihn als Abwasser zu entsorgen; auch der Transport unterfällt dann abwasserrechtlichen Regelungen.⁵⁶² Eine **Spezialität des Bergrechts** bzw. eine **Konzentrationswirkung der bergrechtlichen Betriebspläne**, die auch die wasserrechtlichen Anforderungen mitumfassen, besteht dagegen nicht.⁵⁶³

Der Flowback, der im Zusammenhang mit dem Betrieb eines Geothermiekraftwerks anfällt, ist **Abwasser i. S. des WHG**. Das WHG untergliedert in den §§ 54 ff. Abwasser in Schmutz- und Niederschlagswasser. Schmutzwasser ist das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch **in seinen Eigenschaften veränderte Wasser** und das bei Trockenwetter damit zusammen abfließende Wasser (§ 54 Abs. 1 Nr. 1 WHG). Es gilt ein **weiter Schmutzwasserbegriff**.⁵⁶⁴ Nicht erforderlich ist, dass die Veränderung nachteilig oder sogar auf die Dauer nachteilig ist oder dass die Flüssigkeit umfangreiche Wasseranteile enthält.⁵⁶⁵ Allerdings ist aus Bergwerken abgepumptes Grubenwasser kein Abwasser, wenn es weder gebraucht noch in seinen Eigenschaften verändert wird.⁵⁶⁶ Das Wasser, das für geothermale Stimulationsverfahren verwendet wird, erfährt sowohl durch den Zusatz von Additiven als auch durch den Eintrag von Thermalwasser eine Veränderung seiner Eigenschaft und unterfällt damit der Abwasserdefinition des WHG. Lediglich unverändertes Thermalwasser ist kein Abwasser.⁵⁶⁷

⁵⁶¹ Vgl. Schomerus, in: Versteyl/Mann/Schomerus, Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar, 3. Auflage, 2012, § 2 Rn. 32 m. w. N.

⁵⁶² Schink, Flowback beim Fracking, AbfallR 1/2013, S. 36 (39).

⁵⁶³ Boldt/Weller, Bundesberggesetz Kommentar, 1984, § 50 Rn. 9.

⁵⁶⁴ Czychowski/Reinhardt, WHG, § 54 Rn. 8.

⁵⁶⁵ Czychowski/Reinhardt, WHG, § 54 Rn. 8.

⁵⁶⁶ BVerwG, Urteil vom 27.11.1992 – 8 C 55.90, NVwZ 1993, 997.

⁵⁶⁷ Vgl. Meiners/Denneborg/Müller u. a., a.a.O., S. B 109.

Soll Flowback als Abwasser beseitigt werden, kommt entweder eine **Einleitung in Gewässer (Direkteinleitung)** oder eine **Einleitung in eine Abwasseranlage (Indirekteinleitung)** in Betracht. Unter Gewässer sind nach § 3 Nr. 1, 2 und 3 WHG oberirdische Gewässer, Küstengewässer und das Grundwasser zu verstehen. Abwasseranlagen sind alle (öffentlichen oder privaten) Einrichtungen zur Abwasserbeseitigung, insbesondere zum Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern, Verregnen und Verrieseln von Abwasser sowie zum Entwässern von Klärschlamm im Zusammenhang mit der Abwasserbeseitigung.⁵⁶⁸ Dazu zählen nicht nur Abwasserbehandlungsanlagen, sondern auch Kanäle, Nebenanlagen, so dass auch ortsbewegliche Anlagen („Kanal auf Rädern“) dem Anlagenbegriff unterfallen.⁵⁶⁹

Sowohl für die Direkteinleitung als auch die Indirekteinleitung von Flowback bedarf es einer **wasserrechtlichen Erlaubnis bzw. Genehmigung**.

Gemäß § 57 Abs. 1 WHG darf die **Erlaubnis für eine Direkteinleitung** nur erteilt werden, wenn

1. die Menge und Schädlichkeit des Abwassers so gering gehalten wird, wie dies bei Einhaltung der jeweils in Betracht kommenden Verfahren nach Stand der Technik möglich ist,
2. die Einleitung mit den Anforderungen an die Gewässereigenschaften und sonstigen rechtlichen Anforderungen vereinbar ist und
3. Abwasseranlagen oder sonstige Einrichtungen errichtet und betrieben werden, die erforderlich sind, um die Einhaltung der Anforderungen nach den Nummern 1 und 2 sicherzustellen.

Die Abwasserverordnung (AbwV)⁵⁷⁰ bestimmt die Anforderungen, die bei der Erteilung der Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in Gewässer mindestens festzusetzen sind.

Eine **Genehmigung für eine Indirekteinleitung** darf nach § 58 Abs. 2 WHG nur erteilt werden, wenn

⁵⁶⁸ Czychowski/Reinhardt, Wasserhaushaltsgesetz Kommentar, 10. Auflage, 2010, § 60 Rn. 9.

⁵⁶⁹ Schomerus, in: Versteyl/Mann/Schomerus, Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar, 3. Auflage, 2012, § 2 Rn. 31 m.w.N.

⁵⁷⁰ Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV) v. 17.6.2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), zuletzt geändert am 2.5.2013 (BGBl. I S. 973).

1. die nach der Rechtsverordnung nach § 23 Abs. 1 Nr. 3 i. V. m. § 57 Abs. 2 WHG für die Einleitung maßgebenden Anforderungen einschließlich der allgemeinen Anforderungen eingehalten werden,
2. die Erfüllung der Anforderungen an die Direkteinleitung nicht gefährdet wird und
3. Abwasseranlagen oder sonstige Einrichtungen errichtet und betrieben werden, die erforderlich sind, um die Einhaltung der Anforderungen nach den Nummern 1 und 2 sicherzustellen.

Ob nach § 58 Abs. 2 WHG für die Indirekteinleitung von schadstoffbelasteten Flowback eine Genehmigung erteilt werden kann, hängt vom Ausmaß der Schadstoffbelastung im Einzelfall ab; ggf. ist gemäß § 58 Abs. 2 Nr. 3 WHG eine vorherige Abwasserklärung des Flowbacks erforderlich.⁵⁷¹

6.2.12.6 Aspekte des Transport- und Gefahrgutrechts

Rechtliche Unklarheiten ergeben sich in der Praxis oftmals aufgrund der Tatsache, dass dem Begriff „radioaktiver Stoff“ im Strahlenschutzrecht sowie im Transport- und Gefahrgutrecht **unterschiedliche Bedeutung** zukommt.

Die **Beförderung von sonstigen radioaktiven Stoffen** auf öffentlichen oder der Öffentlichkeit zugänglichen Verkehrswegen ist **genehmigungsbedürftig** (§ 16 Abs. 1 S. 1 StrlSchV). Wie bereits dargelegt wurde, werden Rückstände nach § 98 Abs. 1 Satz 1 StrlSchV auf Antrag aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung entlassen, wenn aufgrund der Umstände des Einzelfalls und der getroffenen Schutzmaßnahmen der erforderliche **Schutz der Bevölkerung vor Strahlenexpositionen** sichergestellt ist. Maßstab hierfür ist, dass als Richtwert hinsichtlich der durch die Beseitigung oder Verwertung bedingten Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung eine **effektive Dosis von 1 mSv im Kalenderjahr** auch ohne weitere Maßnahmen nicht überschritten wird. Mangels ausdrücklicher Regelung wird § 98 StrlSchV entsprechend angewendet auf Abfälle, die beim Betrieb eines Geothermiekraftwerks anfallen und sonstige Materialien i. S. des § 102 StrlSchV sind. Mit der Entlassung aus der Überwachung verlieren die Stoffe die Eigenschaft eines radioaktiven Stoffes i. S. des Strahlenschutzrechts, so dass es nach der Entlassung aus der strahlenschutzrechtlichen

⁵⁷¹ Schink, Flowback beim Fracking, AbfallR 1/2013, S. 36 (44).

Überwachung für die Beförderung dieser Stoffe auf öffentlichen Verkehrswegen einer Genehmigung nach § 16 Abs. 1 S. 1 StrlSchV nicht bedarf.

Trotz der Entlassung von Stoffen aus der strahlenschutzrechtlichen Überwachung kann es im Hinblick auf transport- und gefahrgutrechtliche Vorschriften erforderlich sein, diese Stoffe bei ihrer Beförderung (z. B. zur Deponie) als „**Klasse 7**“ (**radioaktive Stoffe**) zu kennzeichnen. Für die Durchführung von Gefahrguttransporten auf der Straße sind im Wesentlichen die Vorschriften der Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt (GGVSEB)⁵⁷² und die Bestimmungen der Anlagen A und B zum Europäischen Übereinkommen über die Internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR)⁵⁷³ zu beachten. Im Gefahrgutrecht wird bereits bei geringeren Aktivitätswerten von einem „radioaktiven Stoff“ ausgegangen. Radioaktive Stoffe i. S. des ADR sind Stoffe, die Radionuklide enthalten, bei denen sowohl die Aktivitätskonzentration als auch die Gesamtaktivität je Sendung die im ADR 2.2.7.2.2.1 bis 2.2.7.2.2.6 aufgeführten Werte übersteigt (2.2.7.1.1 ADR, Anlage A). Dies führt in der Praxis oftmals dazu, dass Deponiebetreiber die Annahme dieser Stoffe verweigern. Einer der Hauptgründe für diese Haltung ist die Sorge vor einer Stigmatisierung der Unternehmen in der Öffentlichkeit als Beseitiger radioaktiver Abfälle.

⁵⁷² Verordnung über die innerstaatliche und grenzüberschreitende Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, mit Eisenbahnen und auf Binnengewässern (Gefahrgutverordnung Straße, Eisenbahn und Binnenschifffahrt – GGVSEB) v. 17.06.2009, neugefasst durch Bekanntmachung vom 22.1.2013 (BGBl. I S. 110).

⁵⁷³ Anlage zur Bekanntmachung der Neufassung der Anlagen A und B des Europäischen Übereinkommens vom 30. September 1957 über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (ADR) in der ab dem 1. Januar 2013 geltenden Fassung, G 1998, Anlageband zum Bundesgesetzblatt Teil II Nr. 15 vom 21.6.2013.

6.2.13 Haftungsrechtliche Aspekte

6.2.13.1 Einleitung

Wie bei anderen Anlagen der Industrie und der Energiewirtschaft gibt es auch in einem Geothermie-Projekt – wie im Vorhaben dargelegt – verschiedenartige Risiken. Diese sollten bei einer sorgfältigen Projektplanung, ausreichender Erkundung des Untergrundes sowie sachverständiger Projektdurchführung beherrschbar sein. Der „Fall Staufen“ zeigt im Bereich der oberflächennahen Geothermie allerdings anschaulich das Ausmaß, wenn sich ein solches Risiko realisiert. In Staufen im Breisgau wurden 2007 Geothermie-Bohrungen zur Erdwärmegewinnung abgeteuft. Im Folgenden kam es zu Bodenhebungen, die erhebliche Risse an Gebäuden in der historischen Altstadt verursachten. Die Ursache der Hebungen kann bis heute nicht mit 100%iger Sicherheit festgestellt werden. Jedoch liegt laut dem Beweissicherungsgutachten der Materialprüfungsanstalt Stuttgart die Wahrscheinlichkeit bei zwei zu eins, dass die Hebungen auf die Geothermie-Bohrungen zurückzuführen sind.⁵⁷⁴ Vermutlich drang kurz nach der Bohrung Wasser aus einer unter hohem Druck stehenden grundwasserleitenden Schicht in eine darüber liegende stratigrafische Formation aus Anhydrit ein. Daraus folgte eine chemische Reaktion zu Gips, was zur Volumenzunahme im Erdreich und dadurch zu Bodenhebungen führte.⁵⁷⁵ Die Höhe der Schäden liegt bis heute im zweistelligen Millionenbereich (EUR).⁵⁷⁶

Auch im Bereich der Tiefengeothermie sind gewisse Risiken zu beobachten. Dies wurde in jüngster Zeit durch die Ereignisse nahe St. Gallen in der Schweiz deutlich. Im Juli 2013 war durch die Injektion von großen Mengen Wasser in den Untergrund im Rahmen eines Geothermie-Projektes in Sittertobel ein Erdbeben der Stärke 3,6 ausgelöst worden.⁵⁷⁷ Dies verursachte zwar keine Schäden, dennoch wurde das Projekt vorerst gestoppt. Auch in Deutschland sorgten wiederholt seismische Ereignisse rund um das Geothermie-Projekt in Landau für Verunsicherung. Die nach derzeitigem Kenntnisstand wahrscheinlichste Ursache des Erdbebens vom 15. August 2009 ist eine Erhöhung des

⁵⁷⁴ *Schad*, Sachverständigengutachten der Materialprüfungsanstalt Stuttgart zum Fall Staufen (Az. 14 OH 5-08), S. 14.

⁵⁷⁵ *Limpens*, Wirkungsunsicherheiten in der Geothermie-Bohrung: Der „Fall Staufen“, DVBl. 2009, S. 1495.

⁵⁷⁶ *Ehricke*, Verkehrssicherungspflichten im Hinblick auf Geothermie-Bohrungen, UPR 2009, 281, 281.

⁵⁷⁷ Auch in Basel (2007) und Landau (2009) bebte die Erde, wo die Ursache in Geothermie-Projekten gesehen wird.

Porenwasserdrucks, die durch die Injektion von Wasser in tiefe Gesteinsschichten hervorgerufen wurde. Die Stärke des Erdbebens lag in einem Bereich, in dem leichte nichtstrukturelle Schäden an empfindlichen Gebäuden nicht mehr vollkommen ausgeschlossen werden können. Leichte strukturelle (Schäden an der Tragstruktur) oder moderate nichtstrukturelle Schäden aber sehr unwahrscheinlich sind.⁵⁷⁸ Die sachlichen Hintergründe sind in Kapitel 5.6 dargestellt.

Auch wenn im Bereich der Tiefengeothermie bislang kein konkretes Schadensereignis bekannt ist, welches Rechtsgüter erheblich beeinträchtigt hat, stellt sich die Frage, welche Haftungsgrundlagen es im Falle eines theoretischen Schadensereignisses gibt.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Haftung in solchen Fällen komplex und unter anderem aufgrund unterschiedlicher Beweislastverteilungen und mitunter verschiedener Tatbestandsalternativen durch den Gesetzgeber nicht immer eindeutig geregelt ist.⁵⁷⁹ So stellt sich zunächst die Frage nach der **zurechenbaren Verletzungshandlung**. Diese liegt in einem Verhalten, das eine nachteilige Beeinträchtigung eines Rechtes oder eines Rechtsgutes. Die Handlung kann in einem positiven Tun oder in einem Unterlassen bestehen. Diese muss dem Handelnden zurechenbar sein. Im Fall des Unterlassens muss regelmäßig eine Pflicht zum Handeln zur Verhütung der Rechtsgutsverletzung bestehen, deren Beachtung die Rechtsgutsverletzung verhindert hätte.

Schwierigkeiten können sich etwa daraus ergeben, dass in den unterschiedlichen Fallkonstellationen teilweise sowohl zivilrechtliche als auch öffentlich-rechtliche Haftungs Vorschriften greifen.⁵⁸⁰ In solchen Fällen muss das Konkurrenzverhältnis dieser Vorschriften bestimmt werden. Zudem kommen verschiedene Anspruchsgegner in Betracht. Diese reichen von ausführenden Bergbau-/Tiefbohr-/Bauunternehmen, über Subunternehmer und Bauherren schließlich bis hin zu den Eigentümern der Grundstü-

⁵⁷⁸ Vgl. u. a. das seismische Ereignis bei Landau vom 15.08.2009 – Abschlussbericht der Expertengruppe „Seismisches Risiko bei hydrothermalen Geothermie“ <http://www.mwkel.rlp.de/File/Landau-Abschlussbericht-Expertengruppe-pdf/> (zuletzt aufgerufen am 08.11.2013)

⁵⁷⁹ Zu den verschiedenen in Betracht kommenden Haftung- und Unterlassungsansprüchen siehe auch ausführlich *Müggenborg* in Frenz/Preuße (Hrsg.), Tagungsbeiträge zum 12. Aachener Altlasten- und Berschadenskundliches Kolloquium (ABK) am 21. und 22. Juni 2010: Geothermie – Risikobeherrschung und Stand der Technik, Perspektiven und Fördermöglichkeiten, Heft 123 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik, Seite 35 ff.

⁵⁸⁰ Um zivilrechtliche Haftung handelt es sich, wenn die Vorschrift auf Schadensersatz gegenüber einem Geschädigten gerichtet ist. Öffentlich-rechtliche Verantwortlichkeit liegt vor, wenn es um eine behördliche Inanspruchnahme des Verantwortlichen zur Schadensbeseitigung geht.

cke bzw. der Anlagen (sollten diese nicht identisch mit dem Bauherrn sein). Ein weiteres Problem ist - wie auch im „Fall Staufen“ - die Frage der Kausalität. Die folgende Darstellung gibt einen Überblick über verschiedene in Betracht kommende Anspruchsgrundlagen.

6.2.13.2 Zivilrechtliche Haftung

6.2.13.2.1 Umwelthaftungsgesetz

Durch § 1 Umwelthaftungsgesetz (UmweltHG) existiert eine anlagenbezogene, verschuldensunabhängige Gefährdungshaftung. Nach dieser Norm ist der Inhaber einer Anlage verpflichtet Schadensersatz zu leisten, wenn durch eine Umwelteinwirkung, die von einer im Anhang 1 zum UmweltHG genannten Anlage ausgeht, jemand getötet, sein Körper oder seine Gesundheit verletzt oder eine Sache beschädigt wird. Anspruchsberechtigt ist dabei der Inhaber des geschädigten Rechtsguts.

Der Anlagenbegriff wird dabei durch den expliziten Verweis auf den Katalog der Anhang 1 deutlich enger gefasst. Eine Geothermieanlage ist dabei nicht von der Auflistung umfasst. Auch eine analoge Anwendung scheidet aufgrund des konkreten und abschließenden Charakters des Anlagenkataloges der Anhang 1 aus. Daher ist der Anwendungsbereich des § 1 UmweltHG für Geothermieanlagen nicht eröffnet.

6.2.13.2.2 Bergschadensrecht - §§ 114 ff. BBergG

(1) Anwendbarkeit des Bergschadensrechts

Damit der Anwendungsbereich der §§ 114 ff. BBergG eröffnet ist, muss nach § 114 Abs. 1 BBergG zunächst eine der in § 2 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BBergG beschriebenen Tätigkeiten vorliegen. Wenn eine Bohrung zur Erkundung des Untergrundes auf seine Eignung zur Gewinnung von Erdwärme durchgeführt wird, so fällt dies als Aufsuchungstätigkeit über §§ 2 Abs. 1 Nr. 1 i. V. m. 3 Abs. 3 Satz 2 Nr. 2 Buchstabe b i. V. m. 4 Abs. 1 BBergG in den Anwendungsbereich der § 114 ff. BBergG. Ebenso unterfallen dem bergrechtlichen Haftungsregime Bohrungen zur Installation einer *grundstücksübergreifenden* Erdwärmegewinnungsanlage. Als Bohrungen zur grundstücksübergreifenden Gewinnung *oder* Nutzung von Erdwärme sind sie über §§ 2 Abs. 1 Nr. 1 i. V. m. 4 Abs. 2 Hs. 1 BBergG von Anwendungsbereich erfasst. Lediglich

bei Bohrungen zur Installation einer *grundstückbezogenen* Erdwärmegewinnungsanlage, d. h. einer solchen, bei der es sowohl um Gewinnung als auch um Nutzung geht, ist der Anwendungsbereich des Bergschadensrechts nicht eröffnet. Auch eine analoge Anwendung auf Bohrungen im Sinne des § 127 BBergG scheidet hier aus. Angesichts des klaren Wortlauts der §§ 114 ff. BBergG und des § 127 Abs. 1 BBergG ist nicht von einer planwidrigen Regelungslücke des Gesetzgebers auszugehen.

(2) Bergschaden

Wird bei einer der unter § 2 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BBergG beschriebenen Tätigkeiten oder durch eine der in § 2 Abs. 1 Nr. 3 bezeichneten Einrichtungen ein Mensch getötet oder der Körper oder die Gesundheit eines Menschen verletzt oder eine Sache beschädigt, so liegt nach der Legaldefinition des § 114 Abs. 1 BBergG ein Bergschaden vor. § 114 Abs. 2 enthält Ausnahmetatbestände, in welchen ein Bergschaden zu verneinen ist. Bezüglich Tötung, Körper- oder Gesundheitsverletzungen liegt nach § 114 Abs. 2 Nr. 1 Alt. 1 BBergG dann kein Bergschaden vor, wenn der beauftragte Bohrunternehmer selbst, bei diesem beschäftigte Personen oder auch der Bauherr bzw. Träger eines Geothermievorhabens als Unternehmer im Sinne des § 115 BBergG betroffen sind. Vielmehr muss es sich bei den geschädigten Personen um „Dritte“ handeln, wie z. B. Nachbarn, Anwohner, Passanten oder Besucher.⁵⁸¹ Nach § 114 Abs. 2 Nr. 3 BBergG stellen bestimmte Immissionsschäden („*ein Schaden, der durch Einwirkungen entsteht, die nach § 906 des Bürgerlichen Gesetzbuchs nicht verboten werden können*“) keinen Bergschaden i. S. d. § 114 Abs. 1 BBergG dar. Bei Immissionsschäden, d.h. Einwirkungen insbesondere in Form von Erschütterungen und Geräuschen, liegt ein Bergschaden nur dann vor, wenn es durch die geothermiebedingten Einwirkungen zu einer wesentlichen Beeinträchtigung der Benutzung anderer Grundstücke gekommen ist und die Benutzung des Bohrgrundstücks entweder ortsunüblich oder zwar ortsüblich war, aber die wesentliche Beeinträchtigung durch wirtschaftlich zumutbare Maßnahmen hätte verhindert werden können.⁵⁸² Ein Anspruch aus § 114 Abs. 1 BBergG kommt also erst in Betracht, wenn die durch § 906 BGB nach allgemeinem Nachbarrecht gezogene Grenze überschritten ist. Unwesentliche Beeinträchtigungen sind nach § 906 Abs. 1 BGB stets zu dulden. Die dem Bergbaubetreibenden insoweit eingeräum-

⁵⁸¹ Kräber, Haftungsprobleme bei Geothermie-Bohrungen, Seite 125, 343.

⁵⁸² Vgl. Kräber, a.a.O., Seite 132 ff.

te Vorzugsstellung beruht auf der volkswirtschaftlichen Bedeutung seiner Tätigkeit, die durch (Unterlassungs-)Ansprüche Dritter nicht behindert werden soll.⁵⁸³

(3) Kausalität

Weiterhin muss die bergbauliche Tätigkeit, also z. B. die Geothermie-Bohrung, kausal für den Bergschaden sein. Daher muss nach der Äquivalenztheorie feststehen, dass die Geothermie-Bohrung und nicht etwa natürliche Veränderungen im Untergrund den Kausalverlauf angestoßen haben.⁵⁸⁴ Zudem muss im Sinne der im Bergschadensrecht ergänzend herangezogenen Adäquanztheorie, die als ursächlich nur ansieht, was die Gefahr des Eintritts eines Schadens der vorliegenden Art nicht unerheblich erhöht hat und nicht als ein singuläres oder außergewöhnliches Ereignis zum Fortfall der Kausalität führt⁵⁸⁵, der Kausalverlauf nicht außerhalb jeglicher Lebenserfahrung liegen, wie es z. B. bei höherer Gewalt oder einem unabwendbaren Ereignis der Fall ist.

(4) Beweislast und Bergschadensvermutung

Die Darlegungs- und Beweislast für den Schaden und seine Höhe sowie für die Schadensursache trifft den Geschädigten. § 120 Abs. 1 Satz 1 BBergG enthält eine Umkehr der Beweislast dahingehend, dass die Kausalität vermutet wird, wenn im Einwirkungsbereich der untertägigen Aufsuchung oder Gewinnung eines Bergbaubetriebes durch Senkungen, Pressungen oder Zerrungen der Oberfläche oder durch Erdrisse ein Schaden entsteht. Lediglich bei Vorliegen der Voraussetzungen des § 120 Abs. 1 Satz 2 BBergG entfällt dieser Beweis des ersten Anscheins.

Für den Bohrlochbergbau stellt sich die Frage, ob dieser als „**untertägiger**“ Bergbau im Sinne des § 120 BBergG gilt und damit in den Anwendungsbereich der so genannten Bergschadensvermutung fällt.

⁵⁸³ Vgl. *Piens/Schulte/Graf Vitzthum*, Bundesberggesetz, § 114, Rn. 57.

⁵⁸⁴ *Kräber*, a.a.O., Seite 153, 344.

⁵⁸⁵ *Müggendorf* in Frenz/Preuß (Hrsg.), Tagungsbeiträge zum 12. Aachener Altlasten- und Bergschadenskundliches Kolloquium (ABK) am 21. und 22. Juni 2010: Geothermie – Risikobeherrschung und Stand der Technik, Perspektiven und Fördermöglichkeiten, Heft 123 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallurgie, Rohstoff- und Umwelttechnik, Seite 37.

In der bergrechtlichen Literatur wird die Anwendbarkeit der Vorschriften über die Haftung für Bergschäden auf den Bohrlochbergbau überwiegend verneint.⁵⁸⁶ Auch in der Praxis findet diese Vorschrift keine Anwendung auf den Bohrlochbergbau. Ferner bezieht die auf Grundlage von § 67 Nr. 7 BBergG erlassene Bergverordnung über Einwirkungsgebiete (EinwirkungsBergV), welche die Art und Weise der Festlegung des Bereichs bestimmt, in dem durch einen Gewinnungsbetrieb auf die Oberfläche eingewirkt werden kann, den Bohrlochbergbau nicht ein.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass eine analoge Anwendung der Bergschadensvermutung auf Erschütterungen oder Hebungen der Oberfläche wegen des insoweit eindeutigen Wortlauts des § 120 BBergG nicht in Betracht kommt. In diesen Fällen hat ein Geschädigter nach den herkömmlichen Grundsätzen darzulegen und zu beweisen, dass ein Kausalzusammenhang zwischen der Niederbringung der Geothermie-Bohrung und dem (Berg-)Schaden besteht.

(5) Ersatzpflichtige

Der Bauherr bzw. Träger des Geothermievorhabens ist ersatzpflichtiger Unternehmer im Sinne des § 115 Abs. 1 BBergG. Dies gilt unabhängig, ob er einen unselbständigen, weisungsgebundenen und finanziell abhängigen Bohrunternehmer oder einen selbständigen Bohrunternehmer mit der Niederbringung der Bohrung beauftragt.⁵⁸⁷ Für den Fall, dass der Bauherr nicht gleichzeitig Inhaber der Bergbauberechtigung ist, so haftet der Bergbauberechtigte gemäß § 116 Abs. 1 Satz 1 BBergG im Außenverhältnis gegenüber dem Geschädigten neben dem Unternehmer als Gesamtschuldner, wobei im Innenverhältnis allein der Unternehmer haftet gemäß § 116 Abs. 2 BBergG, soweit nicht ein anderes vereinbart ist.

(6) Ersatzberechtigte

Gemäß § 114 Abs. 1 BBergG ist anspruchsberechtigt, wer durch einen Bergschaden im Sinne des § 114 Abs. 1 BBergG einen Vermögensnachteil erlitten hat. Das bedeu-

⁵⁸⁶ Nach *Boldt/Weller*, Bundesberggesetz, § 120 Rn. 9 ist § 120 BBergG für den Bohrlochbergbau eindeutig nicht anwendbar (mit Verweis auf die Gesetzgebungsunterlagen und Regelungsentwürfe). Ebenso *Pienschulte/Graf Vitzthum*, Bundesberggesetz, § 120, Rn. 14 (m. w. N.), welcher die Geltung für den Bohrlochbergbau bezweifelt. Anders allerdings *Kräber*, a.a.O., Seite 345, der Geothermiebohrungen zum untertägigen Bereich zählt, allerdings auf die Probleme hinweist, den Einwirkungsbereich einer Geothermiebohrung zu bestimmen.

⁵⁸⁷ *Kräber*, a.a.O., Seite 346.

tet, dass bei Personenschäden (Körper-oder Gesundheitsverletzung) die verletzte Person selbst Anspruchsinhaber ist, bei Tötung eines Menschen Dritte im Sinne der §§ 844, 845 BGB anspruchsberechtigt sind. Liegt eine Sachbeschädigung vor, können neben dem Eigentümer auch obligatorisch Berechtigte, z. B. Mieter oder Pächter, einen Schaden geltend machen.

(7) Ersatzfähiger Schaden

Der Umfang der zu ersetzenden Bergschäden i. S. d. § 144 Abs. 1 BBergG richtet sich gemäß § 117 Abs. 1 BBergG nach den Vorschriften des Bürgerlichen Gesetzbuches über die Verpflichtung zum Ersatz des Schadens im Falle einer unerlaubten Handlung. Dies richten sich wiederum im Wesentlichen nach den §§ 249-254 BGB. Zu beachten sind allerdings die Haftungsbegrenzungen des § 117 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BBergG. Danach ist die Haftung bei Tötung oder Verletzung eines Menschen gemäß § 117 Abs. 1 Nr. 1 BBergG für jede Person bis zu einem Kapitalbetrag von 600.000 EUR oder bis zu einem Rentenbetrag von jährlich 36.000 EUR begrenzt. Nach § 117 Abs. 1 Nr. 2 BBergG ist im Falle einer Sachbeschädigung die Haftung auf den gemeinen Wert der Sache begrenzt. Dies gilt nach Halbsatz 2 allerdings nicht für die Beschädigung von Grundstücken, deren Bestandteil und Zubehör.

(8) Verhältnis zu anderen Vorschriften

Das Verhältnis zu anderen Haftungsvorschriften richtet sich nach § 121 BBergG. Danach bleiben gesetzliche Vorschriften unberührt, nach denen für einen Schaden im Sinne des § 114 in weiterem Umfang als nach den Vorschriften dieses Abschnitts gehaftet wird oder nach denen ein anderer für den Schaden verantwortlich ist. Konkurrierende Vorschriften, die in ihrem Umfang weiter gehen als die § 114 ff. BBergG – also insbesondere §§ 823 ff. BGB und § 89 WHG – sind neben dem Bergschadensrecht anwendbar. Ebenfalls gilt dies für solche Vorschriften, nach denen nicht nach Bergschadensrecht Ersatzpflichtige (Unternehmer und Bergbauberechtigter) in Haftung genommen werden können, wie auch hier §§ 823 ff. BGB und § 89 WHG.

(9) Fazit

In der Praxis dürfte die Beweisführung, dass die bergbaulichen Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme ursächlich für einen (Sach-)Schaden sind, schwierig sein und nur durch entsprechende Sachverständigen-

gutachten gelingen. Daher sollte das im BBergG verankerte Bergbauschadensrecht systematisch auf die Gewinnung von Bodenschätzen durch Tiefbohrungen erweitert werden. Durch die Ausdehnung der Bergschadensvermutung des § 120 BBergG auf diese Tätigkeiten würde bei Schäden, die mit seismischen Ereignissen in Verbindung gebracht werden, eine Beweislastumkehr bewirkt: Der Betreiber müsste zukünftig nachweisen, dass Schäden seinen Aktivitäten nicht zuzurechnen sind. Hierdurch würde Betroffenen eine höhere Rechtssicherheit gegeben und deren Rechtsposition gestärkt werden. Gleichzeitig könnte damit auch mehr Akzeptanz in der breiten Öffentlichkeit für den auch aufgrund der umstrittenen Fracking-Technologie zur Förderung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Kritik geratenen Bohrlochbergbau erreicht werden.

6.2.13.2.3 § 89 WHG

§ 89 WHG enthält zwei zivilrechtliche Haftungstatbestände für Gewässerverunreinigungen. Diese Regelung ersetzt seit dem 01.03.2010 den bisherigen § 22 WHG, jedoch ohne inhaltliche Änderungen.⁵⁸⁸ Allgemein enthält § 89 WHG eine Gefährdungshaftung, die an die Veränderung der Wasserbeschaffenheit durch Einwirken auf das Wasser anknüpft.⁵⁸⁹ § 89 Abs. 1 Satz 1 WHG begründet die Haftung für ein bestimmtes Verhalten (Verhaltenshaftung). § 89 Abs. 2 Satz 1 WHG knüpft die Haftung an die Emissionen aus bestimmten (gefährlichen) Anlagen.⁵⁹⁰ Eine § 89 WHG ergänzende Strafvorschrift gegen unbefugte Verunreinigungen enthält § 324 StGB, der allerdings Vorsatz oder Fahrlässigkeit voraussetzt.

Geothermievorhaben beinhalten diverse Risiken in Bezug auf das Grundwasser.⁵⁹¹ Zum einen können Verunreinigungen des Grundwassers beim Bohrvorgang entstehen. Da meist mehrere geologische Schichten und Grundwasserleiter durchteuft werden, besteht das Risiko eines hydraulischen Kurzschlusses zwischen zwei getrennten Grundwasserleitern, falls die Verrohrung und Abdichtung nicht ordnungsgemäß wird, sowie das Risiko des Absenkens des Grundwasserspiegels verbunden mit z. B. Setzungen an der Oberfläche, das Quellen von Mineralien durch Wasserzutritt mit Hebung

⁵⁸⁸ Einzig der inzwischen obsolet gewordene Absatz 3 wurde ersatzlos gestrichen.

⁵⁸⁹ Landmann/Rohmer-Petersen, Umweltrecht, WHG, § 89 Rn. 2.

⁵⁹⁰ Czychowski/Reinhardt, Kommentar zum WHG, § 89 Rn. 4.

⁵⁹¹ Siehe hierzu auch die Ausführungen unter 6.2.7.

gen an der Oberfläche oder das Verschleppen von Grundwasserverunreinigungen in tiefere Grundwasserstockwerke.⁵⁹² Zum anderen können aus einer Geothermieanlage Stoffe in das Grundwasser gelangen und dessen Qualität nachteilig verändern.

Fraglich ist, ob und gegebenenfalls wer für einen potenziell entstandenen Schäden haften würde. Beispiele für potentielle Schäden sind die eventuell notwendige Sanierung von belastetem Grundwasser nach behördlicher Aufforderung sowie Kosten zur Reinigung des Grundwassers, die einem Wasserwerk entstehen. Ersatzberechtigter ist, wer durch die nachteilige Gewässeränderung einen Schaden erlitten hat.

(1) § 89 Absatz 1 WHG

Wer in ein Gewässer Stoffe einbringt oder einleitet oder wer in anderer Weise auf ein Gewässer einwirkt und dadurch die Wasserbeschaffenheit nachteilig verändert, ist nach § 89 Abs. 1 Satz 1 WHG zum Ersatz des daraus einem anderen entstehenden Schadens verpflichtet. Das „Einbringen“ bezieht sich dabei auf feste Stoffe, während das „Einleiten“ die Aggregatzustände flüssig und gasförmig erfasst.⁵⁹³ Das Einwirken „in anderer Weise“ dient als Auffangklausel und erfasst auch nicht stoffliche, die Eigenschaft der Gewässer verändernde Aktivitäten, wie z. B. radioaktive Strahlung oder eine Erwärmung des Wassers.⁵⁹⁴ Gewässer werden in § 2 Abs. 1 WHG definiert, worunter nach § 2 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 WHG auch das Grundwasser fällt.

Die Haftung nach § 89 Abs. 1 WHG stellt eine verschuldensunabhängige Verhaltenshaftung dar. Voraussetzung ist lediglich ein zielgerichtetes Handeln. Es genügt, wenn die Handlung nach ihrem äußeren Erscheinungsbild objektiv geeignet ist, dem Gewässer Schadstoffe zuzuführen, wobei ein funktioneller Zusammenhang mit einer Gewässerbenutzung vorliegen muss. Daher wird die nachteilige Veränderung der Wasserbeschaffenheit durch stoffliche Einträge (z. B. Spülzusätze oder Schmiermittel) oder durch Vermischung zweier Grundwasserleiter, durch Anbohren von im Untergrund befindlichen Altlasten, durch Bodenverunreinigungen oder Wasserverunreinigungen vom Tatbestand des § 89 Abs. 1 WHG umfasst.⁵⁹⁵ Ein bloßes Hineingelangen der Stoffe ist

⁵⁹² Vgl. *Mohr/Schlöser*, Die Risiken für das Grundwasser durch Geothermieanlagen, BWGZ 19/2010, S. 782, 783.

⁵⁹³ *Mohr/Schlöser*, Die Risiken für das Grundwasser durch Geothermieanlagen, BWGZ 19/2010, S. 783.

⁵⁹⁴ *Landmann/Rohmer-Petersen*, Umweltrecht, WHG, § 89 Rn. 20.

⁵⁹⁵ *Kräber*, Haftungsprobleme bei Geothermie-Bohrungen, S. 287.

dagegen jedoch nicht ausreichend, um den Tatbestand zu erfüllen.⁵⁹⁶ So wird demnach keine Haftung begründet, wenn die Stoffe nach einem Störfall oder Unfall in ein oberirdisches Gewässer fließen und dort Schäden verursachen. Bei den eingangs⁵⁹⁷ genannten Beispielen wäre die Gewässerverunreinigung infolge einer Bohrung daher von Absatz 1 erfasst, das Austreten von Stoffen aus einer Geothermieranlage infolge eines Störfalles dagegen nicht.

Der Tatbestand des Absatzes 1 kann auch durch Unterlassen verwirklicht werden⁵⁹⁸. Voraussetzung ist, wie bei jedem Unterlassungstatbestand, dass eine Rechtspflicht zum Handeln bestand. Eine solche kann sich insbesondere aus der allgemeinen Verkehrssicherungspflicht gemäß § 823 BGB ergeben.⁵⁹⁹ Daher kann neben dem Unternehmer, welcher eine Bohrung durchführt und die tatsächliche Sachherrschaft innehat, auch der Eigentümer der errichteten Anlage schadensersatzpflichtig sein.

Zu fordern ist nach dem Wortlaut des § 89 WHG⁶⁰⁰ ein haftungsbegründender Kausalzusammenhang, wofür grundsätzlich der Anspruchsteller beweispflichtig ist.⁶⁰¹ Auch wenn die Beweiserleichterungen der §§ 6,7 UmweltHG als Spezialvorschriften nicht analog auf § 89 WHG anwendbar sind, so kommen dem Geschädigten bei typischen Geschehensabläufen, regelmäßig die Grundsätze des Anscheinsbeweises zu Gute.⁶⁰²

(2) § 89 Absatz 2 WHG

Nach § 89 Abs. 2 WHG ist der Betreiber einer Anlage zum Schadensersatz verpflichtet, wenn aus einer Anlage, die bestimmt ist, Stoffe herzustellen, zu verarbeiten, zu lagern, abzulagern, zu befördern oder wegzuleiten, derartige Stoffe in ein Gewässer gelangen, ohne in dieses eingebracht oder eingeleitet zu sein und dadurch die Wasserbeschaffenheit nachteilig verändert wird. Ein Ausschluss der Schadensersatzpflicht besteht nach Absatz 3 für höhere Gewalt. § 89 Abs. 2 WHG stellt damit eine anlagenbezogene Haftung für Schäden auf, welche sich daraus ergeben, dass aus einer Anlage Stoffe in ein Gewässer gelangen und zu einer nachteiligen Veränderung der Wasserbeschaf-

⁵⁹⁶ Vgl. Landmann/Rohmer-Petersen, Umweltrecht, WHG, § 89 Rn. 3.

⁵⁹⁷ Siehe 6.2.13.1.

⁵⁹⁸ BGHZ 65, 221, 223.

⁵⁹⁹ Siehe dazu unter 6.2.13.2.4.

⁶⁰⁰ § 89 WHG: „...und dadurch...“.

⁶⁰¹ Czychowski/Reinhardt, WHG, § 89 Rn. 45.

⁶⁰² OLG Düsseldorf, Urt. v. 3.11.1994-10 U 71/93, ZfW 1996, 549, 551.

fenheit führen. Der Begriff der Anlage ist dabei weit zu verstehen - im Gegensatz zu § 90 WHG i. V. m. dem Umweltschadensgesetz, welcher nur die in Anlage 1 USchadG aufgeführten Anlagen erfasst -, sodass eine Geothermieanlage, aber auch Rohrleitungen unter § 89 Abs. 2 WHG subsumiert werden können. Zwar verlangt Absatz 2 dem Wortlaut nach, dass Stoffe ins Grundwasser aus einer Anlage gelangen, die dazu bestimmt ist, Stoffe u. a. zu verarbeiten. Jedoch hat die Rechtsprechung die Vorschrift über ihren Wortlaut dergestalt erweitert, dass eine Verarbeitung auch dann zu bejahen ist, wenn Stoffe in einer Anlage zur Herstellung anderer Erzeugnisse (z. B. Wärmeenergie) verwendet werden. Im Gegensatz zu Absatz 1 erfasst Absatz 2 auch Störfälle und Unfälle.⁶⁰³ Die Haftung des Absatzes 2 trifft den Inhaber der Anlage, nicht den Werkunternehmer. Als Inhaber kommt neben dem Eigentümer, auch ein Mieter oder Pächter der Anlage in Betracht.⁶⁰⁴

(3) Ersatzfähiger Schaden

§ 89 WHG ersetzt nicht nur Schäden an Körper, Gesundheit oder Eigentum, sondern auch reine Vermögensschäden. Darunter fallen z. B. die Kosten für die Behandlung des verunreinigten Wassers oder für die Untersuchung von Wasserproben (Wasseranalysen).⁶⁰⁵ Ein Wasserwerk könnte zudem die Rettungskosten, wie z. B. den Einbau eines Pumpwerks vor der Wasserfassung zur Filtrierung des verunreinigten Grundwassers verlangen. Im Gegensatz zu anderen Gefährdungstatbeständen ist die Höhe des Anspruchs zudem nicht begrenzt.⁶⁰⁶ Dass **geringfügige Nachteile**, die eine Benutzung i. S. d. § 9 WHG verursacht, im Bewilligungsverfahren nicht zu Einwendungen berechtigen, ergibt sich aus § 14 Abs. 4 Satz 2 WHG. Die Folge ist, dass wegen geringfügiger Nachteile auch keine Entschädigung festgesetzt werden kann und im Fall des § 16 Abs. 2 Satz 2 WHG **kein Schadensersatzanspruch** besteht.⁶⁰⁷ Diese Regelung ist Ausdruck des allgemeinen Grundsatzes der Gemeinverträglichkeit. Für den Schadensersatzanspruch nach § 89 WHG wird i. d. R. nichts anderes gelten können.⁶⁰⁸ Art und Umfang des Schadensersatzanspruches bestimmen sich im Übrigen

⁶⁰³ *Mohr/Schlöser*, Die Risiken für das Grundwasser durch Geothermieanlagen, BWGZ 19/2010, S. 783.

⁶⁰⁴ *Mohr/Schlöser*, Die Risiken für das Grundwasser durch Geothermieanlagen, BWGZ 19/2010, S. 783.

⁶⁰⁵ *Czychowski/Reinhardt*, WHG, § 89 Rn. 48.

⁶⁰⁶ *Mohr/Schlöser*, Die Risiken für das Grundwasser durch Geothermieanlagen, BWGZ 19/2010, S. 783.

⁶⁰⁷ *Czychowski/Reinhardt*, WHG, § 89 Rn. 57.

⁶⁰⁸ So auch *Czychowski/Reinhardt*, WHG, § 89 Rn. 57.

nach den allgemeinen bürgerlich-rechtlichen Vorschriften der §§ 249 bis 254 BGB, da das WHG keine weiteren besonderen Vorschriften dafür bereithält.⁶⁰⁹

6.2.13.2.4 § 823 Abs.1 BGB

Eine deliktsrechtliche Haftung nach § 823 Abs. 1 BGB im Rahmen eines Geothermie-Projektes im Rahmen aktiven Tuns wird sich nur selten ergeben. Jedoch löst hier auch ein Unterlassen eine Haftung gegenüber dem Inhaber des verletzten Rechtsguts aus, wenn eine Pflicht zum Handeln zur Verhütung der Rechtsgutsverletzung bestanden hat, deren Beachtung die Rechtsgutsverletzung verhindert hätte.⁶¹⁰ Es wird somit primär um die Frage gehen, ob jemanden ein Vorwurf dahingehend gemacht werden kann, dass er bestimmte Maßnahmen unterlassen hat um einen Schaden für andere Rechtsgüter abzuwenden. Ein Unterlassen, welches zum Schadensersatz führt, setzt aber immer zwingend voraus, dass eine Rechtspflicht zum Handeln bestanden hat. Eine solche könnte in Gestalt einer Verkehrssicherungspflicht bestehen.

Verkehrssicherungspflichten bedeuten, dass jeder, der eine Gefahrenlage schafft oder in seinem Bereich andauern lässt bzw. sie unterhält, die ihm zumutbaren Vorkehrungen treffen muss, um zu verhindern, dass Dritte infolge der Gefahr zu Schaden kommen.⁶¹¹ Das Konstrukt der Verkehrssicherungspflichten ergibt sich nicht direkt aus dem Gesetzeswortlaut des § 823 Abs. 1 BGB. Es beruht vielmehr auf einer umfangreichen Kasuistik der Rechtsprechung. Im Gegensatz zum allgemeinen Deliktsrecht sowie zu diversen Einzelbereichen sind die Verkehrssicherungspflichten bei Geothermie-Bohrungen bislang kaum konkretisiert worden.⁶¹² Verkehrssicherungspflichten bestimmen sich im Einzelfall danach, welche Gefahrenquelle geschaffen oder beibehalten wird, was im Einzelnen zur Gefahrenabwehr erforderlich ist und was dem Sicherungspflichtigen zumutbar ist.⁶¹³

Im Geothermie-Bereich, wie im sonstigen Umweltrecht, wird der Umfang erforderlicher und zumutbarer Maßnahmen häufig durch die Verwendung von Technikstandards vorgegeben. So wird den Beteiligten per Gesetz oder Verordnung aufgegeben, sich bei

⁶⁰⁹ OLG Düsseldorf, Urt. v. 3.11.1994-10 U 71/93, ZfW 1996, 549,553.

⁶¹⁰ Palandt/Sprau, BGB Kommentar, § 823 Rn.2.

⁶¹¹ Vgl. BGHZ 5, 378, 380; BGHZ 103, 338, 340.

⁶¹² Ehricke, Verkehrssicherungspflichten im Hinblick auf Geothermie-Bohrungen, UPR 2009, 281.

⁶¹³ Ehricke, Verkehrssicherungspflichten im Hinblick auf Geothermie-Bohrungen, UPR 2009, 281, 282.

Planung, Errichtung und Betrieb von Anlagen nach den anerkannten Regeln der Technik bzw. dem Stand der Technik zu richten. Um den genauen Umfang der aus den Technikstandards folgenden Verhaltenspflichten zu bestimmen, müssen diese konkretisiert werden. Zur Konkretisierung können dabei technische Regelwerke herbeigezogen, welche grundsätzlich keinen bindenden, aber zumindest Empfehlungscharakter aufweisen. Auch können sie durch konkrete Bezugnahme in Gesetzen und Verordnungen bzw. im Einzelfall in Genehmigungen verbindlich gemacht werden⁶¹⁴. Im Rahmen der Geothermie können dies DIN-Normen, DVGW-Regelwerk, VDE-Bestimmungen sowie VDI-Richtlinien sein. Im Folgenden wird zwischen den Verkehrssicherungspflichten des Bergbauunternehmers, des Auftraggebers bzw. Bauherrn und denen des Bauunternehmers unterschieden. Andererseits regeln diese Vorschriften die Pflichten nicht abschließend. Bei der Konkretisierung von unbestimmten Rechtsbegriffen ist zu beachten, dass das Einhalten der technischen Regelwerke nicht zwangsweise das Einhalten der geforderten Sorgfalt begründet.⁶¹⁵ Eine Exkulpation unter Verweis auf die Einhaltung der entsprechenden technischen Regelwerke ist daher nicht möglich. Ebenso kann man die Verletzung einer Verkehrssicherungspflicht nicht mit dem Argument verneinen, alle notwendigen behördlichen Genehmigungen seien eingeholt, alle Auflagen eingehalten worden.⁶¹⁶

6.2.13.2.4.1 Allgemeine Verkehrssicherungspflichten

(1) Verkehrssicherungspflichten Auftraggeber/Bauherr

Die Verkehrssicherungspflichten des Auftraggebers sind sorgfältig zu differenzieren:

Ist der Auftraggeber gleichzeitig der Bauherr hat er eine *eigene* Verkehrssicherungspflicht dafür zu sorgen, dass durch die geschaffene Gefahrenquelle- hier die Bohrung- keine Schäden für Dritte entstehen. Dieser Pflicht kann sich der Auftraggeber nicht einfach entledigen, indem er geeignete Hilfspersonen mit den Pflichten beauftragt. Die eigene Verkehrssicherungspflicht besteht im Wesentlichen in einem solchen Fall in der ordnungsgemäßen Organisation der den Hilfspersonen übertragenen Tätigkeiten sowie

⁶¹⁴ Dazu siehe ausführlich 6.2.4.

⁶¹⁵ *Seibel*, Abgrenzung der „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ vom „Stand der Technik“, NJW 2013, 3000, 3001.

⁶¹⁶ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 283.

der regelmäßigen Überwachung der tatsächlichen Ausführungen.⁶¹⁷ Anderes gilt, wenn ein zuverlässiger, selbstständiger Fachunternehmer beauftragt wird, die Verkehrssicherungspflichten zu übernehmen, z. B. einen fachkundiger Architekt oder Bauingenieur für die Bauaufsicht.⁶¹⁸ In diesen Fällen entfällt regelmäßig die oben dargestellte Überwachungspflicht.

Ist der Auftraggeber nicht zugleich der Bauherr, so eröffnet er auch nicht direkt die Gefahrenquelle. Hier ist bezüglich der Verkehrssicherungspflichten zu differenzieren, ob ein Weisungsverhältnis zwischen Auftraggeber und Bauherr besteht oder ob es sich bei letzterem um ein selbständiges Unternehmen handelt. Im letzteren Fall besteht eine Pflicht zur ordnungsgemäßen Auswahl, Instruktion und Überwachung des Unternehmens. Der Umfang der Pflicht nimmt in dem Maße ab, wie das Unternehmen eigene Spezialkenntnisse für die Tätigkeit hat.⁶¹⁹ Im Falle eines abhängigen Unternehmens herrscht allgemein im Deliktsrecht Streit, ob § 831 BGB greifen soll (und sich der Auftraggeber mithin exkulpieren kann) oder ob sich die Pflichten nach wie vor aus § 823 BGB ergeben und ebenfalls eine umfangreiche Auswahl,- Instruktions,- und Überwachungspflicht statuieren.⁶²⁰ Diese Kontroverse ist auch auf Geothermie-Bohrungen übertragbar. Die h. M. zieht die Pflicht aus § 823 BGB und lässt keine Exkulpation zu. Die vom Auftraggeber eröffnete Gefahr liege darin, dass die Hilfsperson mit der Bohrung tätig wird und ihrerseits Gefahren für den Verkehr schafft.⁶²¹

(2) Verkehrssicherungspflichten Bauunternehmer

Bei einer Geothermie-Bohrung eröffnet das Bauunternehmen naturgemäß eine Gefahrenquelle sowohl für den Bauherrn als auch für Dritte. Daher obliegen ihm auch die entsprechenden Verkehrssicherungspflichten. Diese sind vielfältiger Art und nicht zuletzt- wie immer bei Verkehrssicherungspflichten- auch durch den konkreten Einzelfall, also das konkrete Bohrprojekt zu bestimmen. Allgemein lässt sich festhalten, die Pflicht besteht den Baustellenbereich derart abzusichern, dass keine Gefahren für andere davon ausgehen können.⁶²² Des Weiteren besteht die Pflicht in Bezug auf die Bohrstelle selbst. Auch hier muss die Errichtung so erfolgen, dass keine Gefahren für

⁶¹⁷ Vgl. BGH, NJW 1996, 2646; BGH, NJW-RR 1989, 394, früher bereits RGZ 53, 57.

⁶¹⁸ Vgl. OLG Frankfurt/M., Urt. V. 11.8.2005-26 U 71/04 (unveröffentlicht).

⁶¹⁹ BGH, NJW-RR 2007, 1028.

⁶²⁰ Ehricke, UPR 2009, 281, 284.

⁶²¹ Ehricke, UPR 2009, 281, 284.

⁶²² Ehricke, UPR 2009, 281, 285.

den Auftraggeber und für Dritte von ihr ausgehen. Im Hinblick auf den Auftraggeber wird jedoch meist der Rückgriff auf die allgemeine Verkehrssicherungspflicht entbehrlich sein, da diesbezügliche Pflichten zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer auch in der Regel explizit vertraglich geregelt werden.⁶²³

Auch muss das Bohrverfahren im konkreten Fall so gewählt sein, dass dadurch keine Gefahren für die erwähnten Personenkreise entstehen. Im Fall Staufen wurde dies diskutiert soweit Bohrungen mit einem Imlochhammer und Luftspülung (sog. down-the-hole-hammer drilling) durchgeführt wurden, teilweise Bohrlöcher verrohrt worden sind und eine Verpressung mit einer feststoffreichen Suspension stattfand.⁶²⁴ Dabei kommt es vor allem darauf an, was dem Stand der Technik entsprechend als ausreichen angesehen werden kann. Jedenfalls kann vom Auftragnehmer keine absolute Sicherheit gefordert werden.⁶²⁵

6.2.13.2.4.2 Spezielle Verkehrssicherungspflichten

Durch den Bau einer Geothermieranlage wird eine Gefahrenquelle eröffnet, sodass Verkehrssicherungspflichten eingreifen. Diese bestehen einerseits in der Einhaltung und Beachtung der entsprechenden baulichen, technischen und rechtlichen Anforderungen an eine Geothermie-Bohrung und des Weiteren in der Ergreifung aller Maßnahmen, die zur Verminderung der Gefahren notwendig sind, die von einer Baustelle ausgehen.⁶²⁶ Im Falle von Geothermie-Bohrungen ist es regelmäßig der Fall, dass der Bauherr die Bohrung nicht selbst ausführt, sondern ein Bohrunternehmen damit beauftragt. Nun greifen die oben aufgeführten Verkehrssicherungspflichten der ordnungsgemäßen Auswahl, Instruktion und Überwachung.

(1) Auswahl

Wenn der Bauherr ein öffentlicher Auftraggeber ist, hat er das Bohrunternehmen regelmäßig im Rahmen eines förmlichen Vergabeverfahrens auszuwählen. Nach § 97 Abs. 5 GWB ist der Zuschlag dabei auf das wirtschaftlichste Angebot zu erteilen. Es könnte daher eine Pflichtverletzung darstellen, wenn die Wahl auf den Anbieter mit

⁶²³ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 285.

⁶²⁴ Fall Staufen, Sachverständigengutachten der MPA Stuttgart (Az. 14 OH 5-08), Seite 15 f.

⁶²⁵ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 286.

⁶²⁶ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 284.

dem günstigsten Verfahren fällt. Allgemein wird dies aber zu verneinen sein, wenn die Vorgaben für das Bauvorhaben in der Ausschreibung dem Stand der Technik entsprechen haben und der Anbieter mit seinem Verfahren zur Vornahme der Bohrungen diesen Anforderungen entsprochen hat, denn alleine der Umstand, dass das Verfahren das kostengünstigste ist, stellt keine Verletzung einer Verkehrssicherungspflicht des öffentlichen Bauherrn dar.⁶²⁷ Lediglich wenn konkrete Anhaltspunkte für eine erkennbare Unzuverlässigkeit oder Ungeeignetheit des Unternehmens vorliegen, kann in einem solchen Fall die Verletzung einer Verkehrssicherungspflicht bejaht werden.

(2) Instruktion

Die Instruktionspflicht des Bauherrn besteht im Rahmen einer Geothermie-Bohrung darin, das beauftragte Bauunternehmen mit den notwendigen Informationen in Bezug auf die Baustelle auszustatten. Dazu gehört, das Unternehmen über die Besonderheiten des Bodens und der unterirdischen Situation in der Region zu unterrichten⁶²⁸. Vorgelagert ist dem denklogisch als erster Schritt, dass sich der Bauherr selbst ein Bild über die geologischen Besonderheiten verschafft. Dies kann durch Zusammenarbeit mit den zuständigen Behörden geschehen, im Rahmen welcher entsprechende Gutachten eingeholt werden können. Gegebenenfalls kann auch die Pflicht bestehen, dem Bauunternehmen eine direkte Einsichtsmöglichkeit in die entsprechenden Behördenunterlagen zu vermitteln⁶²⁹.

(3) Überwachung

Schließlich besteht für den Bauherrn die erwähnte Überwachungspflicht. Diese beinhaltet die Pflicht, zu kontrollieren, dass das ausführende Bohrunternehmen sich an die notwendigen technischen Vorgaben hält. Darunter fallen insbesondere die Standards, die in der Ausschreibung vorgesehen sind, welche wiederum nach dem Stand der Technik erforderlich sein müssen.⁶³⁰ Eine permanente Kontrolle wird vom Bauherrn nicht verlangt, vielmehr muss die Kontrolle „ausreichend“ sein.⁶³¹ Wann dies der Fall ist, ist vielmehr eine Frage des Einzelfalles. Je komplizierter und komplexer die Bohrtätigkeit ist, desto größere Anforderungen sind an die Kontrollen zu stellen. Bei einfachen

⁶²⁷ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 285.

⁶²⁸ OLG Frankfurt, Urt. v. 11.8.2005- 26 U 71/04

⁶²⁹ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 285.

⁶³⁰ Fall Staufen, Sachverständigengutachten der Materialprüfungsanstalt Stuttgart (Az. 14 OH 5-08), S. 14.

⁶³¹ OLG Zweibrücken, VerSR 2004, 611.

Bohrtätigkeiten wird angenommen, dass stichprobenartige Kontrollen ausreichen.⁶³² Problematisch ist im Rahmen der Kontrolle bei Geothermie-Bohrungen regelmäßig auch die Tatsache, dass die Arbeiten oft in beachtlichen Teufen stattfinden und eine direkte Überwachung daher aus praktischen Gründen ausscheidet. Da nach allgemeinen Grundsätzen die Grenze der Verkehrssicherungspflichten die Zumutbarkeit ist, ist der Verkehrssicherungspflichtige nur gehalten, seine Kontrollen in höchstmöglichem Maß stattfinden zu lassen.⁶³³

Der Geschädigte muss nach allgemeinen Grundsätzen darlegen und beweisen, dass durch Verletzung einer Verkehrssicherungspflicht ein kausaler Schaden entstanden ist. Ein Rückgriff auf die Bergschadensvermutung des § 120 BBergG zur Beweiserleichterung scheidet aus, weil die Bergschadensvermutung ihre Rechtfertigung in den Besonderheiten des Bergschadensrechts findet und aufgrund der unterschiedlichen Anknüpfungspunkte nicht auf die deliktische Haftung übertragen werden kann.

6.2.13.2.4.3 Spezielle Verkehrssicherungspflichten aus dem Bergrecht

Das BBergG kann aber herangezogen werden, um spezielle Verkehrssicherungspflichten herzuleiten. Diese können sich für den Bauherrn sowie den Bauunternehmer aus den §§ 110, 111 BBergG ergeben. Es handelt sich nach wie vor um eine Haftung nach dem allgemeinen Deliktsrecht des BGB. Lediglich die konkreten Pflichten, welche verletzt werden, werden aus dem BBergG gezogen.

(1) § 110 BBergG - Anpassungspflicht

Nach § 110 Abs. 1 BBergG muss ein Bauherr bei der Errichtung, Erweiterung oder wesentlichen Veränderung einer baulichen Anlage möglicherweise zu erwartenden bergbaulichen Einwirkungen auf die Oberfläche Rechnung tragen, wenn und soweit durch Gewinnungsbetriebe Beeinträchtigungen der Oberfläche zu befürchten sind, die den vorsorglichen Schutz baulicher Anlagen für Leben, Gesundheit oder bedeutende Sachgüter erforderlich machen. § 110 BBergG zielt somit auf einen vorbeugenden Schutz ab. Bauherr ist dabei derjenige, der den Auftrag zur Veränderung der baulichen Anlage erteilt. Neben dem Eigentümer kann dies auch der Pächter oder Erbbauberech-

⁶³² OLG Zweibrücken, VerSR 2004, 611

⁶³³ Ehrlicke, UPR 2009, 281, 285.

tigte sein.⁶³⁴ Voraussetzung für die Ausführung dieser Pflicht ist ein entsprechendes Verlangen des ausführenden Unternehmens – also z. B. des Bohrunternehmens- an den Bauherrn. Die Anpassungspflicht des Bauherrn bedeutet konkret, dass bestimmte Maßnahmen wie Anpassung von Lage, Stellung oder Konstruktion einer baulichen Anlage ergriffen werden müssen um die oben aufgezeigten Gefahren zu verhindern. Die Anpassungspflicht kann als Verkehrssicherungspflicht im Sinne des § 823 BGB gesehen werden.

Kommt der Bauherr dieser Pflicht nicht nach, verliert er zudem seinen (möglicherweise bestehenden) eigenen Schadensersatzanspruch soweit ihm Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit vorzuwerfen ist, bzw. in den anderen Fällen mindert sich zumindest sein Anspruch nach Maßgabe der §§ 112 S. 3, 118 BBergG, 254 BGB. Auf der anderen Seite hat auch der Unternehmer eine Pflicht zur entsprechenden Anzeige von möglichen Gefahren, die durch Anpassung verhindert werden können.⁶³⁵ Unterlässt er dies, verliert er den Einwand des Mitverschuldens bei Eintritt der Bergschäden beim Bauherrn.

(2) § 111 BBergG - Sicherungsmaßnahmen

Für den Fall, dass ein vorbeugender Schutz baulicher Anlagen nicht ausreicht, um Gefahren für Leben, Gesundheit oder bedeutende Sachgüter abzuwenden stellt § 111 BBergG dann die Pflicht auf, dass Sicherungsmaßnahmen zu ergreifen sind. Sicherungsmaßnahmen werden als die zur Sicherung gegen Bergschäden jeweils erforderlichen zusätzlichen baulichen Vorkehrungen verstanden.⁶³⁶ Parallel zu § 110 BBergG ist die Verkehrssicherungspflicht auch hier zweiseitig zwischen Bauherr und Unternehmer ausgestaltet. Der Unternehmer hat die Pflicht, dem Bauherrn die Notwendigkeit von Sicherungsmaßnahmen anzuzeigen. Anderenfalls kann es zu einer Minderung eines Schadensersatzanspruchs nach §§ 112 S. 3, 118 BBergG, 254 BGB kommen. Der Bauherr wiederum muss Sicherungsmaßnahmen nach Art und Umfang der zu erwartenden Bodenverformungen und nach Bauart, Größe, Form und Bergschadensempfindlichkeit der baulichen Anlage vornehmen.⁶³⁷ Unterlässt er dies, treffen ihn dieselben Rechtsfolgen wie im Falle eines Unterlassens im Rahmen der Anpassungspflicht nach § 110 BBergG.

⁶³⁴ *Boldt/Weller*, Kommentar BBergG, § 110 Rn. 7.

⁶³⁵ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 286.

⁶³⁶ *Boldt/Weller*, Kommentar BBergG, § 111 Rn. 3 ff.

⁶³⁷ *Ehricke*, UPR 2009, 281, 287.

6.2.13.2.5 § 823 Abs. 2 i. V. m. § 909 BGB

Eine Haftung nach § 823 Abs. 2 BGB wird ausgelöst, wenn ein die Schädigung eines Rechtsguts verursachender Verstoß gegen ein Schutzgesetz vorliegt. Schutzgesetz in diesem Sinne ist jedes Gesetz, das den Schutz dieses Rechtsguts sowie seines Inhabers bezweckt.⁶³⁸ Dabei sind Gesetze nicht nur solche im formellen Sinne, sondern jede Rechtsnorm, also z. B. auch Verordnungen und ordnungspolizeiliche Vorschriften.⁶³⁹ Bei einer (oberflächennahen) Geothermie-Bohrung, die zu einem Stützverlust des Nachbargrundstücks führt, kann unter Umständen eine Schadensersatzpflicht aus §§ 823 Abs. 2 i. V. m. 909 BGB gegeben sein. Nach § 909 BGB darf ein Grundstück nicht in der Weise vertieft werden, dass der Boden des Nachbargrundstücks die erforderliche Stütze verliert. § 909 BGB ist Schutzgesetz im Sinne des § 823 Abs. 2 BGB.⁶⁴⁰ Die Bohrung stellt eine Vertiefung eines Grundstücks nach § 909 dar. Ein Stützverlust am Nachbargrundstück ist dann gegeben, wenn der Untergrund absinkt oder in Bewegung gerät oder auch Einsturzgefahr des Grundstücks entsteht.⁶⁴¹ Anspruchsinhaber ist der Eigentümer (oder sonstiger dinglich Berechtigter)⁶⁴² des geschädigten Nachbargrundstücks. Anspruchsgegner ist zum einen der Eigentümer des Grundstücks, welches vertieft wurde. Allerdings muss auch Verschulden vorliegen. Dieses dürfte regelmäßig dann zu verneinen sein, wenn die Bohrung durch ein Fachunternehmen ausgeführt wurde und der Eigentümer die Fachleute sorgfältig ausgewählt und über die Beschaffenheit des Grundstücks informiert hat.⁶⁴³ Daneben haftet aber auch (im Falle des Verschuldens) der ausführende Architekt, bauleitende Ingenieur oder Statiker, welche eine eigenverantwortliche Prüfungspflicht unabhängig von der des Bauherrn haben.⁶⁴⁴

Untergesetzliche Regelwerke von Verbänden etc. stellen, auch wenn sie allgemein anerkannt sind, keine Schutzgesetze im Sinne von § 823 Abs. 2 BGB dar.⁶⁴⁵ Ihre Nichtbeachtung kann somit keine Haftung nach § 823 Abs. 2 BGB i. V. m. dem verletzten Regelwerk begründen. Vielmehr können sie lediglich Verkehrssicherungspflichten

⁶³⁸ Palandt/*Bassenge*, Bürgerliches Gesetzbuch § 823 Rn. 56.

⁶³⁹ Palandt/*Bassenge*, Bürgerliches Gesetzbuch § 823 Rn. 56a.

⁶⁴⁰ BGH BZM 05, 239, Palandt/*Bassenge*, Bürgerliches Gesetzbuch, § 909, Rn. 9.

⁶⁴¹ Palandt/*Bassenge*, Bürgerliches Gesetzbuch, § 909, Rn. 4.

⁶⁴² So z. B. auch der Inhaber eines Nießbrauchs, der Erbbauberechtigte oder der Anwartschaftsberechtigte.

⁶⁴³ BGH NJW 2001, 1865.

⁶⁴⁴ BGH NZM 05, 239.

⁶⁴⁵ Palandt/*Bassenge*, § 832 BGB, Rn.56a.

begründen und damit bei Verstößen eine Haftung nach § 823 Abs. 1 BGB auslösen (s.o.).

6.2.13.2.6 § 909 BGB

Neben dem Schadensersatzanspruch aus § 823 Abs. 2 i. V. m. § 909 BGB ergibt sich aus § 909 BGB ein selbständiger Anspruch des Geschädigten, also des Nachbarn, auf Unterlassung und Beseitigung. Das bedeutet, dass bei Stützverlust des Grundstücks dessen Festigkeit wiederhergestellt werden muss. Die Wahl der konkreten Maßnahme obliegt dabei dem Anspruchsgegner.⁶⁴⁶

6.2.13.2.7 § 831 BGB

Der Bauunternehmer haftet dem Geschädigten für Fehler seiner Angestellten ebenfalls nach § 831 BGB. Diese sind Verrichtungsgehilfen im Sinne der Vorschrift. Verrichtungsgehilfe ist, wem eine Tätigkeit von einem anderen übertragen worden ist, unter dessen Einfluss er allgemein oder im konkreten Fall handelt und zu dem er in einer gewissen Abhängigkeit steht.⁶⁴⁷ Dagegen ist der selbständige Bauunternehmer seinerseits nicht Verrichtungsgehilfe des Bauherrn, da er nicht weisungsgebunden ist und in dem oben beschriebenen Abhängigkeitsverhältnis steht.⁶⁴⁸

Jedoch kann sich der Unternehmer nach § 831 Abs. 1 Satz 2 BGB exkulpieren und einer Haftung entgehen, wenn er darlegt, dass er bei der Auswahl der Angestellten die erforderliche Sorgfalt beobachtet hat.

Der Unterschied zur oben beschriebenen Haftung aus § 823 BGB wegen Verletzung der Auswahl- und Überwachungspflicht als eigener Verkehrssicherungspflicht liegt darin, dass § 831 BGB in prozessualer Hinsicht zwei Vermutungen aufstellt: Zum einen, dass der Bauunternehmer (als Geschäftsherr) seine Pflicht schuldhaft verletzt hat und dass zwischen dieser Pflichtverletzung und dem dem Dritten zugefügten Schaden ein ursächlicher Zusammenhang besteht.⁶⁴⁹ Während im Rahmen des § 823 BGB ein Ge-

⁶⁴⁶ Palandt/*Bassenge*, § 831 BGB, Rn.8.

⁶⁴⁷ BGH NJW 09, 1740, Tz. 11; Palandt/*Sprau*, § 831 BGB, Rn. 5.

⁶⁴⁸ Palandt/*Sprau*, § 831 BGB, Rn. 6.

⁶⁴⁹ Palandt/*Sprau*, § 831 BGB, Rn. 1.

schädigter in einem Prozess die Pflichtverletzung sowie die Kausalität beweisen muss, werden diese bei § 831 vermutet und der Unternehmer muss vielmehr beweisen, dass weder eine Pflichtverletzung noch ein ursächlicher Zusammenhang bestehen.

6.2.13.2.8 Subsidiär § 906 II S. 1 BGB analog

Der sogenannte nachbarrechtliche Gemeinschaftsanspruch schützt Nachbarn von Grundstücken, auf welchen Bauarbeiten - also auch Bohrungen - ausgeführt werden. Im Falle eines Schadens am Nachbargrundstück - und hier ist nicht nur der unmittelbare „Grenznachbar“ umfasst, sondern auch sogenannte „Dritt-Nachbarn“ in der Umgebung - ist der Geschädigte so zu stellen, als hätte der Bauherr keinerlei Bauarbeiten durchführen lassen. Dieser Ausgleichsanspruch ist regelmäßig ausgeschlossen, wenn eine andere gesetzliche Vorschrift den Sachverhalt abschließend regelt und daher subsidiär.⁶⁵⁰ Bedeutung gewinnt diese Anspruchsgrundlage immer dann, wenn kein Verschulden vorliegt, da § 906 Abs. 2 Satz 1 BGB analog verschuldensunabhängig greift.

6.2.13.3 Öffentlich-Rechtliche Haftung

6.2.13.3.1 Bundesbodenschutzgesetz

Das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG) enthält in § 4 sowohl Regelungen zum vorsorgenden Bodenschutz als auch Regelungen zur Sanierung im Falle schädlicher Bodenveränderungen oder Altlasten, mithin Regelungen, wenn schon Schäden in Bezug auf den Boden aufgetreten sind. Allerdings ist das BBodSchG gemäß § 3 Abs. 1 Nr. 10 BBodSchG nicht anwendbar, wenn Vorschriften des BBergG Einwirkungen auf den Boden regeln.⁶⁵¹ Positiv gewendet gilt das BBodSchG immer dann, wenn das Bergrecht Einwirkungen auf den Boden nicht regelt. Da es im Bundesberggesetz keine stoffbezogenen Vorgaben in Bezug auf den Bodenschutz gibt, so, wenn anlässlich der Bergbautätigkeit Schadstoffe in den Boden gelangen und zu einer schädlichen Bodenveränderung i. S. § 2 Abs. 3 BBodSchG führen, ist in solchen Fällen nicht das Berg-

⁶⁵⁰ BGHZ 142, 227, 235 f.

⁶⁵¹ Siehe hierzu Punkt 6.2.6.2.

recht, sondern unmittelbar das Bodenschutzrecht anzuwenden.⁶⁵² Somit ist der Anwendungsbereich des BBodSchG im Falle von schädlichen Bodenveränderungen im Zusammenhang mit Geothermie Projekten nur eröffnet, soweit stoffbezogene Einwirkungen, namentlich schädliche Bodenveränderungen i. S. von § 2 Abs. 3 BBodSchG, vorliegen. Liegt eine solche schädliche Bodenveränderung vor, haben der Verursacher sowie dessen Gesamtrechtsnachfolger, der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück die Pflicht, den Boden sowie durch schädliche Bodenveränderungen oder Altlasten verursachte Verunreinigungen von Gewässern zu sanieren. Die Sanierung hat so zu erfolgen, dass dauerhaft keine Gefahren, erheblichen Nachteile oder erheblichen Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen.

6.2.13.3.2 Umweltschadensgesetz

Durch Inkrafttreten des Umweltschadensgesetzes (USchadG) am 14.11.2007, welches der Umsetzung der *Richtlinie 2004/35/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. April 2004 über Umwelthaftung zur Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden*⁶⁵³ dient, muss der Verursacher eines Umweltschadens diesen auf seine Kosten sanieren. Umweltschäden sind Schädigungen von geschützten Arten und Lebensräumen⁶⁵⁴, Gewässern und dem Boden. Als Maßstab gilt der Erhaltungszustand der Fläche oder Art, d. h. jede Reduzierung an Fläche oder Größe der Population stellt einen Umweltschaden dar. Wird bei einer Geothermie Bohrung daher z. B. das Grundwasser verunreinigt, liegt ein Umweltschaden in diesem Sinne vor. Das USchadG beinhaltet ein öffentlich-rechtliches Haftungsregime zur Gefahrenabwehr und zur Sanierung. So hat der Verantwortliche bei Bestehen der Gefahr eines Umweltschadens unverzüglich Vermeidungsmaßnahmen zu ergreifen, § 5 USchadG. Soweit ein Umweltschaden eingetreten ist, hat er die zur Begrenzung (§ 6 Nr. 1 USchadG) und Sanierung (§ 6 Nr. 2 USchadG) erforderlichen Maßnahmen zu ergreifen. Die zuständige Behörde hat die Pflicht den Verantwortlichen zur Sanierung zu veranlassen. Wenn die Behörde nicht tätig wird oder die Pflichtige den Schaden nur unzureichend saniert, kann jede Privatperson die Behörde zum (erneuten) Handeln auffordern.

⁶⁵² Müggenborg, Abgrenzungsfragen zwischen Bodenschutz- und Bergrecht, NVwZ 2012, 659, 661

⁶⁵³ Siehe ABl. EU 2004, L 143 Seite 56.

⁶⁵⁴ Als geschützt gelten alle Arten und Lebensräume, die in den Anhängen I, II und IV der FFH Richtlinie, bzw. im Anhang I der Vogelrichtlinie aufgeführt sind sowie alle Zugvogelarten.

Nach § 1 USchadG findet das Gesetz allerdings nur Anwendung, „soweit Rechtsvorschriften des Bundes und der Länder die Vermeidung und Sanierung von Umweltschäden nicht näher bestimmen oder in ihren Anforderungen diesem Gesetz nicht entsprechen. Rechtsvorschriften mit weitergehenden Anforderungen bleiben unberührt.“ Das bedeutet, sobald die Fachgesetze in ihren Anforderungen zumindest gleichwertig sind oder sogar über das USchadG hinausgehen, findet ausschließlich das einschlägige Fachrecht Anwendung („Subsidiarität des Umweltschadensgesetzes“).

Der Anwendungsbereich des USchadG wird ferner durch § 3 USchadG bestimmt.

Nach § 3 Abs. 1 USchadG gilt das Gesetz für

1. Umweltschäden und unmittelbare Gefahren solcher Schäden, die durch eine der in Anlage 1 aufgeführten beruflichen Tätigkeiten verursacht werden;
2. Schädigungen von Arten und natürlichen Lebensräumen im Sinn des § 19 Absatz 2 und 3 des Bundesnaturschutzgesetzes und unmittelbare Gefahren solcher Schäden, die durch andere berufliche Tätigkeiten als die in Anlage 1 aufgeführten verursacht werden, sofern der Verantwortliche vorsätzlich oder fahrlässig gehandelt hat.

Anlage 1 des USchadG nennt als berufliche Tätigkeiten u. a.

- „Einbringung, Einleitung und sonstige Einträge von Schadstoffen in das Grundwasser gemäß § 9 Absatz 1 Nummer 4 und Absatz 2 Nummer 2 des Wasserhaushaltsgesetzes, die einer Erlaubnis gemäß § 8 Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes bedürfen.“ (Nr. 4)
- „Entnahmen von Wasser aus Gewässern gemäß § 9 Absatz 1 Nummer 1 und 5 des Wasserhaushaltsgesetzes, die einer Erlaubnis oder Bewilligung gemäß § 8 Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes bedürfen.“ (Nr. 5)
- „Herstellung, Verwendung, Lagerung, Verarbeitung, Abfüllen, Freisetzung in die Umwelt und innerbetriebliche Beförderung von a) gefährlichen Stoffen im Sinn des § 3a Abs. 1 des Chemikaliengesetzes (ChemG); b) gefährlichen Zubereitungen im Sinn des § 3a Abs. 1 ChemG (...)“ (Nr. 7)

In Fällen, in denen der Umweltschaden oder die unmittelbare Gefahr eines solchen Schadens durch eine nicht klar abgegrenzte Verschmutzung verursacht wurde, findet das USchadG gemäß § 3 Abs. 4 USchadG nur Anwendung, wenn ein ursächlicher

Zusammenhang zwischen dem Schaden und den Tätigkeiten einzelner Verantwortlicher festgestellt werden kann.

Da Umweltschäden in diesem Sinne für Geothermie-Projekte wie dargestellt weitgehend durch das WHG oder andere Fachgesetze erfasst werden, wird in der Praxis wenig Raum für die Regelungen des USchadG bestehen.

6.2.13.4 Zwischenergebnis haftungsrechtliche Aspekte

Die praktisch wichtigste Rolle bei potentiellen Schädensereignissen im Bereich der Geothermie spielen insofern § 89 WHG, §§ 823 ff. BGB sowie die bergrechtliche Haftung nach § 114 ff BBergG.

Weiter wird deutlich, dass die Haftungs- und Sanierungsvorschriften vielfältig und miteinander schlecht überschaubar sind. Dies liegt an andersgearteten Tatbestandsalternativen, Subsidiaritätsklauseln und Anwendungsbereichen sowie einer Haftung nach sowohl verschiedenen zivilrechtlichen als auch öffentlich-rechtlichen Vorschriften. Die Tabelle 6.1 enthält eine Übersicht über die dargestellten zivilrechtlichen und öffentlich-rechtlichen Haftungstatbestände.

Als Schadensereignisse sind bislang nur Sachschäden an Gebäuden aufgrund von Bodenhebungen, Bodenabsenkungen sowie Bodenschwingungen (Erschütterungen aufgrund seismischer Ereignisse) aufgetreten. Die Ursachen für die Schadensereignisse im Bereich der oberflächennahen Geothermie und der Tiefengeothermie sind hierbei unterschiedlich.

Das im BBergG verankerte Bergbauschadensrecht sollte systematisch auf die Gewinnung von Bodenschätzen durch Tiefbohrungen erweitert werden. Durch die Ausdehnung der Bergschadensvermutung des § 120 BBergG auf diese Tätigkeiten würde bei Schäden, die mit seismischen Ereignissen in Verbindung gebracht werden, eine Beweislastumkehr bewirkt: Der Betreiber müsste zukünftig nachweisen, dass Schäden seinen Aktivitäten nicht zuzurechnen sind. Hierdurch würde Betroffenen eine höhere Rechtssicherheit gegeben und deren Rechtsposition gestärkt werden. Gleichzeitig könnte damit auch mehr Akzeptanz in der breiten Öffentlichkeit für den auch aufgrund der umstrittenen Fracking-Technologie zur Förderung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Kritik geratenen Bohrlochbergbau erreicht werden.

Mittlerweile bieten einige Versicherer spezielle Versicherungen für Geothermieprojekte an. Neben Fündigkeitsversicherungen und bohrtechnischen Versicherungen gibt es auch spezielle Haftpflichtversicherungen für technische Anlagen, die im Fall von Geothermieanlagen auch eine Versicherung für die Inanspruchnahme für Schäden aus induzierter Seismizität beinhalten.

Nach § 56 Abs. 2 BBergG kann die zuständige Behörde die Zulassung eines Betriebsplanes von der Leistung einer Sicherheit abhängig machen, soweit diese erforderlich ist, um die Erfüllung der in § 55 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 bis 13 und Abs. 2 BBergG genannten Voraussetzungen zu sichern. Der Nachweis einer entsprechenden Versicherung des Unternehmers mit einem im Geltungsbereich dieses Gesetzes zum Geschäftsbetrieb zugelassenen Versicherer darf von der zuständigen Behörde als Sicherheitsleistung nur abgelehnt werden, wenn die Deckungssumme nicht angemessen ist. Über die Freigabe einer gestellten Sicherheit entscheidet die zuständige Behörde. Somit darf die Sicherheitsleistung nur zur Sicherung der Erfüllung der Zulassungsvoraussetzungen verlangt werden, nicht dagegen zur Sicherung privatrechtlicher Schadensersatzansprüche.⁶⁵⁵ In Konsequenz der Rechtsprechung zur Anwendung des § 48 Abs. 2 Satz 1 BBergG⁶⁵⁶ im Betriebsplanverfahren ist § 56 Abs. 2 BBergG aber insofern zu ergänzen, dass Sicherheitsleistungen auch zur Erfüllung überwiegender öffentlicher Interessen, die im Betriebsplanverfahren zu prüfen sind, verlangt werden können.⁶⁵⁷ Gleichzeitig ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Stellung der Sicherheit für den Unternehmer im Einzelfall erhebliche Kosten verursachen kann. Insofern gilt auch hier selbstverständlich der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit.

⁶⁵⁵ Vgl. *Pienschulte/Graf Vitzthum*, Bundesberggesetz, § 56 Rn. 258.

⁶⁵⁶ Siehe hierzu Punkt 6.2.5.2.

⁶⁵⁷ Vgl. *Pienschulte/Graf Vitzthum*, Bundesberggesetz, § 56 Rn. 262.

Tab. 6.1 Übersicht über zivilrechtliche und öffentlich-rechtliche Haftungstatbestände

| Haf- tungs- normen | Rechts- natur | Ersatzpflichtige | Art der Haftung | Ersatz- berechtigter/ Anspruchsteller | Voraussetzung | Rechtsfolge | Bemerkung |
|--|---------------------|---|---|---|--|---|---|
| § 89 Abs.1 WHG | Zivilrecht- lich | Handelnder (falls mehrere als Gesamt- schuldner) | Verhaltensbezogen (ver- schuldensunabhängig) | Wer durch die Veränderung einen Schaden erleidet | Rechtswidrige Rechtsgutsverlet- zung, umstritten bei höherer Gewalt | SEA in unbeschränkter Höhe, auch reiner Vermögensschaden – i. d. R. Sanierungs- maßnahmen | Verschmutzung des Grundwassers durch Einleitung von Schadstoffen |
| § 89 Abs. 2 WHG | Zivilrecht- lich | Anlagebetreiber (falls mehrere als Gesamt- schuldner) | Anlagenbezogene (ver- schuldensunabhängige) Gefährdungshaftung | Wer durch die Veränderung eine Schaden erleidet | keine höhere Gewalt, Schaden nicht bei Niederbringung der Bohrung aufgetreten | SEA in unbeschränkter Höhe, auch reiner Vermögensschaden – i. d. R. Sanierungs- maßnahmen | Verschmutzung des Grundwassers durch Austritt von Schadstoffen |
| § 823 Abs. 1 BGB | Zivilrecht- lich | Täter der rechtsguts- verletzende Handlung | Verschuldenshaftung | Inhaber des ver- letzten Rechtsguts | Verletzung eines besonders geschütz- ten Rechtsguts | SEA gem. §§ 249 ff BGB, ergänzt von §§ 842-846 und 848-851 BGB | |
| § 823 Abs. 2 BGB i. V. m. § 909 BGB | Zivilrecht- lich | Gegenwärtiger u. früherer Eigentümer/ Besitzer; Statiker, Bauunternehmer, Architekt | i. d. R. Verschuldenshaf- tung, unter besonderen Voraussetzungen auch verschuldensunabhängig | Nachbar | Vertiefung durch die Nachbargrundstück Stütze verliert | SEA gem. §§ 249 ff BGB, ergänzt von §§ 842-846 und 848-851 BGB | |

| Haf- tungs- normen | Rechts- natur | Ersatzpflichtige | Art der Haftung | Ersatz- berechtigter/ Anspruchsteller | Voraussetzung | Rechtsfolge | Bemerkung |
|--------------------------|--------------------------|--|---|---|--|---|--|
| § 114 ff BBergG | Zivilrecht- lich | Unternehmer (Bau- herr bzw. Träger des Geothermievorha- bens) | verschuldensunabhängig | Wer durch Berg- schaden Vermö- gensnachteil erlit- ten hat | Bergschaden i. S.v. § 114 Abs. 1 BBergG | In Höhe begrenzter SEA, gem. § 117 Abs. 1 nach den Vorschrif- ten des BGB über die Verpflichtung zum Ersatz des Schadens im Falle einer uner- laubten Handlung (s.o.) | gesetzliche Vor- schriften bleiben unberührt, nach denen für einen Schaden im Sinne des § 114 in weite- rem Umfang als nach den Vorschrif- ten dieses Ab- schnitts gehaftet wird oder nach denen ein anderer für den Schaden verantwortlich ist |
| § 4 Abs. 3 BBodSchG | Öffentlich- rechtlich | Verursacher, Eigen- tümer, Besitzer | verschuldensunabhängig | Behörde | Schädliche Boden- veränderungen be- reits eingetreten | Sanierungspflicht | tritt hinter BBergG zurück, soweit dieses eine ein- schlägige Rege- lung enthält |
| § 6 Nr.2 USchadG | Öffentlich- rechtlich | Verursacher | Verschuldenshaftung, z. T. auch verschuldensabhän- gige Haftung | Behörde | Umweltschaden | Sanierungspflicht | in der Praxis weit- gehend verdrängt durch WHG und BBergG |
| § 1 Um- weltHG | Zivilrecht- lich | Inhaber der Anlage | Anlagenbezogene (ver- schuldensunabhängige) Gefährdungshaftung | Geschädigter | Durch von Anlage ausgehende Um- welteinwirkung Tö- tung o. Verletzung eines Menschen oder Beschädigung einer Sache | Ersatz des entstan- denen Schadens | Anwendungsbe- reich nicht eröffnet, auch andernfalls lediglich subsidiär anzuwenden |

6.3 Energiewirtschaftsrechtliche und umweltpolitische Förderprogramme

Um die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern, deren Verbrauch für den größten Teil des weltweiten CO₂-Ausstoßes sorgt, zu reduzieren, werden seit nunmehr über 20 Jahren in der Bundesrepublik Deutschland erneuerbare Energien durch das *Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz* (Stromeinspeisungsgesetz – StromEinspG), in Kraft getreten am 1. Januar 1991, bzw. durch dessen Nachfolgegesetz, das *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien* (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG), Inkrafttreten der ursprünglichen Fassung am 1. April 2000, gefördert. Seit Inkrafttreten des Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz (EEWärmeG) am 1. Januar 2009 wird zudem die Erzeugung und Nutzung von Wärme aus erneuerbaren Energien gefördert.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene (Bund/Länder) werden entsprechende Zielwerte und Ausbaupfade für den Anteil von erneuerbaren Energien am Strom- und Wärmemarkt vorgegeben. Die Tab. 6.2. stellt die Zielwerte für erneuerbare Energien mit Stand 31.10.2013 dar.

Wie für die anderen erneuerbaren Energien (Wasserkraft, Windenergie, solare Strahlungsenergie, Energie aus Biomasse), gibt es für Projekte der (Tiefen-)Geothermie in Deutschland mittlerweile diverse Förderungsmöglichkeiten. Ein Großteil dieser Förderungen stammt vom Bund, wobei hier neben der Förderung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), das Erneuerbare-Energien-WärmeGesetz (EEWärmeG) und das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) insbesondere das Marktanreizprogramm (MAP) und die Forschungsförderung zu nennen sind. Ferner wird der Bau von Wärmenetzen gefördert.

Auch die Bundesländer haben eigene Förderungsprogramme entwickelt, wobei diese zum Teil allgemein den Ausbau erneuerbarer Energien und zum Teil speziell die Weiterentwicklung der Geothermie unterstützen. Zusätzlich verzichtet die Mehrheit der Länder zumindest zeitweilig auf das Erheben einer Förderabgabe für Erdwärme.

Tab. 6.2 Zielwerte Erneuerbare Energien (Stand: Oktober 2013)

| Vorgaben der EU | Vorgaben des Bundes | Vorgaben der Länder |
|--|---|--|
| <p><u>RICHTLINIE 2009/28/EG</u></p> <p>Bis 2020 sind mindestens 20 % des Bruttoendenergieverbrauchs der Gemeinschaft durch Energie aus erneuerbaren Quellen zu decken (vgl. Art. 3 Abs. 1).</p> <p>Zielwert Deutschlands für den Anteil von Energie aus erneuerbaren Quellen am Bruttoendenergieverbrauch im Jahr 2020: 18 % (vgl. Anhang I).</p> | <p><u>Energiekonzept des Bundes (2010)</u></p> <p>Bruttoendenergieverbrauch</p> <p>Bis 2020 soll der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch 18 % betragen.</p> <p>Danach strebt die Bundesregierung folgende Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien am Bruttoendenergieverbrauch an: 30 % bis 2030, 45 % bis 2040, 60 % bis 2050.</p> <p>Bruttostromverbrauch</p> <p>Bis 2020 soll der Anteil der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch 35 % betragen.</p> <p>Danach strebt die Bundesregierung folgende Entwicklung des Anteils der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch an: 50% bis 2030, 65% bis 2040, 80% bis 2050.</p> | <p>Alle 16 Bundesländer haben sich spezifische Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien gesetzt.</p> |
| | <p><u>Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG)</u></p> <p>Der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromversorgung soll erhöht werden auf 35 % bis 2020, 50 % bis 2030, 65 % bis 2040 und 80 % bis 2050.</p> | |
| | <p><u>Erneuerbare-Energien-Wärme-gesetz (EEWärmeG)</u></p> <p>Der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte bis zum Jahr 2020 auf 14 % zu erhöhen</p> | |

6.3.1 Marktanreizprogramm

Ziel des Marktanreizprogramms ist es, den Anteil erneuerbarer Energien am Wärmeenergiemarkt steigern. Im Rahmen des KfW-Programms Erneuerbare Energien „Premium“⁶⁵⁸ werden unter anderem Anlagen zur Erschließung und Nutzung der Tiefenge-

⁶⁵⁸ Für Details siehe Merkblatt der KfW, Stand 5/13, [https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf), abgerufen am 13.01.2013.

othermie gefördert. Mit dem Förderprogramm können, auch wenn der Antragsteller nicht zum Vorsteuerabzug berechtigt ist, bis zu 80 % der förderfähigen Nettoinvestitionskosten ohne Mehrwertsteuer finanziert werden. Der Kredithöchstbetrag beträgt in der Regel maximal 10 Mio. EUR Kreditbetrag pro Vorhaben.

6.3.1.1 Tilgungszuschüsse

Im Rahmen des KfW-Programms sind verschiedene Tilgungszuschüsse vorgesehen. Innerhalb des Förderungsprogramms ist zu unterscheiden zwischen Tiefengeothermie-Vorhaben für die ausschließliche Wärmeenergieerzeugung oder einem Strom-Wärme-Verhältnis von im Durchschnitt maximal $0,15 \text{ kW}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{th}}$ und Tiefengeothermie-Vorhaben mit einem Strom-Wärme-Verhältnis im Durchschnitt mehr als $0,15 \text{ kW}_{\text{el}}/\text{kW}_{\text{th}}$ oder mit ausschließlicher Stromerzeugung. Erstere werden mit den drei Förderbausteinen „Anlagenförderung“, „Bohrkostenförderung“ und „Mehraufwendungen“ gefördert, während für letztere nur die Förderbausteine „Bohrkostenförderung“ und „Mehraufwendungen“ in Anspruch genommen werden können.

6.3.1.1.1 Anlagenförderung

Der Tilgungszuschuss beträgt 200 EUR je kW errichteter bzw. erweiterter Nennwärmeleistung, höchstens jedoch 2 Mio. EUR je Einzelanlage.

6.3.1.1.2 Bohrkostenförderung

Förderfähig sind sowohl notwendige Bohrungen für die Errichtung tiefer Erdwärmesonden mit einem geschlossenen Primärkreislauf (höchstens 2,5 Mio. EUR) als auch Dubletten oder Tripletten. Erkundungsbohrungen werden nicht gefördert.

Tab. 6.3 Übersicht zur Bohrkostenförderung

| Bohrtiefe unter Geländeoberkannte in Meter | Gewährter Tilgungszuschuss in EUR je Meter vertikaler Tiefe (nicht Bohrstrecke) |
|---|--|
| 400 – 1.000 | 375 |
| 1.000 – 2.500 | 500 |
| ab 2.500 | 750, höchstens 2,5 Mio. je Bohrung; max. 5 Mio. für Gesamtprojekt |

6.3.1.1.3 Mehraufwendungen

Die Förderung beträgt maximal 50 % des nachgewiesenen (und von der KfW im Rahmen eines bestimmten Bewertungsverfahrens akzeptierten) Mehraufwands pro Bohrung (Nettokosten), höchstens jedoch 50 % der ursprünglichen Plankosten und maximal 1,25 Mio. EUR pro Bohrung.

6.3.1.2 Kombinationsmöglichkeiten

Die Kombination einer Finanzierung der aus dem KfW-Programm Erneuerbare Energien "Premium" geförderten Anlagen mit anderen KfW- oder ERP-Programmen ist nicht möglich (Ausnahme: „Fündigkeitsrisiko Tiefengeothermie" hier erfolgt Förderung über ein gesondertes Darlehensprogramm, s. u.). Ausgeschlossen ist auch die Kombination eines Kredites aus Erneuerbare Energien "Premium" mit einem Kredit aus dem Erneuerbare Energien "Standard" für dieselbe Investitionsmaßnahme (Ausnahme: Tiefengeothermie zur Stromerzeugung oder zur kombinierten Wärme- und Stromerzeugung). Die Kombination eines Kredites aus diesem Programm mit anderen, nicht im vorhergehenden Absatz genannten Fördermitteln ist möglich, sofern die Summe aus Krediten, Zulagen oder Zuschüssen die Summe der Aufwendungen nicht übersteigt und die zulässigen Beihilfeobergrenzen eingehalten werden. Bei Tiefengeothermie darf der Anteil der öffentlichen Mittel maximal 80 % der förderfähigen Nettoinvestitionskosten betragen. Eine parallele Beantragung von ERP- oder KfW-Krediten für andere Investitionsmaßnahmen ist möglich.

6.3.1.3 Mitfinanzierung des Fündigkeitsrisikos

Wie bereits dargestellt, garantiert das EEG bei erfolgreich umgesetzten Projekten eine feste Vergütung und trägt damit zur Planungssicherheit bei. Voraussetzung für die Nutzung des EEG ist allerdings eine erfolgreiche Realisierung des jeweiligen Projektes. Sind Bohrungen nicht erfolgreich, muss im Extremfall die gesamte Investition für die Projektvorbereitung und die Bohrung abgeschrieben werden. Um dieses „Fündigkeitsrisiko“ abzumildern werden im Rahmen des Marktanreizprogramms Bohrkosten mitfi-

nanziert.⁶⁵⁹ Förderfähige Kosten sind nur die Bohrkosten, die zur ordnungsgemäßen Fertigstellung der jeweiligen Tiefbohrung notwendig sind. Hierzu gehören auch die geplanten Investitionskosten für die mit der KfW abgestimmten Stimulationsmaßnahmen.⁶⁶⁰ Mitfinanziert werden grundsätzlich nur Bohrprojekte mit mindestens zwei Tiefbohrungen (Förder- und Injektionsbohrung), die zu einem Primärkreislauf zusammengeschlossen werden.

Nicht mitfinanziert werden Einzelbohrungen, Vorkosten sowie tatsächlich eingetretene Mehraufwendungen gegenüber der Planung bei Tiefbohrungen mit besonderen technischen Bohrrisiken bis zum Erreichen des Zielhorizonts.

Der Finanzierungsanteil beträgt bis zu 80 % der förderfähigen Bohrkosten inklusive der geplanten Investitionskosten für Stimulationsmaßnahmen (zuzüglich Disagio des Darlehens). Der Kreditbetrag liegt in der Regel bei max. 16 Mio. EUR pro Bohrprojekt.

6.3.1.4 Förderung von Wärmenetzen

Ebenfalls gefördert wird der Bau von Wärmenetzen, die zumindest zu 50 % mit Wärme aus erneuerbaren Energien gespeist werden und im Mittel über das gesamte Netz einen Mindestwärmeabsatz von 500 kWh pro Jahr und Meter Trasse haben. Sofern Wärme aus Tiefengeothermieanlagen eingespeist wird, wird ein Tilgungszuschuss von 60 EUR je neu errichtetem Meter gewährt, jedoch nur bis zu einem Förderhöchstbetrag von 1,5 Mio. EUR. Zudem können Hausübergabestationen mit jeweils bis zu 1.800 EUR gefördert werden, wenn die Investitionen vom Investor und Betreiber des Wärmenetzes durchgeführt werden und kein kommunaler Anschlusszwang besteht.⁶⁶¹

6.3.2 Forschungsförderung durch den Bund

Die Ausgaben für die Energieforschung sind in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen und betragen 2012 rund 707 Mio. EUR. Aus dem von der Bundesregierung als

⁶⁵⁹ [https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/140761-Merkblatt-Fündigkeitsrisiko-Tiefengeothermie-228.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/140761-Merkblatt-Fündigkeitsrisiko-Tiefengeothermie-228.pdf).

⁶⁶⁰ Entsprechend der Anlage Projektstudie ([https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/140752-Merkblatt-Anlage-Fündigkeitsrisiko-228.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/140752-Merkblatt-Anlage-Fündigkeitsrisiko-228.pdf)).

⁶⁶¹ [https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-\(Inlandsförderung\)/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf](https://www.kfw.de/Download-Center/Förderprogramme-(Inlandsförderung)/PDF-Dokumente/6000002410-Merkblatt-271-281-272-282.pdf).

Unterrichtung (BT-Drs. 17/14510) vorgelegten „Bundesbericht Energieforschung 2013“ geht hervor, dass diese Ausgaben 2006 bei knapp 400 Mio. EUR lagen. Mit rund 260 Mio. EUR floss 2012 der größte Teil der Mittel in die Forschung zu erneuerbaren Energien ab. In dem Bericht bekräftigt die Bundesregierung ihr Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2050 um 80 bis 95 Prozent zu senken und den Primärenergieverbrauch zu halbieren.

Ziel der ressortbezogenen Forschungsförderung des Bundesumweltministeriums (BMU) im Bereich der Geothermie ist es, die in der Erde gespeicherte Energie perspektivisch wirtschaftlich für die Strom- und Wärmeerzeugung nutzbar zu machen. Das BMU sieht einen hohen Bedarf an Forschung und Entwicklung sowie an Demonstrationsprojekten und hat in den Jahren 2004 bis 2008 Projekte mit einem Volumen von über 60 Mio. EUR bewilligt. Schwerpunkte waren neben der Förderung von Demonstrationsprojekten die Entwicklung von Tiefbohranlagen und Pumpen sowie Projekte zur Verbesserung der Datenbasis im tiefen Untergrund.⁶⁶²

Der Etat des BMU zur Forschungsförderung für erneuerbare Energien betrug im Jahr 2010 knapp 120 Millionen EUR und wurde 2011 auf 128 Millionen EUR aufgestockt.⁶⁶³

Der aktuelle Stand ergibt sich aus der Förderbekanntmachung des BMU im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms, in Kraft getreten am 1.9.2011.⁶⁶⁴ Schwerpunktmäßig wird die spezifische Technologieentwicklung im Bereich der erneuerbaren Energien gefördert. Daneben stehen Projekte zur Verringerung des Fündigkeits- und Erfolgsrisikos und zur Erhöhung der Akzeptanz in der Bevölkerung im Vordergrund. Dabei differiert die Förderung durch das BMU je nach Stadium des geförderten Projekts.

In der Planungs- und Explorationsphase von Geothermie-Projekten fördert das BMU insbesondere die Sammlung und Aufbereitung geologischer, mineralogischer, geo- und petrophysikalischer, geochemischer sowie mikrobiologischer Daten sowie die Entwick-

⁶⁶² Bericht der BReg über ein Konzept zur Förderung, Entwicklung und Markteinführung von geothermischer Stromerzeugung und Wärmenutzung, abzurufen unter http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_geothermie_bf.pdf, zuletzt abgerufen am 12.09.2013.

⁶⁶³ <http://www.geothermie-nachrichten.de/bund-erhoeht-forschungsfoerderung-fuer-energie>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁶⁴ Abzurufen unter http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_13122011_KI11154603022.htm#Seitenanfang, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

lung von Methoden, Verfahren und Entscheidungshilfen, die helfen, das Erfolgsrisiko zu verringern.

In der Bohr-/Errichtungs-/Bauphase sowie der Technologieentwicklung werden insbesondere die Weiterentwicklung der Bohrtechnologie, d. h. die Entwicklung und Optimierung von Anlagen und Messgeräten, die ausreichend hitze-, druck- und korrosionsbeständig sind, um den typischen geothermischen Bedingungen zu genügen, gefördert.

In der Test und Betriebsphase fördert das BMU unter anderem die Entwicklung von Monitoring-Systemen, um die gesamte Geothermie-Anlage inklusive einzelner Komponenten technisch zu überwachen, sowie Untersuchungen zur Auswirkung des Betriebs geothermischer Anlagen auf das Grundwasser.

Zuwendungen im Wege der Projektförderung werden als nicht rückzahlbare Zuschüsse gewährt. Bemessungsgrundlage für Zuwendungen an Unternehmen der gewerblichen Wirtschaft sind die zuwendungsfähigen projektbezogenen Kosten. In der Regel können diese – je nach Anwendungsnähe des Vorhabens – mit bis zu 50 % anteilig finanziert werden. Skizzen für entsprechend geplante Forschungsprojekte bzw. formelle Förderanträge auf Basis dieser Bekanntmachung können bis zum 31. Dezember 2014 beim Projektträger Jülich eingereicht werden.

Ein Ausblick auf die Gestaltung zukünftiger Förderungen im 7. Energieforschungsprogramm war zum Zeitpunkt der Berichtserstellung noch nicht möglich.

6.3.3 Förderprogramme der Länder

Mehrere Länder haben selbst Programme zur Unterstützung von Geothermie-Projekten eingeführt. In diesem Rahmen werden finanzielle Stützen für konkrete Vorhaben gewährt sowie auch Forschungs- und Entwicklungsprojekte durch Zuschüsse gefördert.⁶⁶⁵ Einige der hier aufgeführten Fördermaßnahmen laufen jedoch nur noch bis zum 31.12.2013. In diesen Fällen ist über eventuelle Folgemaßnahmen noch nichts bekannt.

⁶⁶⁵ Vgl. http://kommunen.klimaschutz.de/no_cache/foerderung/laenderfoerderung.html .

Die Mehrzahl der Länder verzichtet auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme auf der Grundlage von § 31 BBergG oder hat dies zumindest in der Vergangenheit getan.

6.3.3.1 Baden-Württemberg

Baden-Württemberg verzichtet in der Zeit vom 1. Januar 1987 bis zum 31. Dezember 2014 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁶⁶

6.3.3.2 Bayern

Bayern fördert speziell den verstärkten Ausbau von Tiefengeothermie-Wärmenetzen. Förderfähig sind die Investitionskosten für die Errichtung oder Erweiterung eines Wärmenetzes (einschließlich Hauptanbindungsleitung und Hausübergabestationen und Hausanschlussleitungen abzüglich Baukostenzuschüsse und Anschlusskostenbeiträge), sofern überwiegend Wärme aus Tiefengeothermie-Anlagen in das Wärmenetz eingespeist wird. Die Förderung erfolgt wahlweise in Form eines Zuschusses oder eines zinsverbilligten Darlehens. Der Finanzierungsanteil beträgt bei Kreditbeträgen bis zu 50% der förderfähigen Kosten. Die Darlehensobergrenze liegt bei 10 Mio. EUR. (für Details siehe „Richtlinien zur Durchführung des Bayerischen Programms zum verstärkten Ausbau von Tiefengeothermie-Wärmenetzen“ (Richtlinien Geothermie-Wärmenetze – BayGW)⁶⁶⁷

Zusätzliche Forschungsförderung erfolgt auch im Rahmen des Bayerischen Programms „Rationellere Energiegewinnung und -verwendung“. Es bezuschusst die Erforschung, Entwicklung und Anwendung neuer Energie- und Energieeinspartetechnologien sowie die Durchführung von Studien. Für 2012 bis 2016 stellt das Bayerische Wirtschaftsministerium zusätzlich zum regulären Haushalt rund 50 Millionen EUR zur Verfügung. (für Details siehe „Richtlinien zur Förderung innovativer Energietechnologien und der Energieeffizienz (BayINVENT)“)⁶⁶⁸

⁶⁶⁶ § 21 der Verordnung des Umweltministeriums über Feldes- und Förderabgabe (FFVO), abzurufen unter <http://www.landesrecht-bw.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁶⁷ Abzurufen unter <http://www.stmwivt.bayern.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁶⁸ Abzurufen unter <http://www.stmwivt.bayern.de>, zuletzt abgerufen am 12.09.2013.

Bayern hat für die Zeit vom 1. Januar 1999 bis zum 31. Dezember 2005 von der Erhebung einer Förderabgabe für Erdwärme abgesehen.⁶⁶⁹

6.3.3.3 Brandenburg

Brandenburg fördert Investitionen in Tiefengeothermie-Anlagen in Form von Zuschüssen. Die Höhe des Zuschusses beträgt bei Unternehmen bis zu 50 % der zuwendungsfähigen Ausgaben. Bei Maßnahmen, die im Fördergebiet Brandenburg-Südwest durchgeführt werden, reduziert sich der maximale Zuschuss auf 40 %, wenn eine Bewilligung nach dem 31. Dezember 2010 erfolgt. Die Höhe der Förderung beträgt bei Nichtunternehmen bis zu 75 % der förderfähigen Ausgaben. Die maximale Förder-summe liegt bei 2 Mio. EUR.⁶⁷⁰ Die Richtlinie gilt bis zum 31. Dezember 2013.

Brandenburg verzichtet für die Zeit vom 1. Januar 2006 bis zum 31. Dezember 2015 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁷¹

6.3.3.4 Bremen

Bremen verzichtet in der Zeit vom 30. Mai 2012 bis zum 31. Dezember 2015 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁷²

6.3.3.5 Hamburg

Hamburg verzichtet in der Zeit vom 1. Januar 2012 bis zum 31. Dezember 2014 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁷³

⁶⁶⁹ Siehe § 13 der Verordnung über Feldes- und Förderabgaben, abzurufen unter <http://www.gesetze-bayern.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁷⁰ Für Details siehe „Richtlinie zur Förderung des Einsatzes Erneuerbarer Energien, von Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz und der Versorgungssicherheit im Rahmen der Umsetzung der Energiestrategie des Landes Brandenburg (RENplus)“ abzurufen unter http://www.bravors.brandenburg.de/sixcms/detail.php?qsid=land_bb_bravors_01.c.49401.de, zuletzt abgerufen am 15.09.2013.

⁶⁷¹ § 13 Verordnung über die Feldes- und Förderabgabe im Land Brandenburg (BbgFördAV), abzurufen unter <http://www.bravors.brandenburg.de/>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁷² § 21 Feldes- und Förderabgabenverordnung, abzurufen unter http://www.umwelt-online.de/recht/berg/hh/ffabg_ges.htm, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁷³ § 19 der Verordnung über Feldes- und Förderabgabe, abzurufen unter <http://www.landesrecht-hamburg.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

6.3.3.6 Hessen

In Hessen wird die Landesförderung vom Abschluss einer Versicherung zur Übernahme der mit der Bohrung verbundenen technischen und wirtschaftlichen Risiken abhängig gemacht und in Form eines Zuschusses zur Versicherungsprämie gewährt. Der Zuschuss kann bis zu 40 % der zuwendungsfähigen Ausgaben für die Versicherung des Bohr- und Fündigkeitsrisikos betragen, wobei ein Höchstbetrag von 500.000 EUR je Einzelvorhaben festgelegt ist.⁶⁷⁴

Hessen erhebt für Erdwärme keine Förderabgabe nach dem Bundesberggesetz.⁶⁷⁵

6.3.3.7 Mecklenburg-Vorpommern

Mecklenburg Vorpommern unterstützt die Finanzierung von u. a. innovativen Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien, inklusive der Geothermie sowie Infrastrukturmaßnahmen im Bereich der erneuerbaren Energien. Die Förderung erfolgt in Form eines Zuschusses und beträgt in der Regel höchstens 30% der zuwendungsfähigen Ausgaben. Bei besonders innovativen oder wirksamen Vorhaben oder Maßnahmen mit besonderem Multiplikator-Effekt kann im Ausnahmefall eine höhere Förderquote gewährt werden (für Details siehe „Richtlinie für die Gewährung von Zuwendungen des Landes Mecklenburg-Vorpommern zur Umsetzung des Aktionsplans Klimaschutz (Klimaschutz-Förderrichtlinie)“⁶⁷⁶). Die Richtlinie gilt bis zum 31. Dezember 2013.

Mecklenburg-Vorpommern hat für die Zeit vom 1. Januar 2002 bis zum 31. Dezember 2011 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme verzichtet.⁶⁷⁷

⁶⁷⁴ Details zu diesem Förderangebot: siehe Energiebericht 2006 der Landesregierung, Band „Aktivitäten der Landesregierung, Anhang 1 Seite 140/141, Stand August 2010, <http://www.hlug.de>, abgerufen am 10.9.2013.

⁶⁷⁵ § 33 der Hessischen Verordnung über Feldes- und Förderabgaben (FVO), abzurufen unter <http://www.landesrecht-hessen.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁷⁶ abzurufen unter <http://www.service.m-v.de/>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁷⁷ § 21 der Verordnung über die Feldes- und Förderabgaben (FördAVO), abzurufen unter <http://www.landesrecht-mv.de/>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

6.3.3.8 Niedersachsen

Seit dem Jahr 2012 fördert das Land erstmals geothermische Pilotprojekte. Dabei waren die verfügbaren Gelder auf eine Million EUR begrenzt. Voraussetzung für eine Förderung war die positive Projektbewertung durch eine Vorstudie. Gefördert werden konnte ein Projekt mit bis zu 90 Prozent der als förderfähig anerkannten Projektausgaben beziehungsweise mit maximal 250.000 EUR. Der Bewilligungszeitraum beträgt maximal zwei Jahre (für Details siehe „Merkblatt zur Erstellung von Machbarkeitsstudien für Tiefengeothermie-Projekte“ des Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie“).⁶⁷⁸

Zusätzlich fördert Niedersachsen im Rahmen seines Investitionsförderungsprogramms Vorhaben der industriellen Forschung und experimentellen Entwicklung, die auf neue oder erheblich verbesserte vermarktbare Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen zielen oder der Steigerung der Effizienz bei der Energieerzeugung und -nutzung sowie der Energieeinsparung dienen. Grundsätzlich sind hier auch Projekte der Geothermie förderungsfähig. Es können Zuschüsse von 25-45 Prozent der förderungsfähigen Ausgaben gewährt werden (für Details siehe „Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen im Rahmen des Niedersächsischen Innovationsförderprogramms“).⁶⁷⁹

Niedersachsen verzichtet in der Zeit vom 1. Januar 2011 bis zum 31. Dezember 2015 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁸⁰

6.3.3.9 Nordrhein-Westfalen

In Nordrhein-Westfalen werden Ausgaben und projektbezogene Gemeinkosten für Vorhaben der "industriellen Forschung" und "experimentellen Entwicklung" (Themenfelder u. a. Geothermie) gefördert. Die Förderung erfolgt in Form einer Anteilfinanzierung (als verlorener Zuschuss, als bedingt rückzahlbarer Zuschuss oder als rückzahlbarer Zuschuss). Die *Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen aus dem*

⁶⁷⁸ Abzurufen unter <http://www.lbeg.niedersachsen.de>, zuletzt abgerufen am 11.09.2013; <http://www.tiefengeothermie.de/news/meilenstein-foerderung-fuer-machbarkeitsstudien-in-niedersachsen>, zuletzt abgerufen am 11.09.2013.

⁶⁷⁹ Abzurufen unter <http://www.foerderdatenbank.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁸⁰ § 21 der Niedersächsischen Verordnung über die Feldes- und die Förderabgabe (NFördAVO), abzurufen unter <http://www.nds-voris.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

„Programm für rationelle Energieverwendung, regenerative Energien und Energiesparen – progres.nrw – Programmbereich Innovation“⁶⁸¹ tritt am 31. Dezember 2013 außer Kraft. Über mögliche Nachfolgeregelungen war zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichts noch nichts bekannt.

Zudem werden Investitionen in Anlagen zur Energieerzeugung, -speicherung und -verteilung in NRW durch die Gewährung zinsgünstiger Darlehen gefördert. Dabei werden der Erwerb von Grundstücken und Gebäuden, gewerbliche Baukosten, Anschaffung von Einrichtungen und Maschinen sowie Betriebs- und Geschäftsausstattung mitfinanziert. Förderungsfähig sind dabei nur Anlagen, die für öffentliche Zwecke vorgesehen sind bzw. deren erzeugte Energie überwiegend in öffentliche Netze eingespeist werden soll (für Details siehe NRW.BANK.Energieinfrastruktur)⁶⁸².

Nordrhein Westfalen verzichtet voraussichtlich bis zum 31. Dezember 2014 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁸³

6.3.3.10 Rheinland Pfalz

Rheinland Pfalz gewährt keine eigenen Zuschüsse für Projekte der Geothermie. Die Nutzung von Erdwärme wird jedoch durch die Förderung anwendungsnaher Forschung und Entwicklung und durch die Datenbereitstellung beim Landesamt für Geologie und Bergbau gefördert.⁶⁸⁴

Rheinland Pfalz verzichtet bis mindestens zum 31. Dezember 2014 auf das Erheben einer Förderabgabe für Erdwärme. Diese Regelung verlängert sich jeweils um ein Jahr, wenn nicht mit Wirkung zum 1. Januar des folgenden Jahres etwas anderes bestimmt wird.⁶⁸⁵

⁶⁸¹ Die Richtlinie kann unter <http://www.progres.nrw.de> abgerufen werden, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁸² Abzurufen unter <http://www.nrwbank.de>, zuletzt abgerufen am 11.9.2013.

⁶⁸³ §§ 20, 23 der Verordnung über Feldes- und Förderabgabe (FFVO), abzurufen unter http://esb.bezreg-arnsberg.nrw.de/a_1/a_1_021/, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁸⁴ Details zu diesem Förderangebot siehe <http://www.mwkel.rlp.de/Klimaschutz,-Energie/Erneuerbare-Energien/Erdwaerme,-Geothermie/>, zuletzt abgerufen am 10.9.2013.

⁶⁸⁵ Siehe § 18 der Landesverordnung über Feldes- und Förderabgaben, abzurufen unter http://www.lgb-rlp.de/fileadmin/cd2009/download/bergbau/Landesverordnung_Feldes_und_Foerderabgabe.pdf, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

6.3.3.11 Sachsen

Für den Zeitraum vom 1. Januar 2012 bis 31. Dezember 2015 wird Erdwärme keine Fördergabe erhoben. Derzeit (momentan befristet bis 31. Dezember 2015) wird auch keine Feldesabgabe erhoben.⁶⁸⁶

6.3.3.12 Sachsen-Anhalt

Sachsen-Anhalt fördert u. a. Erkundungsbohrungen zur Nutzung der Tiefengeothermie. Die Förderung erfolgt in Form eines Zuschusses. Die Höhe der Förderung beträgt für Unternehmen bis zu 50% der zuwendungsfähigen Ausgaben, max. jedoch 200.000 EUR (für Details siehe „Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen an Unternehmen zur Förderung von Maßnahmen des Klimaschutzes und der erneuerbaren Energien“)⁶⁸⁷. Die Richtlinie gilt bis zum 31. Dezember 2013.

§ 15 der Verordnung über Feldes- und Förderabgabe (FörderAVO) im Land Sachsen-Anhalt besagt, dass für die Zeit vom 1. Januar 2013 bis zum 31. Dezember 2015 Bewilligungen für den in Abs. 1 Nr. 4 der Anlage zur Verordnung über die Verleihung von Bergwerkseigentum genannten Bodenschatz von der Förderabgabe befreit werden.⁶⁸⁸

6.3.3.13 Schleswig-Holstein

Schleswig Holstein verzichtet für die Zeit vom 1. Januar 2013 bis zum 31. Dezember 2017 auf das Erheben einer Förderabgabe auf Erdwärme.⁶⁸⁹

6.3.3.14 Thüringen

Thüringen verzichtet für die Zeit vom 1. Januar 2006 bis zum 31. Dezember 2015 auf das Erheben sowohl einer Feldes- als auch einer Förderabgabe für Erdwärme.⁶⁹⁰

⁶⁸⁶ <http://amt24.sachsen.de/ZFinder/verfahren.do?action=showdetail&modul=VB&id=194497!0>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁸⁷ Abzurufen unter <http://www.ib-sachsen-anhalt.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁸⁸ Abzurufen unter <http://www.landesrecht.sachsen-anhalt.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁸⁹ § 21 der Landesverordnung über die Feldes- und Förderabgabe, abzurufen unter <http://www.gesetze-rechtsprechung.sh.juris.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

6.4 Vergabe- und kommunalrechtliche Aspekte

Projekte der Tiefengeothermie werden häufig im kommunalen Kontext realisiert. Kommunen gründen alleine oder gemeinsam mit Partnerkommunen entsprechende Betriebsgesellschaften für Geothermiekraftwerke.⁶⁹¹ In der kommunalen Daseinsvorsorge ist ein Trend zur Rückholung Privaten überlassener Versorgungsleistungen (Wasser, Energie, Verkehr) in die kommunale Verantwortung (Stichwort „Rekommunalisierung“) erkennbar. Für Städte und Gemeinden, die Politik und die Bürger hat die Frage nach der Übernahme der Energienetze durch die Energiewende und die Tendenz zur dezentralen Energieversorgung erheblich an Bedeutung gewonnen. Auch laufen in den kommenden Jahren eine Vielzahl von Konzessionsverträgen zwischen den Gemeinden und den Energieversorgungsunternehmen aus. Vor diesem Hintergrund spielen auch vergabe- und kommunalrechtliche Aspekte im Zusammenhang mit Projekten der Tiefengeothermie eine Rolle. Die nachfolgende Darstellung stellt exemplarisch einige dieser Themenfelder dar.

6.4.1 Allgemeines

Bei der Umsetzung von Geothermie-Projekten ist es in der Regel erforderlich, Leistungen von Dritten einzukaufen. Dabei stellt sich die Frage, ob diese Verträge frei vergeben werden können oder einer Ausschreibungspflicht (nach europäischen oder nationalen Vorgaben) unterliegen. Dies ist vor allem deshalb bedeutsam, da eine Erteilung von Aufträgen ohne Durchführung des vergaberechtlich gebotenen Verfahrens (de-facto-Vergaben) auf europäischer Ebene zu schwebend unwirksamen Verträgen nach §§ 101 a, 101 b GWB führt. Endgültige Unwirksamkeit tritt ein, wenn innerhalb einer Frist von 30 Tagen ab Kenntnis des Verstoßes, spätestens jedoch vor Ablauf von 6 Monaten nach Vertragsschluss Rügen in einem Nachprüfungsverfahren geltend gemacht werden. Falls die Auftragsvergabe im Amtsblatt der Europäischen Union bekannt gemacht wurde, endet abweichend davon die Frist für die Geltendmachung der Unwirksamkeit bereits 30 Tage nach Veröffentlichung der Bekanntmachung. Aber auch

⁶⁹⁰ § 20 der Thüringer Verordnung über die Feldes- und Förderabgabe, abzurufen unter <http://landesrecht.thueringen.de>, zuletzt abgerufen am 16.09.2013.

⁶⁹¹ Als Beispiel sei etwa die Zusammenarbeit der Geothermiegesellschaften der Gemeinden Grünwald und Unterhaching genannt. Ein Erfahrungsaustausch insbesondere über kommunale Geothermieprojekte wird jährlich von verschiedenen Dienstleistungsgesellschaften, spezialisierten Rechtsanwaltskanzleien und Branchenverbänden angeboten.

die Frage, nach welchen Kriterien ein Zuschlag im Vergabeverfahren erteilt wird, ist bei Geothermie-Projekten von großem Interesse, da sowohl Kosten- als auch Umweltaspekte in großem Maße betroffen sind.

Im Rahmen eines Geothermie-Projektes fällt eine große Bandbreite unterschiedlicher Leistungen an, bei welchen vergaberechtliche Bestimmungen unter Umständen zu beachten sind. Im Wesentlichen lassen sich die Leistungen in Planungs- und Ausführungsleistungen unterteilen. Zu den Planungsleistungen zählen die Projektplanung (insbesondere die Machbarkeitsstudie) sowie die Planung der einzelnen Ausführungsleistungen. Teilweise wird diese Planung von den ausführenden Unternehmen selbst übernommen, teilweise werden die Planungsleistungen jedoch auch separat in Auftrag gegeben. Dies ist z. B. bei der Planung eines etwaigen Fernwärmenetzes der Fall, welches oft schon geplant wird, bevor die Bohrung abgeschlossen ist. Zentrale Ausführungsleistung ist die Bohrung, welches gleichzeitig auch die kostenintensivste Leistung darstellt. Aber auch weitere Tiefbaumaßnahmen, wie z. B. die Verrohrung bei der sogenannten Komplettierung sowie diverse technische Anlagen (Förderpumpen, Kesselanlage, Kraftwerk) sind im Rahmen eines Geothermie-Projektes auszuführen⁶⁹².

Die oben beschriebenen Leistungen können losweise an mehrere Auftragnehmer oder im Wege der Gesamtvergabe an einen einzelnen oder wenige Auftragnehmer vergeben werden. Die Frage, welche vergaberechtlichen Aspekte zu beachten sind bzw. welche konkreten Ausschreibungspflichten bestehen, lässt sich nicht pauschal beantworten. Vielmehr kann dies regelmäßig nur projektabhängig beurteilt werden. Allerdings lassen sich einige zentrale Aussagen über das Bestehen oder Nichtbestehen von Ausschreibungspflichten treffen. Zwei entscheidende Parameter sind dabei zum einen, wer die Projektträgerschaft innehat, zum anderen wie der Auftrag qualitativ (Öffentlicher Auftrag nach § 99 GWB) und quantitativ (Erreichen der Schwellenwerte) zu bewerten ist.

6.4.2 Projektträgerschaft

Der Aspekt, wer die Projektträgerschaft innehat, wer also den Erfolg in wirtschaftlicher Hinsicht zu verantworten hat, stellt eine entscheidende Weichenstellung bei der Frage

⁶⁹² Vgl. *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermie-Projekten, VergabeR 6/2008, S. 894-895.

dar, ob eine Ausschreibungspflicht besteht oder nicht. Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Vergaberechts ist, dass es sich bei dem Auftraggeber, also regelmäßig dem Projektträger, um einen öffentlichen Auftraggeber im Sinne des § 98 GWB handelt.

Projektträger ist regelmäßig, wer Inhaber des sogenannten Claims ist⁶⁹³. Ein Claim ist ein abgegrenztes Gebiet (Berechtigungs- oder Aufsuchungsfeld), innerhalb dessen der Claim-Inhaber berechtigt ist, einen bestimmten bergfreien Bodenschatz wie Geothermie aufzusuchen und gegebenenfalls zu gewinnen. Dieses Claim kann bei einem öffentlichen Projektträger, bei einem privaten Projektträger oder bei einem gemischt öffentlich-privatrechtlichen Projektträger (Projektträger mit öffentlich-rechtlicher Beteiligung) liegen.

Während bei einem öffentlichen Projektträger die Eigenschaft des öffentlichen Auftraggebers im Sinne des § 98 GWB unproblematisch ist, muss diese bei den beiden letztgenannten Formen von Projektträgern eingehend untersucht werden.

6.4.2.1 Öffentlicher Projektträger

Ist der Projektträger und Auftraggeber (wie regelmäßig) eine Kommune, so ist diese unproblematisch als Gebietskörperschaft öffentliche Auftraggeberin im Sinne des § 98 Nr. 1 GWB. Eine Ausschreibungspflicht hängt dann von dem Vorliegen der weiteren Voraussetzungen ab (dazu siehe unter 4.3. ff.)

6.4.2.2 Privater Projektträger

Grundsätzlich sind private Auftraggeber vom Regime des Vergaberechts ausgenommen.

Vor dem Hintergrund der europäischen Richtlinie 2004/17/EG (Sektorenrichtlinie) wurden aber die sogenannten Sektorauftraggeber in das GWB eingefügt. § 98 Nr. 4 1. Alt. GWB (welcher die europäische Sektorenrichtlinie umsetzt) macht demnach eine

⁶⁹³ *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermie-Projekten, VergabeR 6/2008, S. 893.

Ausnahme für private Unternehmen, welche eine Tätigkeit auf dem Gebiet der Energieversorgung ausüben, wenn diese Tätigkeit auf Grundlage besonderer oder ausschließlicher Rechte von einer zuständigen Behörde gewährt wurden und diese dazu führen, dass die Ausübung der Tätigkeit einem oder mehreren Unternehmen vorbehalten wird und dass die Möglichkeit anderer Unternehmen, diese Tätigkeit auszuüben, erheblich beeinträchtigt wird. Sind diese Kriterien kumulativ erfüllt, begründet dies die Eigenschaft des öffentlichen Auftraggebers und bei Vorliegen der weiteren Voraussetzungen eine Ausschreibungspflicht.

6.4.2.2.1 Tätigkeit auf dem Gebiet der Energieversorgung (Sektorentätigkeit)

Ein Betreiber eines Geothermie-Projektes mit dem Ziel der Stromerzeugung und/oder Wärmenutzung übt die Tätigkeit der Energieversorgung entweder als Tätigkeit der Elektrizitätsversorgung gemäß Nr. 2 der Anlage zu § 98 Nr. 4 GWB und / oder als Tätigkeit der Wärmeversorgung gemäß Nr. 3 der Anlage zu § 98 Nr. 4 GWB aus. Für die Erzeugung von und den Großhandel mit Strom aus konventionellen Quellen (solche, die nicht unter das EEG fallen) sind Aufträge in Deutschland gemäß dem Durchführungsbeschluss der Kommission vom 24.04.2012 vom Vergaberecht freigestellt⁶⁹⁴. Die Versorgung mit Strom durch Erdwärme, welche unter die erneuerbaren Energien fällt, stellt daher nach wie vor eine Tätigkeit dar, die vom Anwendungsbereich des § 98 GWB als Sektorentätigkeit umfasst wird.

6.4.2.2.2 Ausschließliche oder besondere Rechte im Sinne des GWB

Problematischer ist, ob auch die zweite Voraussetzung vorliegt. Nach dieser muss wie erwähnt die Energieversorgung auf Grundlage besonderer oder ausschließlicher Rechte ausgeübt werden, die von einer zuständigen Behörde gewährt wurden. Dabei bedeutet ein ausschließliches Recht, dass das Privileg einem einzigen Unternehmen gewährt wird, während bei einem besonderen das Privileg mehreren Unternehmen zugutekommt⁶⁹⁵.

⁶⁹⁴ Amtsblatt der Europäischen Union vom 26.04.2012, L 114/21.

⁶⁹⁵ *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermie-Projekten, VergabeR 6/2008, S. 905.

Entscheidend ist somit die Frage, was solche ausschließlichen oder besonderen Rechte sind und insbesondere, ob solche Rechte im Zusammenhang mit der Errichtung und dem Betrieb von geothermischen Anlagen zur Elektrizitäts-und/oder Wärmeversorgung gewährt werden.

§ 98 Nr. 4 GWB enthält eine Legaldefinition. Hiernach sind ausschließliche oder besondere Rechte solche, „*die dazu führen, dass die Ausübung dieser Tätigkeiten einem oder mehreren Unternehmen vorbehalten wird und dass die Möglichkeit anderer Unternehmen, diese Tätigkeit auszuüben, erheblich beeinträchtigt wird.*“

(1) Auslegungs- und Konkretisierungsansätze

(a) Konkretisierung durch Gesetzesbegründung

Nach der Gesetzesbegründung zum Vergabemodernisierungsgesetz 2009 wird hinsichtlich der Einführung oben genannter Legaldefinition ausgeführt, dass „Folge der Änderung der Definition ist, dass wenn in einem Mitgliedstaat keine rechtlichen Privilegierungen zur Ausübung einer Sektorentätigkeit mehr bestehen, privatrechtlich organisierte und von Privatpersonen beherrschte Unternehmen in den Sektorenbereichen nicht mehr als öffentliche Auftraggeber erfasst werden“.⁶⁹⁶ Dies bedeutet, dass private Sektorenauftraggeber grundsätzlich aus dem Anwendungsbereich des Vergaberechts ausgenommen sein sollen, es sei denn, es besteht eine rechtliche Privilegierung durch die Gewährung von ausschließlichen oder besonderen Rechten. Die Frage, was genau unter den Begriff der besonderen oder ausschließlichen Rechte fällt, wird durch die Gesetzesbegründung jedoch nicht geklärt.

(b) Konkretisierung durch Europarecht

Da § 98 Nr. 4, 1. Alt. GWB vor dem europarechtlichen Hintergrund der Sektorenrichtlinie geschaffen wurde, ist die Vorschrift demnach richtlinienkonform auszulegen. Ziffer 25 der Begründungserwägungen lässt sich zum Aspekt der ausschließlichen und besonderen Rechte folgendes entnehmen: „Räumt ein Mitgliedstaat einer begrenzten Zahl von Unternehmen in beliebiger Form, auch über Konzessionen, Rechte auf Grundlage objektiver, verhältnismäßiger und nicht

⁶⁹⁶ BT-Ds. 16/10117 vom 13.08.2008, Begründung zu § 98, S. 17.

diskriminierender Kriterien ein, die allen interessierten Kreisen, die sie erfüllen, die Möglichkeit zur Inanspruchnahme solcher Rechte bieten, so dürfen diese nicht als besondere oder ausschließliche Rechte betrachtet werden.“ Demnach ist für die Kommission entscheidend, ob die Gewährung der Rechte auf Basis objektiver, verhältnismäßiger und nicht diskriminierender Kriterien erfolgt.

(c) Andere Auffassungen

Nach einer anderen Auffassung, die sich eng am Wortlaut des § 98 Nr. 4, 1. Alt. GWB anlehnt, kommt es darauf an, ob ein Unternehmen Rechte innehat, welche die Möglichkeit anderer Unternehmen, diese Tätigkeiten in demselben Gebiet unter denselben Voraussetzungen auszuüben, erheblich beeinträchtigen.⁶⁹⁷

(d) Zwischenergebnis

Eine Übereinstimmung besteht somit darin, dass ein ausschließliches oder besonderes Recht vorliegt, wenn sich ein privates Unternehmen aufgrund der staatlichen Privilegierung außerhalb des normalen Marktes bewegt und es dadurch eine „marktbezogene Sonderstellung“⁶⁹⁸ erhält, welches es rechtfertigt, ein privates Unternehmen wie ein Öffentliches zu behandeln. Das Vorliegen einer solchen marktbezogenen Sonderstellung ist jeweils für den Einzelfall zu prüfen.

Im Folgenden ist daher zu untersuchen, ob die Rechte, welche im Bereich der Tiefengeothermie in Bezug auf Strom-und/oder Wärmeerzeugung bestehen, unbegrenzt vergeben werden können und wenn nein, ob den Inhabern dieser Rechte eine marktbezogene Sonderstellung zukommt. Folgt man der europarechtlichen Definition der Kommission, welche insoweit aber als Begründungserwägung auch nur Auslegungshilfe und nicht bindend ist, so ist schließlich zu prüfen, ob die Rechte nach objektiven, verhältnismäßigen, nicht diskriminierenden Kriterien vergeben werden.

⁶⁹⁷ Kulartz/Kus/Portz-*Eschenbruch*, Kommentar zum GWB Vergaberecht, 2. Auflage 2009, § 98 Rn. 311.

⁶⁹⁸ Immenga/Mestmäcker-Dreher, Wettbewerbsrecht, 4. Auflage 2007, § 98 Rn. 91; Byok/Jäger-Werner, Kommentar zum Vergaberecht, 3. Auflage 2011, § 98 Rn. 91.

(2) Bergbauberechtigungen als ausschließliches oder besonderes Recht

Als ausschließliches oder besonderes Recht eines Geothermie-Projektträgers kommt die Bergbauberechtigung nach dem BBergG in Betracht. Die Aufsuchungserlaubnis gewährt das Recht, auf einem Erlaubnisfeld Erdwärme aufzusuchen; die Gewinnungsbewilligung gewährt das Recht, auf diesem Feld Erdwärme (dauerhaft) zu gewinnen. Hierbei wird durch das Konzessionsregime des BBergG ein exklusives Recht zur Aufsuchung und Gewinnung in zweifacher Weise gewährt. Zum einen besteht eine Exklusivität dergestalt, dass in dem jeweiligen Feld Andere keine Erdwärme aufsuchen oder gewinnen dürfen. Zum anderen kann der Inhaber einer solchen Erlaubnis oder Bewilligung Beeinträchtigungen durch private Dritte erfolgreich abwehren. Die Erlaubnis und die Bewilligung sind daher ausschließliche Rechte nach dem BBergG. Fraglich ist jedoch, ob der Begriff der Ausschließlichkeit nach dem BBergG deckungsgleich mit dem des § 98 Nr. 4 GWB ist. Dies ist anhand der oben skizzierten Kriterien zu beurteilen. Mithin ist zu untersuchen, ob die bergrechtliche Erlaubnis und Bewilligung dem Inhaber zu einer marktähnlichen Sonderstellung verhilft. Grundsätzlich können Bergbauberechtigungen zahlenmäßig unbegrenzt vergeben werden. Es wird jedoch argumentiert, dass zumindest eine faktische Sonderstellung aufgrund geologischer Gegebenheiten bestehe. So sei der Geothermie-Markt mittlerweile zerteilt in kleine Monopole, die sich geografisch auf die Größe der jeweiligen Bewilligungsfelder erstrecken und insgesamt das Gebiet, welches für eine rentable Erdwärmegewinnung in Betracht kommt, flächendeckend umspannen⁶⁹⁹. Allerdings kann eine rein faktische Privilegierung im Hinblick auf das Erfordernis einer rechtlichen Privilegierung nicht als ausreichend angesehen werden⁷⁰⁰.

Ungeachtet dessen, ob man eine faktische Privilegierung für ausreichend erachtet, spricht jedoch schon der Wortlaut gegen die Annahme eines ausschließlichen und besonderen Rechts. Selbst wenn ein ausschließliches Recht in Bezug auf Erdwärmever-sorgung bejaht würde, würde dies nicht ein ausschließliches Recht hinsichtlich der Wärmeversorgung insgesamt, die allein eine ausschreibungsauslösende Tätigkeit darstellt, begründen. Wärmeversorgung kann insoweit nicht mit Erdwärmever-sorgung gleichgesetzt werden. Für den gesamten Wärmemarkt besitzt der Inhaber des Bergrechts unstreitig kein ausschließliches Recht. Dies wird von Stimmen in der Literatur

⁶⁹⁹ Stolz/Kraus, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermieprojekten, VergabeR 6/2008, S. 907.

⁷⁰⁰ Denecke, Rechtsfragen der Tiefengeothermie-Voraussetzungen der Genehmigung und vergaberechtliche Aspekte, ZfB-Beil. 2012, 33.

insoweit anders betrachtet, als dass dem privaten Projektträger, welcher Erdwärme in das kommunale Fernwärmenetz einspeisen will, regelmäßig per Vertrag Vorzugsrechte eingeräumt werden. Dies kann durch eine Mindestabnahmeverpflichtung der Gemeinde oder, was häufiger der Fall sein wird, durch Schutzbestimmungen erfolgen, welche verhindern, dass etwaige Konkurrenten ebenfalls Wärme in noch zu errichtende Fernwärmenetze einspeisen⁷⁰¹. Eventuelle vertragliche Vorzugsrechte (dazu unter (4)) ändern aber nichts an der Beurteilung, ob die bergrechtlichen Erlaubnisse nach dem BBergG ein ausschließliches oder besonderes Recht begründen. Mit den oben genannten Erwägungen dürfte dies weiterhin zu verneinen sein.

Diese Überlegung wird gestützt durch Sinn und Zweck der Ausschreibungspflicht von Sektorenauftraggebern. Die Ausschreibungspflicht soll eine bestehende monopolartige Stellung jedenfalls hinsichtlich weiterer Aufträge begrenzen. Wie aber bereits dargelegt, besteht durch das Bergrecht zur Gewinnung von Erdwärme gerade keine monopolartige Stellung auf dem Markt der Wärmeversorgung insgesamt.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die bergrechtlichen Erlaubnisse bzw. Bewilligungen kein ausschließliches Recht in Bezug auf Wärme- und Elektrizitätsversorgung begründen.

(3) Wasserrechtliche Erlaubnis als ausschließliches oder besonderes Recht

Die wasserrechtliche Erlaubnis nach dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG), welche zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme erforderlich ist, könnte ein ausschließliches oder besonderes Recht im Sinne des GWB darstellen. In diesem Zusammenhang ist eine Entscheidung des OLG München vom 12.05.2011 ergangen, in welcher sich mit der Tätigkeit einer Gesellschaft, welche ein Wasserkraftwerk betreibt, auseinandergesetzt wurde. Bei der Beurteilung, ob die Tätigkeit aufgrund besonderer oder ausschließlicher Rechte ausgeübt werde, stellte das OLG darauf ab, „ob ein oder einzelne Unternehmen in einem bestimmten geografischen Gebiet eine Vorzugsstellung auf dem Markt haben, ein freier Markt also nicht stattfindet oder erheblich eingeschränkt sei.“ Im konkreten Einzelfall bestand keine tatsächliche Konkurrenz um die Erlaubnis zur wasserrechtlichen Nutzung der Flüsse, mithin wurde ein Recht im Sinne des § 98 Nr. 4, 1. Alt GWB bejaht.

⁷⁰¹ *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermieprojekten, VergabeR 6/2008, S. 904.

Jedoch kann diese Rechtsprechung zu einem Wasserkraftwerk nicht ohne weiteres auf ein Geothermie Projekt angewandt werden. Bei geothermischen Anlagen fehlt es gerade an einer vergleichbaren marktbezogenen Sonderstellung aufgrund der wasserrechtlichen Erlaubnis. Es herrscht vielmehr freier Wettbewerb, da auch andere Konkurrenten eine Chance auf die Erteilung der gleichen wasserrechtlichen Erlaubnis haben. Daher kann auch unter Berücksichtigung oben aufgezeigter Rechtsprechung die wasserrechtliche Erlaubnis nicht als ausschließliches oder besonderes Recht im Sinne des GWB gesehen werden.

(4) Erzeugung von elektrischer Energie als ausschließliches oder besonderes Recht

Ein ausschließliches oder besonderes Recht im Sinne des § 98 Nr. 4, 1. Alt. GWB besteht insoweit nicht. Durch die Liberalisierung des Strommarktes erhält ein privates Unternehmen, welches elektrische Energie erzeugt, gerade nicht die für ein ausschließliches oder besonderes Recht geforderte marktbezogene Sonderstellung⁷⁰².

(5) Ausschließliche Rechte in Bezug auf die Wärmeversorgung

Ein ausschließliches Recht eines privaten Unternehmens würde bestehen, wenn zu seinen Gunsten ein vertragliches Vorzugsrecht eingeräumt werden würde. Ein solches könnte zum einen in einem Anschluss- und Benutzungszwang zur Nutzung des entsprechenden Wärmenetzes bestehen⁷⁰³, zum anderen in entsprechenden Bestimmungen, welche potenzielle Konkurrenten ausschließen. Die Einräumung solcher Rechte würde regelmäßig über einen privatrechtlichen Vertrag, im Falle des Anschluss- und Benutzungszwanges, z. B. über einen privatrechtlichen Konzessionsvertrag entstehen. Jedoch wird in Übereinstimmung mit Ziffer 25 der Begründungserwägungen der Sektorenrichtlinie ein privatrechtlicher (Konzessions-)Vertrag nicht als ausreichend angesehen. Vielmehr müsse das ausschließliche oder besondere Recht öffentlich-rechtlichen Charakter haben. Dazu führt Ziffer 25, Satz 2 aus: *„Diese Definition [der ausschließlichen und besonderen Rechte] hat zur Folge, dass es für sich genommen noch kein ausschließliches oder besonderes Recht im Sinne dieser Richtlinie darstellt, wenn ein*

⁷⁰² Kulartz/Kus/Portz-Eschenbruch, Kommentar zum GWB Vergaberecht, 2. Auflage 2009, § 98 Rn. 314; Denecke, Rechtsfragen der Tiefengeothermie-Voraussetzungen der Genehmigung und vergaberechtliche Aspekte, ZfBR-Beil. 2012, 34.

⁷⁰³ Gaßner/Neusüß, Ausschreibungspflichten für Geothermie-Projekte nach der Sektorenverordnung, GtE 4/2009, S. 11.

Auftraggeber zum Bau eines Netzes [...] Netzeinrichtungen auf, unter oder über dem öffentlichen Wegenetz anbringen darf.“ Weiter wird in Ziffer 25, Satz 3 klargestellt, dass ebenso wenig ein privatrechtlicher Vertrag mit der Gemeinde über die Versorgung eines Fernwärmenetzes ausreicht um ein entsprechendes Recht zu begründen: „Auch die Tatsache, dass ein Auftraggeber ein Netz mit [...] Wärme versorgt, das seinerseits von einem Auftraggeber betrieben wird, der von einer zuständigen Behörde des betreffenden Mitgliedsstaats gewährte besondere oder ausschließliche Rechte genießt, stellt für sich betrachtet noch kein besonderes und ausschließliches Recht im Sinne der vorliegenden Richtlinie dar.“

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass ein privatrechtlicher Vertrag zur Versorgung des Netzes nicht ausreicht, um für das Unternehmen ein ausschließliches oder besonderes Recht zu begründen, selbst wenn zugunsten der Gemeinde ein Anschluss- und Benutzungszwang besteht.

6.4.2.2.3 Zwischenergebnis

Ein privater Projektträger eines Geothermie Projektes erhält kein ausschließliches oder besonderes Recht im Sinne des § 98 Nr. 4, 1. Alt. GWB. Demnach unterfällt er auch nicht den Vorgaben des Vergaberechts und kann seine Aufträge frei vergeben.

6.4.2.3 Projektgesellschaften mit öffentlich-rechtlicher Beteiligung

In der Praxis findet man nicht selten einen gemischt öffentlich-privatrechtlichen Projektträger. Will z. B. eine Gemeinde die projektbedingten Risiken nicht alleine tragen, kann sie es im Rahmen einer Öffentlich Privaten Partnerschaft (ÖPP) auf einen privaten Partner (teilweise) verlagern⁷⁰⁴. In diesem Fall ist das gemischtwirtschaftliche Unternehmen selbst und nicht die einzelnen Mitglieder der Projektträger. Die gemischtwirtschaftlichen Projektgesellschaft ist regelmäßig Sektorenauftraggeber nach § 98 Nr. 4 GWB. Ungeachtet des Streits, ob ein besonderes oder ausschließliches Recht vorliegt (§ 98 Nr. 4, 1. Alt. GWB), so ist zumindest von einem beherrschender Einfluss eines öffentlichen Auftraggebers nach der 2. Alt. auszugehen, da im Regelfall eine überwie-

⁷⁰⁴ *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermie-Projekten, VergabeR 6/2008, S. 893.

gende Beteiligung der öffentlichen Hand an der Projektgesellschaft gegeben ist. In diesem Fall wäre zudem die öffentliche Auftraggeber-Eigenschaft nach § 98 Nr. 2 GWB gegeben. Diese ist jedoch nach der Rechtsprechung des Europäischen Gerichtshofes gegenüber § 98 Nr. 4 GWB nachrangig⁷⁰⁵. Diese Nachrangigkeit ist deshalb von praktischer Bedeutung, da im Rahmen der Sektorentätigkeit u.a. andere Schwellenwerte gelten (siehe dazu Punkt 6.4.3.2).

Die Projektgesellschaft muss nicht zwingend Aufträge an Dritte vergeben, sondern kann Leistungen wie z. B. die Bohrung „selbst“ ausführen. Der private Gesellschafter erbringt in diesem Falle regelmäßig die korrespondierenden Leistungen in Erfüllung der Pflichten aus dem Gesellschaftsvertrag. Einigkeit besteht, dass durch eine solche Konstruktion eine Ausschreibungspflicht nicht umgangen werden kann. Vielmehr wird die Ausschreibungspflicht einfach in dem früheren Stadium der Gesellschaftsgründung bzw. der Übertragung der Gesellschaftsanteile an den privaten Gesellschafter relevant⁷⁰⁶.

6.4.3 Bewertung des Auftrags

Eine weitere essentielle Weichenstellung für die Anwendbarkeit des Vergaberechts ist die Beschaffenheit des Auftrags. So muss es sich um einen öffentlichen Auftrag im Sinne des § 99 GWB handeln. Zudem müssen für die Anwendbarkeit des europäischen Vergaberechts die entsprechenden Schwellenwerte überschritten sein.

6.4.3.1 Qualitativ: Öffentlicher Auftrag, § 99 GWB

Nach § 99 Abs. 1 GWB sind öffentliche Aufträge entgeltliche Verträge von öffentlichen Auftraggebern mit Unternehmen über die Beschaffung von Leistungen, die Liefer-, Bau- oder Dienstleistungen zum Gegenstand haben. Wie bereits aufgeführt fallen im Rahmen eines Geothermie-Projektes diverse Leistungen unterschiedlichster Natur an. Oft lässt sich nicht eindeutig zuordnen, ob es sich um reine Bau-, Liefer- oder Dienstleistungen handelt. So handelt es sich bei der Bohrung oder der Errichtung technischer Anlagen im Rahmen eines Geothermie-Projektes einerseits um Bauleistungen. Gleich-

⁷⁰⁵ EuGH, Urteil vom 10.4.2008- C 393/06.

⁷⁰⁶ EuGH, Urteil vom 10.11.2005- C 29/04, *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermieprojekten, VergabeR 6/2008, S. 908.

zeitig haben diese Ausführungsleistungen aber auch Lieferungen zum Gegenstand, wie z. B. die Lieferung der Rohre. Man kann die genaue Bestimmung des Vertrages jedoch nicht offenlassen mit der Begründung es handele sich jedenfalls um Verträge im Sinne des § 99 GWB. Spätestens für die Bestimmung der jeweiligen Schwellenwerte, ab welchen erst die europarechtlichen Vergaberechtsvorschriften Anwendung finden, ist eine genaue Einordnung notwendig. Die Kriterien zur Bestimmung des Vertragstypus bei gemischttypischen Verträgen sind streitig. Die sogenannte Dominanztheorie nimmt bei Vorliegen eines Auftrages, welcher neben Bauleistungen auch Dienst- und Lieferleistungen zum Gegenstand hat, regelmäßig einen Bauauftrag an. Eine andere Ansicht ist die Schwerpunkttheorie, welche sich in die quantifizierende und die qualifizierende Schwerpunkttheorie unterteilen lässt. Bei der quantifizierenden Schwerpunkttheorie wird der Schwerpunkt nach dem wertungsmäßigen Vergleich der jeweiligen Leistungsanteile ermittelt. Die qualifizierende Schwerpunkttheorie dagegen fragt danach, welche Leistung den Hauptgegenstand bildet. Zwar haben die beiden erstgenannten Theorien den Vorteil, dass sie griffige Kriterien für die Vertragsbestimmung anwenden. Jedoch ist zur Vertragsbestimmung der qualifizierenden Schwerpunkttheorie der Vorzug zu geben. So hat bereits der EuGH in Absage an die Dominanztheorie ausgeführt, dass ein Bauauftrag nicht begründet werden kann, wenn die Bauleistungen gegenüber dem Hauptgegenstand nur von untergeordneter Bedeutung sind.⁷⁰⁷ Ferner hat er in einem Urteil vom 21.2.2008 klargestellt, dass „wenn ein Vertrag zugleich Elemente eines öffentlichen Bauauftrags und Elemente eines öffentlichen Auftrags anderer Art aufweist, der Hauptgegenstand des Vertrages [bestimmt], welche Gemeinschaftsrichtlinie über öffentliche Aufträge grundsätzlich Anwendung findet (...)“⁷⁰⁸. Dies bedeutet, dass er eine Bestimmung des Vertrages anhand der qualifizierten Schwerpunkttheorie vornimmt. Im Einzelfall ist folglich zu prüfen, wo bei einem Auftrag im Rahmen des Geothermie-Projektes die wesentlichen, vorrangigen Verpflichtungen liegen. Beispielhaft würde z. B. regelmäßig bei der Errichtung eines Kraftwerkes die Bauleistung im Vordergrund stehen.

⁷⁰⁷ EuGH, Urteil vom 19.4.1994-C-331/92.

⁷⁰⁸ EuGH, Urteil vom 21.2.2008- C 412/04

6.4.3.2 Quantitativ: Schwellenwerte

Nach Einordnung des genauen Vertragstypus, ggf. unter zu Hilfenahme der unter 6.4.3.1 skizzierten Kriterien ist zu prüfen, ob der Netto Auftragswert den jeweiligen Schwellenwert erreicht, welcher eine europaweite Ausschreibungspflicht auslöst. Die Schwellenwerte bestimmen sich nach § 100 Abs. 1 GWB i. V. m. § 2 VgV sowie aus der Sektorenverordnung und werden im Turnus von zwei Jahren durch Verordnung der Kommission angepasst⁷⁰⁹.

Danach liegen die Schwellenwerte ab dem 1. Januar 2014

- bei Bauaufträgen bei 5.186.000 EUR
- bei Liefer- und Dienstleistungsverträgen eines Sektorenauftraggebers bei 414.000 EUR
- für Verträge über Lieferungen und Leistungen bei 207.000 EUR
- für Aufträge oberster und oberer Bundesbehörden bei 134.000 EUR

Da im Rahmen eines Geothermie-Projektes Aufträge an unterschiedliche Auftragnehmer losweise vergeben werden können, stellt sich die Frage, ob die Aufträge bei der Berechnung des Schwellenwertes isoliert oder in ihrer Gesamtheit zu betrachten sind. Die Grundregel des § 3 VgV besagt, dass in der Regel eine Gesamtbetrachtung vorzunehmen ist. Dies wirft aber die weitere Frage auf, wo die Grenzen für die Gesamtheit der Leistungen zu ziehen sind. Der EuGH hat dazu klargestellt, dass dies nach der wirtschaftlichen und technischen Funktion der betreffenden Arbeiten zu beurteilen sei. Unterschiedliche Bauwerke liegen demnach vor, wenn die Ergebnisse der jeweiligen Aufträge unterschiedliche wirtschaftliche und technische Funktionen erfüllen⁷¹⁰. So kann man z. B. die Bohrung als unterschiedliche Leistung zur Errichtung des Kraftwerkes betrachten, da es bei der einen Leistung um Förderung, bei der anderen um Nutzung von Erdwärme geht und somit zwei unterschiedliche technische und wirtschaftliche Zwecke verfolgt werden.

⁷⁰⁹ Eu-VO Nr. 1251/2011 der Kommission vom 30.11.2011, zuletzt durch VERORDNUNG (EU) Nr. 1336/2013 DER KOMMISSION vom 13. Dezember 2013 zur Änderung der Richtlinien 2004/17/EG, 2004/18/EG und 2009/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Schwellenwerte für Auftragsvergabeverfahren: Danach liegen die Schwellenwerte ab dem 1.1.2014 bei Bauaufträgen bei 5.186.000 EUR, bei Liefer- und Dienstleistungsverträgen eines Sektorenauftraggebers bei 414.000 EUR, für Verträge über Lieferungen und Leistungen bei 207.000 EUR, für Aufträge oberster und oberer Bundesbehörden bei 134.000 EUR.

⁷¹⁰ EuGH, Urteil vom 5.10.200-C 16/98.

6.4.3.3 Ausschreibungspflichten nach Maßgabe weiterer Bestimmungen

Wenn die Voraussetzungen für eine europaweite Ausschreibung nicht gegeben sind und insbesondere die Schwellenwerte nicht erreicht werden, kann sich allerdings eine Ausschreibungspflicht für öffentliche Auftraggeber auf nationaler Ebene ergeben. Für Kommunen resultiert diese regelmäßig aus dem einschlägigen Haushaltsrecht. Zudem kann sich bei einer etwaigen staatlichen Förderung des Projektes aus den jeweiligen Förderbestimmungen eine Pflicht zur Anwendung bestimmter Vergabevorschriften ergeben. Für Private und Projektgesellschaften besteht regelmäßig bei Unterschreitung der Schwellenwerte keine Ausschreibungspflicht⁷¹¹.

6.4.4 Umweltschutz im Vergaberecht

Wie schon im Abschnitt 6.2 dargestellt, kann ein Geothermie-Projekt Auswirkungen auf die Umwelt und die Arbeitsbedingungen von Menschen haben. Seismische Ereignisse, erhöhte Radioaktivität im Bereich der Anlage, Lärm sowie eine zumindest theoretisch denkbare negative Beeinträchtigung von Grundwasserkörpern sind einige der möglichen Risiken. Daher ist es von Bedeutung, dass im Vergaberecht sowohl nach europarechtlichen als auch nach nationalen Vorgaben Umweltaspekte als wichtige Belange in die Vergabeentscheidung einbezogen werden können. Gemäß § 97 Abs. 5 GWB wird der Zuschlag auf das wirtschaftlichste Angebot erteilt. Das bedeutet, dass der Zuschlag nicht automatisch an den preiswertesten Bieter erteilt werden muss, sondern auch andere Parameter wie die Sicherheit von Mensch und Natur einbezogen werden können. Sowohl in der VOL/A als auch auf europarechtlicher Ebene ist die Möglichkeit der Berücksichtigung von Umwelteigenschaften ausdrücklich vorgesehen. Der Europäische Gerichtshof hatte konkretisiert, dass auch Umweltbelange bei der Zuschlagserteilung berücksichtigt werden dürfen, solange dieses Kriterium auch ausdrücklich im Leistungsverzeichnis oder in der Bekanntmachung des Auftrags genannt ist⁷¹². Jedoch findet europaweit noch keine einheitliche Anwendung von umweltschützenden Maß-

⁷¹¹ *Stolz/Kraus*, Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermieprojekten, VergabeR 6/2008, S. 908; *Limpens*, Bericht: Wirkungsunsicherheiten in der Geothermiebohrung: Der „Fall Staufen“, DVBl 1. Dezember 2009, S. 1498.

⁷¹² EuGH, Urteil vom 17.09.2002- C-513/99-Concordia Bus Finland; Urteil vom 4.12.2003-C-448/01-EVN AG-Wienstrom GmbH.

stäben bei der Vergabe von Aufträgen statt⁷¹³. Dies kann *de lege ferenda* durch Erstellung einheitlicher Maßstäbe und Leitlinien durch die EU-Kommission gefördert werden.

6.4.5 Rechtsschutzmöglichkeiten nach §§ 102 ff. GWB

Bei Überschreitung der Schwellenwerte genießt ein Bieter den Schutz der Rechte aus § 97 GWB. In Umsetzung der Rechtsmittelrichtlinien stehen dem Bieter die Mechanismen der §§ 102 ff. GWB zur Verfügung. Da sich in diesem Bereich für Geothermie-Projekte keine spezifischen Besonderheiten ergeben, soll dieser Aspekt nur der Vollständigkeit halber kurz skizziert werden.

6.4.5.1 Primärrechtsschutz

Im Wege des Primärrechtsschutzes kann ein Bieter, der sich zu Unrecht übergangen fühlt die Verletzung seiner Rechte im Wege des Nachprüfungsverfahrens geltend machen mit dem Ziel selbst den Zuschlag zu erhalten. Dieses Verfahren findet vor den eigens dafür eingerichteten Vergabekammern statt, § 104 Abs. 1 GWB. Die Zustellung eines Nachprüfungsantrages hat Suspensiv-Effekt, d. h. ein Zuschlag darf nicht mehr erteilt werden bis zur Entscheidung der Vergabekammer (§ 115 Abs. 1 GWB). Dies ist deswegen besonders wichtig, da im deutschen Recht der zivilrechtliche Vertrag mit Zuschlagserteilung geschlossen wird und ein Nachprüfungsverfahren danach nicht mehr durchgeführt werden kann (§ 114 Abs. 2 Satz 1 GWB). Daher gibt es zumindest eine Informationspflicht nach § 101a GWB, welche vorschreibt, dass der Auftraggeber die Bieter, deren Angebote nicht berücksichtigt werden sollen, spätestens 15 Tage vor dem Vertragsabschluss über den Grund der Nichtberücksichtigung informiert. Ein vor Ablauf der Frist oder ohne vorherige Informationen geschlossener Vertrag ist unwirksam, sofern ein solcher Verstoß festgestellt wird. Nur so kann sichergestellt werden, dass ein Bieter faktisch die Chance erhält, einen Verstoß gegen Vergaberecht vor der Vergabekammer rechtzeitig geltend zu machen. Eine Antragsbefugnis nach § 107 Abs. 2 zur Überprüfung des Vergabeverfahrens liegt vor, wenn ein Interesse am Auftrag besteht, die Möglichkeit der Verletzung von Vergabevorschriften geltend gemacht werden kann sowie ein entstehender oder drohender Schaden dargelegt werden kann.

⁷¹³ Stüer, Umweltschutz im Vergaberecht-Kreislaufwirtschaft-Öffentlichkeitsbeteiligung-Geothermie, DVBl. 15. Dezember 2008, 1559.

Eine Überprüfung der Entscheidungen der Vergabekammern ist gemäß § 116 GWB mittels einer sofortigen Beschwerde zum Oberlandesgericht möglich.

6.4.5.2 Sekundärrechtsschutz

Wie bereits erwähnt, ist nach Zuschlagserteilung dieser nicht mehr rückgängig zu machen. Dem Bieter bleibt nun lediglich die Möglichkeit, im Wege des Sekundärrechtsschutzes Schadensersatz vor den Zivilgerichten einzuklagen. Dieser umfasst vor allem den entgangenen Gewinn sowie den Ersatz der Angebotskosten.

6.4.5.3 Rechtsschutzmöglichkeiten bei Auftragsvergabe unterhalb der Schwellenwerte

Unterhalb der Schwellenwerte bleibt einem Bieter der Rechtsschutz im förmlichen Nachprüfungsverfahren vor der Vergabekammer und dem Vergabesenat versagt. Theoretisch besteht zwar die Möglichkeit, Primärrechtsschutz vor den Zivilgerichten im Wege einer einstweiligen Verfügung zu suchen⁷¹⁴. Aufgrund des Fehlens der oben erwähnten Informationspflicht ist dieser Rechtsschutz praktisch nicht effektiv.

Regelmäßig bleibt einem übergangenen Bieter daher nur die Möglichkeit, eine Vergaberechtsverletzung im Wege des Sekundärrechtsschutzes mit einer entsprechenden Schadensersatzforderung geltend zu machen.

6.4.6 Anschluss- und Benutzungszwang für Fernwärmeversorgungsanlagen

Durch einen Anschluss- und Benutzungszwang werden die Grundstückseigentümer verpflichtet, ihre Grundstücke an eine bestimmte Einrichtung, insbesondere eine öffent-

⁷¹⁴ BVerwG, Beschl. v. 2.5.2007- 6 B 10/07. Nach einer Entscheidung des BGH (Urteil vom 9.7.2002 – KZR 30/00, NVwZ-RR 2003, S. 207, vollständig abgedruckt in GRUR 2003, S. 77) darf eine Gemeinde auch den Grundstücksverkauf vom Bezug von Fernwärme abhängig machen. Sie verstößt nicht gegen wettbewerbs- oder kartellrechtliche Vorschriften, wenn sie beim Verkauf gemeindeeigener Grundstücke die Käufer zur Abnahme von Fernwärme eines Energieverteilungsunternehmens, dessen Mehrheitsgesellschafterin sie ist, verpflichtet. Denn die Gemeinde als öffentliche Hand unterliege grundsätzlich auch keinen strengeren Verhaltensregeln als ein privater Grundstückseigentümer oder ein privates Energieversorgungsunternehmen.

liche Einrichtung zur Ver- oder Entsorgung, anzuschließen (Anschlusszwang) und ausschließlich diese Einrichtung zu benutzen (Benutzungszwang). Für dieses ordnungsrechtliche, mit deutlichen Freiheitsbeschränkungen verbundene Instrument finden sich grundsätzlich in allen Bundesländern Ermächtigungsgrundlagen⁷¹⁵, die die Gemeinden oder Gemeindeverbände bei Vorliegen eines öffentlichen Bedürfnisses zur Festsetzung eines Anschluss- und Benutzungszwangs durch Satzung ermächtigen.⁷¹⁶ Mit dem EEWärmeG 2009⁷¹⁷ wurde in § 16 EEWärmeG eine Regelung eingeführt, die die bestehenden Ermächtigungsgrundlagen nach Landesrecht nunmehr auch ausdrücklich für den Klima und Ressourcenschutz geöffnet hat.

Schon zuvor war nach der Rechtsprechung des BVerwG⁷¹⁸ ein solcher Anschluss- und Benutzungszwang „*ein im Kommunalrecht seit langem eingeführtes Rechtsinstitut (. . .), dessen Konturen von der Rechtsprechung herausgearbeitet sind*“. Das Bundesverwaltungsgericht entschied damit in letzter Instanz zu Gunsten einer beklagten Gemeinde. Insbesondere stehe Art. 28 Abs. 2 GG der Auslegung des Landesrechts durch das Berufungsgericht nicht entgegen. Die Vorinstanz hatte in Auslegung des Landesrechts festgestellt, dass ein dringendes öffentliches Bedürfnis im Sinne des § 17 Abs. 2 der Gemeindeordnung für Schleswig-Holstein für die Anordnung des Anschluss- und Benutzungszwangs auch dann angenommen werden könne, wenn die Fernwärmeversorgung nur bei globaler Betrachtung unter Einbeziehung ersparter Kraftwerksleistungen an anderer Stelle zu einer beachtlichen Verringerung des Schadstoffausstoßes führe. Diese Auffassung ließ das Bundesverwaltungsgericht gelten. Es sei nicht auszuschließen, dass der Landesgesetzgeber in Erfüllung seiner ihm obliegenden Verpflichtung, auf die Verwirklichung der Staatszielbestimmung des Art. 20a GG hinzuwirken, den Kommunen zusätzliche Befugnisse übertrage, die den Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen sichern sollen. Ebenso konnten die Leipziger Richter in dem Anschluss- und Benutzungszwang keinen Verstoß gegen den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit sehen. Insbesondere obliege es der Entscheidung des Gesetzgebers, ob die Fernwärmeversorgung mit Kraft-Wärme-Kopplung ein zum Klimaschutz geeignetes Mittel ist. Auch europäische Wettbewerbsregeln stünden der Anordnung eines kommunalen

⁷¹⁵ Siehe beispielhaft § 9 GO NRW; eine Übersicht findet sich z. B. bei *Milkau*, in: Müller/Oschmann/Wustlich, EEWärmeG, § 16 Rn. 5; siehe auch *Kahl*, ZUR 2010, 395, 398.

⁷¹⁶ *Wustlich* in Danner/Theobald, Energierecht, EEWärmeG § 16 Rn 6.

⁷¹⁷ BGBl. 2008 I S. 1659; zur Gesetzesbegründung siehe BR-Drucks. 9/08, S. 65 f.

⁷¹⁸ Siehe etwa BVerwG, Urteil vom 25. 1. 2006 - 8 C 13/05, NVwZ 2006, 690, 691.

Anschluss- und Benutzungszwangs aus Gründen des Klimaschutzes nicht entgegen, so das Gericht abschließend.

In Anbetracht der hohen spezifischen Investitionskosten ist Zweck des Anschluss- und Benutzungszwangs die Ermöglichung eines wirtschaftlichen Betriebs der im öffentlichen Interesse liegenden Einrichtung durch die (zwangsweise) Schaffung einer ausreichend hohen Anzahl an Nutzern dieser Einrichtung. Diese sollten sich in unmittelbarer Nähe der Anlage befinden, da die durch den Transport entstehenden Wärmeverluste so gering gehalten werden und außerdem geringere Kosten für die Errichtung eines Leitungsnetzes entstehen.⁷¹⁹

Vorrangig sind diese Abnehmer durch marktliche Strukturen zu finden; dies gelingt jedoch nicht immer. Daher kann bei Fernwärme ein Anschluss- und Benutzungszwang *„dienlich sein, um eine ausreichende Nachfrage nach dieser energieeffizienteren Form der Wärmeversorgung sicherzustellen. Der Markt allein kann (aktuell) mangels vollständiger Einpreisung der vom Klimawandel sukzessive verursachten Kosten in die Preise für Wärme aus Einzelfeuerungsanlagen (vor allem heimische Öl- und Gasheizungen) ein solches nachhaltiges Verhalten nicht sicherstellen“*.⁷²⁰

Auch wenn die Fernwärme heute eine nennenswerte praktische Bedeutung hat (ca. 10–13 % der Wohneinheiten in Deutschland werden leitungsgebunden, also durch Fernwärme, versorgt), ist die praktische Relevanz von Anschluss- und Benutzungszwängen derzeit vergleichsweise gering: Gemessen am Wärmeabsatz werden nur rd. 10% der Leitungswärme in Gebiete mit Anschlusspflichten geliefert; mithin wird Fernwärme zu rund 90% ohne Anschluss- und Benutzungszwang geliefert.⁷²¹

6.4.7 Vergabe von Konzessionen bei Geothermie-Projekten

Im Rahmen der Energieversorgung übernehmen Kommunen diese in der Praxis oft nicht direkt, sondern lagern sie im Rahmen von sogenannten Konzessionsverträgen auf private Unternehmer aus. Auch im Rahmen eines Geothermie-Projektes kann dies z. B. bei der Erteilung einer Konzession an ein privates Unternehmen für die Wärme-

⁷¹⁹ Vgl. Böhm/Schwarz, DVBl. 2012, 540.

⁷²⁰ Kahl, ZUR 2010, 395, 398.

⁷²¹ Wustlich in Danner/Theobald, Energierecht, EEWärmeG § 16 Rn 8 mit weiteren Nachweisen.

versorgung relevant werden. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit bei der Auswahl des Vertragspartners und dem Abschluss der Verträge vergaberechtliche Regelungen zu beachten sind. Dies ist insoweit von der oben aufgeworfenen Problematik, ob der Private, welcher aufgrund einer Konzession ein Projekt durchführt, seinerseits das Vergaberecht beachten muss, zu trennen. War in der obigen Konstellation das Merkmal des öffentlichen Auftraggebers problematisch, so ist es vorliegend vielmehr das Merkmal des öffentlichen Auftrags. Ein Dienstleistungsauftrag im Sinne des § 99 Abs. 4 GWB setzt gemäß § 99 Abs. 1 GWB die Entgeltlichkeit des Dienstes voraus. Bei einem Energieversorgungsvertrag (Konzessionsvertrag) schuldet der Auftraggeber (die Kommune) aber gerade kein Entgelt, sondern das Energieversorgungsunternehmen lässt sich direkt von seinen Kunden vergüten und führt dabei noch Konzessionsabgaben an die Kommune ab.

Die Erteilung der Konzession richtet sich dabei nicht nach § 46 EnWG, da Zweck (und Regelungsgegenstand) des EnWG allein die sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente und umweltverträgliche leitungsgebundene Versorgung der Allgemeinheit mit Elektrizität und Gas ist (vgl. § 1 EnWG). Energieversorgungsnetze i. S. d. EnWG sind nach der Definition in § 3 Nr. 16 EnWG *„Elektrizitätsversorgungsnetze und Gasversorgungsnetze über eine oder mehrere Spannungsebenen oder Druckstufen mit Ausnahme von Kundenanlagen im Sinne der Nummern 24a und 24b“*.

Das Fernwärmerecht ist insofern fragmentarisch.⁷²² Es gibt kein dem EnWG vergleichbares Gesetz, welches im Schwerpunkt ausschließlich fernwärmespezifische Sachverhalte regelt. Auch eine der Verordnung über Konzessionsabgaben für Strom und Gas (Konzessionsabgabenverordnung - KAV) vergleichbare Regelung fehlt. Vielmehr ist das Fernwärmerecht über eine Vielzahl von Rechtsnormen verstreut. Mitunter werden einzelne Sachverhalte überhaupt nicht von besonderen Regelungen erfasst, so etwa die Rechtsbeziehungen zwischen Fernwärmeversorgern und Gemeinden zur Duldung von Fernwärmeleitungen (sog Gestattungsverträge). Daher spielt die Vertragspraxis im Recht der Fernwärme eine besonders wichtige Rolle. In der Praxis ist aber die Vereinbarung zur Zahlung von Konzessionsabgaben in Fernwärmekonzessionsverträgen heutzutage weit verbreitet. Dabei wird zumeist auf die Regelungen der Ausführungsanordnung zur Konzessionsabgabenanordnung (A/KAE) verwiesen. Die Konzessions-

⁷²² Vgl. Topp in Danner/Theobald, Energierecht, Kapitel 76 „Fernwärmerecht“, Rn. 1.

abgaben werden dabei im Rahmen der Vertragsautonomie frei verhandelt. Eine gesetzliche Grundlage hierfür gibt es nicht.⁷²³

Das Fernwärmerecht wird aber immer stärker vom europäischen Recht geprägt, Beispiele sind die Energiedienstleistungs- und die KWK-Richtlinie, inzwischen zur Energieeffizienzrichtlinie zusammengeführt. Der vertragsrechtliche Rahmen zum Fernwärmekunden beinhaltet im Wesentlichen das BGB und die Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Fernwärme (AVBFernwärmeV).⁷²⁴

Es stellt sich daher die Frage der Notwendigkeit, solche Konzessionen in Zukunft doch dem Vergaberecht und somit auch den §§ 102 ff. GWB zu unterwerfen. Dies kann jedoch nur *de lege ferenda* durch entsprechende Neuregelungen (und Definitionen) des Gesetzgebers erfolgen. Im Sinne einer effektiven Durchsetzung der Zwecke der Sektorenrichtlinie 2004/17/EG, insbesondere Marktöffnung und Wettbewerb im Energiesektor, wäre dies zu erwägen.⁷²⁵

6.4.8 Zwischenergebnis

Ungeachtet der großen Komplexität der einzelnen Vergaberechtsnormen bleibt die Frage im Rahmen eines Geothermie-Projektes, ob überhaupt vergaberechtliche Regeln anzuwenden sind. Dies ist zum einen an den Schwellenwerten, zum anderen am Merkmal des öffentlichen Auftrages festzumachen. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass *de lege lata* im Bereich von Konzessionsverträgen das Vergaberecht des GWB mangels Vorliegen eines öffentlichen Auftrages nicht anwendbar ist. Weiterhin muss es sich für die Anwendung des Vergaberechts um einen öffentlichen Auftraggeber im Sinne des § 98 GWB handeln. Es besteht hier vor allem Uneinigkeit, wie im Sektorenbereich private Unternehmen einzuordnen sind. Tendenziell ist derzeit die Eigenschaft als öffentlicher Auftragnehmer zu verneinen. Zumindest sollte dies durch den Gesetzgeber für die Zukunft klargestellt werden. Hinsichtlich der Rechtsschutzmöglichkeiten sei auf die allgemeinen Ausführungen verwiesen. Hier stellen sich

⁷²³ Theobald/Templin in Danner/Theobald, Energierecht, Kapitel B 4, Konzessionsabgabenverordnung – KAV, § 1 Rn. 83.

⁷²⁴ Topp in Danner/Theobald, Energierecht, Kapitel 76 „Fernwärmerecht“, Rn. 2.

⁷²⁵ Indes steht eine Reform des europäischen Vergaberechts bevor. Sowohl die Vergaberichtlinie 2004/18/EG also auch die Sektorenrichtlinie 2004/17/EG werden reformiert. Mit einer Verabschiedung wird im Jahr 2014 gerechnet.

jedoch keine speziellen Probleme im Hinblick auf die Eigenart von Geothermie-Projekten.

Das Fernwärmerecht ist fragmentarisch. Es gibt kein dem EnWG vergleichbares Gesetz, welches im Schwerpunkt ausschließlich fernwärmespezifische Sachverhalte regelt. Auch eine der Verordnung über Konzessionsabgaben für Strom und Gas (Konzessionsabgabenverordnung - KAV) vergleichbare Regelung fehlt.

6.5 Gesamtergebnis

Eine Zusammenfassung der rechtswissenschaftlichen Ergebnisse findet sich in Kapitel 9.1. Schlussfolgerungen und Empfehlungen sind in Kapitel 10.2 dargestellt.

7 Einwirkungen von Wirkfaktoren auf Schutzgüter im Lebensweg einer Geothermieanlage

Die Systemanalyse der geothermalen Energiegewinnung (GeoSys) hat eine schutzgutbezogene Beschreibung und Interpretation möglicher Auswirkungen (Wirkfaktoren) der Errichtung, des Betriebs und des Rückbaus von Anlagen zur Nutzung tiefer geothermaler Lagerstätten angestrebt.

Der interdisziplinäre Ansatz verfolgt mit der Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen räumlichen und funktionellen Kompartimenten und zwischen Umweltmedien sowie der Analyse von entsprechenden regulatorischen Strukturen den Anspruch an eine Systemanalyse eines komplexen Systems. Im Rahmen des Vorhabens erfolgt eine fachlich-inhaltliche Bearbeitung folgender Punkte:

- Bestandsaufnahme der Schutzgüter
- Ermittlung / Beschreibung der Wirkfaktoren des Vorhabens und der zu erwartenden Auswirkungen
- Bewertung der Umweltveränderung hinsichtlich Beeinträchtigungen / Risiken
- Hinweise zur Vermeidung oder Verminderung von Beeinträchtigungen

7.1 Projektphasen

Im Rahmen des GeoSys-Vorhabens werden zur Abgrenzung der Wirkfaktoren bzw. für eine bessere Strukturierung der Arbeiten folgende Phasen im Lebensweg einer Anlage zur Nutzung geothermischer Energie unterschieden (Abb. 7.1):

1. Erkundung:
Erste Erkundung (Vibroseismik etc.).
2. Errichtung der Anlage:
Abteufen der Bohrung, Errichtung der Dublette, Fördertests, Errichtung der oberirdischen Anlagenteile.
3. Operative Betriebsphase (inkl. pot. Störfälle):
Phase der Investitionsrückführung und der Gewinnbildung: Betrieb der Anlage gemäß technischer Auslegung. U.U. Aufrüstung oder Nachrüstung (auch gemäß Behördenanforderungen) der Anlage.

4. Nachbetriebsphase / Stilllegung / Rückbau:

Rückbau der Anlage inkl. ziehen des Förder- und Reinjektionsstranges, Versiegelung des Bohrloches gegenüber penetrierten Horizonten

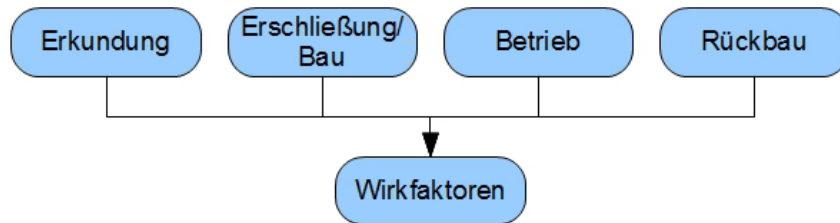


Abb. 7.1 Phasen eines Geothermie-Projektes

Für den Betrachtungszeitraum eines Geothermieprojektes wird eine begrenzte Nutzungsdauer der geothermischen Anlage vorausgesetzt: Für Anlagen der geothermischen Energieerzeugung wird gegenwärtig eine Laufzeit von ca. 30 Jahren angenommen /FRT 10/. Nach EEG wird der Betrieb einer geothermischen Anlage über einen Zeitraum von 20 Jahren finanziell gefördert. Mit welcher Intensität die Betreiber den Betrieb nach Ablauf der Förderung verfolgen, kann gegenwärtig nicht abgeschätzt werden. Offene Fragen wirft gegenwärtig die Haltbarkeit der Bohrung selbst auf, die durch Korrosion; Scale-Bildung oder geomechanische Einflüsse begrenzt werden kann.

7.2 Schutzgüter

Im Falle einer Umweltverträglichkeitsprüfung nach dem UVPG i. V. m. der UVP-V Bergbau ergäbe sich die Notwendigkeit für eine Identifizierung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf nachfolgend genannte Schutzgüter:

§ 2 Abs. 1 Satz 2 UVPG:

Die Umweltverträglichkeitsprüfung umfasst die Ermittlung, Beschreibung und Bewertung der unmittelbaren und mittelbaren Auswirkungen eines Vorhabens auf

- 1. Menschen, einschließlich der menschlichen Gesundheit, Tiere, Pflanzen und die biologische Vielfalt,*
- 2. Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft,*

3. *Kulturgüter und sonstige Sachgüter sowie die*
4. *Wechselwirkung zwischen den vorgenannten Schutzgütern.*

Die zielgerichtete Beschreibung aller rechtlich geschützten Schutzgüter, welche die voraussichtlichen Wirkfaktoren und Folgen der Errichtung und des Betriebes einer Anlage oder der Umsetzung einer Maßnahme für das Schutzgut beinhaltet, wurde daher – unabhängig vom der bestehenden oder nicht bestehenden UVP-Pflichtigkeit eines Geothermievorhabens – im vorliegenden Projekt als systematisch-methodische Herangehensweise für die Prognose der zu erwartenden Umweltauswirkungen einer Geothermieanlage gewählt. Damit wurde ein gemeinsames Verständnis des zu untersuchenden Wirkungsgefüges geschaffen. Jenseits der verfassungsrechtlichen Vorgaben in den Artikeln 2, 12 und 14 sowie der in Art. 20a GG enthaltenden Staatszielbestimmung zum Umweltschutz als Handlungsauftrag für die Normgeber sowie als Abwägungs- und Auslegungsmaßstab bei der Anwendung vorhandener Normen ergibt sich der konkrete Schutzbereich für das jeweilige Schutzgut aus den spezifischen Gesetzen und Verordnungen, allen voran solchen des Umweltrechts (siehe hierzu Kapitel 6). Besonders hervorzuheben sind hierbei die Schutzbereiche und Begriffsdefinitionen des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG), des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchG) sowie des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG):

Wasserhaushaltsgesetz (WHG), § 1 Zweck

„Zweck dieses Gesetzes ist es, durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen.“

Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG), § 1 Zweck und Grundsätze des Gesetzes

„Zweck dieses Gesetzes ist es, nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte so weit wie möglich vermieden werden.“

Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG),

§ 1 Zweck des Gesetzes

„(1) Zweck dieses Gesetzes ist es, Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen.

(...)“

§ 3 Begriffsbestimmungen

„(1) Schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne dieses Gesetzes sind Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen.

(2) Immissionen im Sinne dieses Gesetzes sind auf Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen.

(3) Emissionen im Sinne dieses Gesetzes sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnlichen Erscheinungen.

(4) Luftverunreinigungen im Sinne dieses Gesetzes sind Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe.

(...)“

Der Detaillierungsgrad der Beschreibungen wurde dem zu erwartenden Ausmaß der Wirkung angepasst. Die Abb. 7.2 führt die Schutzgüter mit den jeweiligen zugehörigen Gesetze und Verordnung auf:

Abb. 7.2 Schutzgüter / Umweltgüter

| Schutzgut | Gesetzlich u. a. geschützt durch* |
|--|--|
| Mensch, menschliche Gesundheit | Art. 2 Abs. 2, Art. 20a GG; §§ 1 Nr. 2, Nr. 3, 61 Abs. 1 Nr. 1 lit. a und Nr. 2 BBergG; ABergV; UVPG; BImSchG; StrlSchV; StrVG; §§ 1, 3a Abs. 2, 17, 19 ChemG; GefStoffV; ArbSchG; §§ 223 ff. StGB; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Tiere | Art. 20a GG; BNatSchG; BImSchG; UVPG; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Pflanzen | Art. 20a GG; BNatSchG; BImSchG; UVPG; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Boden | Art. 20a GG; BBodSchG; BBodSchV; UVPG; WHG; BImSchG; §§ 1, 3a Abs. 2, 17, 19 ChemG; USchadG; §§ 324 ff. StGB; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Wasser | Art. 20a GG; WHG; GrwV; UVPG; BImSchG; §§ 1, 3a Abs. 2, 17, 19 ChemG; USchadG; §§ 324 ff. StGB; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Luft, Atmosphäre | Art. 20a GG; BImSchG; UVPG; §§ 324 ff. StGB; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Klima | Art. 20a GG; UVPG; §§ 1 Abs. 3 Nr. 4 BNatSchG; § 2 Abs. 2 Nr. 6 ROG; §§ 1 Abs. 5, Abs. 6 Nr. 7 BauGB; § 1 Abs. 1 EEG; § 1 TEHG; § 6 Abs. 1 Nr. 5 WHG; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Landschaft | Art. 20a GG; § 26 BNatSchG; BWaldG; UVPG; § 2 Abs. 2 Nr. 5 ROG; § 1 Abs. 6 Nr. 7 lit. a BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Kulturgut | Art. 20a GG; § 2 Abs. 1 Nr. 3 UVPG; § 1 Abs. 1 BImSchG; §§ 1 Abs. 4 Nr. 1, 2 Abs. 1 BNatSchG; § 2 Abs. 2 Nr. 5 ROG; § 1 Abs. 6 Nr. 7 lit. d BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze (insbesondere Denkmalschutzgesetze) |
| Sachgut | Art. 14 GG; §§ 90 ff., 854 ff., 903 ff., 1004 BGB; §§ 1 Nr. 3, 61 Abs. 1 Nr. 1 lit. a BBergG; § 1 Abs. 1 BImSchG; § 1 Abs. 4 Nr. 1 BNatSchG; § 1 Abs. 6 Nr. 7 lit. d BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Biologische Vielfalt | Art. 20a GG; §§ 1 Abs. 1 Nr. 1, 2 Abs. 1, 7 Abs. 1 Nr. 1 BNatSchG; UVPG; USchadG; § 1 Abs. 6 Nr. 7 lit. a BauGB; Landesverfassungen; Landesgesetze |
| Sicherung der Rohstoffversorgung (das geordnete Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen) | BBergG; § 2 Abs. 2 Nr. 4 ROG; § 1 Abs. 6 Nr. 8 lit. e und lit. f BauGB; Landesgesetze |

* Soweit Gesetze ohne die Nennung konkreter §§ aufgeführt sind, ist davon auszugehen, dass das entsprechende Gesetz als solches das Umweltgut schützt. Die Nennung konkreter §§ ist nicht als abschließende Aufzählung zu verstehen, sondern weist exemplarisch auf die Nennung/Erfassung des Umweltguts an dieser Stelle hin.

7.3 Wirkfaktoren

Wirkfaktoren sind die von einer Maßnahme auf Schutzgüter ausgehenden Einwirkungen. Im Rahmen der Systemanalyse wird zwischen baubedingten, sowie betriebs- und stilllegungsbedingten Wirkfaktoren unterschieden.

Baubedingte Wirkfaktoren sind vom Baufeld in der Erkundungs- und Errichtungsphase der Geothermieanlage bzw. der Erschließung der Lagerstätte ausgehende Einflüsse, die vorübergehende oder auch dauerhafte Auswirkungen hervorrufen können. Beispielfhaft werden im Folgenden einige Einflüsse aufgezählt:

- temporäre Flächeninanspruchnahme (Einrichtung von Baustellenzufahrten, Baustraßen, Abstellen von schwerem Baugerät, Materiallager, u. a.)
- Lärm, Stäube und Erschütterungen (Vibroseismik der Vorerkundung, Emissionen der Baustellenfahrzeuge und sonstiger Geräte)
- Emissionen infolge von Unfällen während der Bauarbeiten (Leckagen von Tanks, Verkehrsunfälle durch Bau- und Transportfahrzeuge)
- Beeinflussung des Landschaftsbildes (z. B. durch Bohrtürme)
- Verlust von Bohrspülung im Untergrund
- Wasserverbrauch für die Bohrspülung (Verlust der Wasserfunktionen)

Stimulationsmaßnahmen und Zirkulationstests werden der Phase der Errichtung zugeordnet und somit auch als baubedingte Wirkfaktoren beschrieben.

Die **betriebsbedingten** Wirkfaktoren umfassen sowohl anlagenbedingte Wirkfaktoren durch oberirdische Anlagenbauten und Infrastruktur als auch die operativ-bedingten Wirkfaktoren.

Betriebsbedingte Wirkfaktoren gehen über die Bauphase hinaus. Hierzu zählen u. a.

- Flächeninanspruchnahme
- Bodenverdichtung und -versiegelung (Verlust von Bodenfunktionen)
- Zerschneidung und Veränderung des Landschaftsbildes

Als **operativ-bedingt** sind jene Wirkfaktoren anzuführen, die durch den eigentlichen Leistungsbetrieb der Anlage entstehen, so z. B.:

- Lärmemission, Erschütterungen
- Emissionen (stofflich)
- Unfälle im Betrieb

Stilllegungsbedingte Wirkfaktoren treten im Zeitraum der endgültigen Stilllegung der Anlage und im Rückbau der Anlage sowie in den nachfolgenden Zeiträumen auf.

Die im Rahmen des Vorhabens zu untersuchenden Wirkfaktoren unterliegen einer gesetzlichen Regelung. So werden z. B. stoffliche Emissionen als Wirkfaktor durch zulässige Ableitungsgrenzwerte beschränkt. Im Rahmen des Vorhabens werden die Wirkfaktoren, für die eine gesetzliche Grundlage festgestellt wurde, betrachtet.

Maßstäbe für die Bewertung der Umweltauswirkungen des Vorhabens sind die gesetzlichen Umwelanforderungen. Hinweise ergeben sich aus der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zur Ausführung des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPVwV), die auch eine erste Zusammenstellung der mindestens zu bewertenden Wirkfaktoren ermöglicht:

„Abschnitt 0.6.1.2

Wenn Fachgesetze oder deren Ausführungsbestimmungen für die Bewertung der Umweltauswirkungen eines Vorhabens

- *rechtsverbindliche Grenzwerte enthalten oder*
- *sonstige Grenzwerte oder nicht zwingende, aber im Vergleich zu den Orientierungshilfen in Anhang 1 anspruchsvollere Kriterien vorsehen,*

sind diese Bestimmungen heranzuziehen (§ 4 UVPG).

Soweit dies nicht der Fall ist, sind bei der Bewertung der Umweltauswirkungen die in Anhang 1 UVPVwV angegebenen Orientierungshilfen, die im Hinblick auf eine wirksame Umweltvorsorge (§§ 1, 2 Abs. 1 Satz 2 und 4 UVPG) eine Konkretisierung gesetzlicher Umwelanforderungen darstellen, heranzuziehen. Da die Orientierungshilfen keine Grenzwerte sind, ist bei ihrer Anwendung auf die Umstände des Einzelfalls wie Stand-

ort- und Nutzungsmerkmale abzustellen; die Umstände, insbesondere Abweichungen von den Orientierungshilfen, sind zu erläutern.

Sind Umweltauswirkungen zu bewerten, für die das Fachrecht oder Anhang 1 [Anm.: der UVPVwV] keine Bewertungskriterien enthalten, hat die zuständige Behörde die Umweltauswirkungen nach Maßgabe der gesetzlichen Umweltaanforderungen aufgrund der Umstände des Einzelfalls zu bewerten. Dies gilt nicht für die Bewertung der Umweltauswirkungen solcher Vorhaben, für die die Verwaltungsvorschrift keinen besonderen Teil vorsieht.“

Es wird vorausgesetzt, dass die in einschlägigen Fachgesetzen und Verordnungen beziehungsweise technischen Anleitungen etablierten Maßstäbe den Stand der Technik darstellen.

7.3.1 Wirkmatrix

Für jedes Kompartiment wird das Auftreten eines Wirkfaktors, für die einzelnen Phasen des Lebensweges einer Geothermieranlage identifiziert und eine potentielle Einwirkung auf die identifizierten Schutzgüter überprüft. Die Einwirkung der Wirkfaktoren auf Schutzgüter wird zur besseren Übersicht als Wirkmatrix dargestellt (Tab. 7.1 bis Tab. 7.5). Das Auftreten eines Wirkfaktors und dessen mögliche Einwirkung auf ein Schutzgut erfolgte unter Berücksichtigung des Normalbetriebes während aller Projektphasen eines Geothermievorhabens. Eine detaillierte Beschreibung der Wirkfaktoren erfolgt in Kapitel 7.5.

Während die Wirkmatrix sich bemüht, eine möglichst vollständige Summierung der in der Literatur bekannt gewordenen Wirkfaktoren wiederzugeben, konzentrierten sich die Detailuntersuchungen auf Einzelaspekte.

Wenn der Wirkfaktor ein Schutzgut beeinflusst, wird unterschieden, ob dies temporär (t) oder dauerhaft (d) erfolgt. Dabei wird nur die Einwirkung identifiziert, nicht aber die Folgen. Wenn z. B. Schadstoffe in das Grundwasser fließen, erfolgt dies bei Bohrarbeiten möglicherweise temporär (z. B. Bohrspülung). Wenn durch eine undichte Ringraumzementierung zwei Aquifere überbrückt werden und dies wird nicht bemerkt, ist dies eine dauerhafte Einwirkung.

7.3.1.1 Erkundungsphase

Die Erkundungsphase bezieht sich auf die seismische Vorerkundung, um den lithologischen Schichtenaufbau zerstörungsfrei zu analysieren, mit dem Ziel, Bohrpunkte festzulegen. Probebohrungen werden nicht zur Erkundungsphase gezählt.

Die auftretenden Wirkfaktoren sind im Wesentlichen die Erschütterung des Bodens durch die Vibroseismik und eine daraus resultierende Beeinflussung der Tierwelt und Pedosphäre. Die auftretenden Wirkfaktoren sind temporär (Tab. 7.1).

Tab. 7.1 Wirkmatrix für die Vorerkundung

| Phase | Wirkfaktoren | Schutzgüter | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------------|--------------|---|-------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|-------|-----------------------------|---------|---|--|
| | | Tiefenfluide | Grundwasser (i.w.S. nutzbare TW-Aquifere) | Oberflächenwasser | Gestein, geologischer Untergrund | Boden | Klima | Luft, Atmosphäre | Landschaft, Landschaftsbild | Pflanzen/Biotope | Biologische Vielfalt | Tiere | Mensch, menschl. Gesundheit | Sachgut | | |
| Vorerkundung | Überträge | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Bodenerschütterung | | | | | | | | | | | | t | t | t | |
| | Scheuchwirkung | | | | | | | | | | | | t | | | |
| | Verlust von Bodenfunktionen | | | | | t-d | | | | | | | | | | |

7.3.1.2 Erschließungs- / Bauphase der Anlage

In der Erschließungs- und Bauphase führt insbesondere das Abteufen der Bohrungen zu Auswirkungen, die Schutzgüter oberhalb und unterhalb der Geländeoberfläche beeinflussen können. Die Wirkfaktoren sind im Wesentlichen potentielle stoffliche Emissionen und geomechanische Ereignisse, wie z. B. das Verbinden zweier Aquiferstockwerke (Tab. 7.2).

Tab. 7.2 Wirkmatrix für die Bohrphase

| Phase | Wirkfaktoren | | Schutzgüter | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--|--|--------------------------|---|-------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|-------|-----------------------------|---------|---|--|
| | | | Tiefenfluide | Grundwasser (i.w.S. nutzbare TW-Aquifere) | Oberflächenwasser | Gestein, geologischer Untergrund | Boden | Klima | Luft, Atmosphäre | Landschaft, Landschaftsbild | Pflanzen/Biotope | Biologische Vielfalt | Tiere | Mensch, menschl. Gesundheit | Sachgut | | |
| Bohrphase | Übertage | Verlust von Bodenfunktionen | | t-d | | | | t-d | | | t-d | t-d | | t-d | | | |
| | | Flächenbelegung | | | | | t | | | t | t | t | t | | | | |
| | | Bodenerschütterung | | | | | | | | | | | t | t | t | | |
| | | Visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes | | | | | | | | t | | | | | | | |
| | | Lichtemission | | | | | | | | | | | t | t | | | |
| | | Anfall und Entsorgung von Rest- und Abfallstoffen | Prozesswasser | t-d | t | t | | | | | | | | | | d | |
| | | | Cuttings und Bohrschlamm | | d | d | | d | | | | | | | | | |
| | | Stoffliche Emission in die Luft | Gase | | | | | | | | t | | | | | t | |
| | | | Abgase | | | | | | | | t | | | | | t | |
| | | Schallemissionen | | | | | | | | | | | | t | t | | |
| | Stoffliche Emission in oberflächliche Gewässer | | | | t | | | | | | | | t | t | | | |
| | Stoffliche Emission in den Boden | | | | | | d | | | | d | | d | d | | | |
| | Untertage | Stoffliche Emission in das Grundwasser | | d, t | | | | | | | | | | | d, t | | |
| | | Eintrag von Mikroorganismen in das Grundwasser | | d, t | | | | | | | | | | | d, t | | |
| | | Verlust von Wasser(funktionen) | | d | d | | | | | | | | | | | | |
| | | Geomechanische Ereignisse | | d | d | d | | | | | | | | | | d | |
| | | Hydraulischer Kurzschluss mehrerer Grundwasserstockwerke | | t | | | | | | | | | | | | d | |
| Reservoir | Stoffliche Immission | d | | | d | | | | | | | | | | | | |
| | Eintrag von Mikroorganismen | d | | | d | | | | | | | | | | | | |

Während der Stimulations- und Zirkulationsphase sind seismische Ereignisse der gravierendste Wirkfaktor. Bei der Überschreitung von Bodenschwinggeschwindigkeiten von 0,3 mm/s sind diese seismischen Ereignisse auch an der Geländeoberfläche spürbar (Tab. 7.3).

Bei der Errichtung einer Geothermieanlage treten die üblichen Wirkfaktoren wie bei allen Baumaßnahmen eines Anlagengebäudes auf.

Tab. 7.3 Wirkmatrix für die Stimulations- und Zirkulationsphase sowie für die Errichtung der Geothermieanlage

| Phase | Wirkfaktoren | | Schutzgüter | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|---|--------------|---|-------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|-------|-----------------------------|---------|
| | | | Tiefenfluide | Grundwasser (i.w.S. nutzbare TW-Aquifere) | Oberflächenwasser | Gestein, geologischer Untergrund | Boden | Klima | Luft, Atmosphäre | Landschaft, Landschaftsbild | Pflanzen/Biotope | Biologische Vielfalt | Tiere | Mensch, menschl. Gesundheit | Sachgut |
| Stimulations- und Zirkulations-phase | Übertage | Stoffliche Emission in die Luft | | | | | | t | | | | | | t | |
| | | Verlust von Wasser(funktionen) | | d | d | | | | | | | | | | |
| | | Schallemissionen | | | | | | | | | | t | t | | |
| | | Bodenerschütterung | | | | | | | | | | t | t | (-) | |
| | | Anfall von Rest- und Abfallstoffen | | d | d | | d | | | | | | | | |
| | Untertage | Stoffliche Immission in das Reservoir | d | t | | | | | | | | t,d | t,d | | |
| | | Geomechanische Ereignisse | Subsidenz | | | | | | | | | | t,d | d | |
| | | | Hebung | | | | | | | | | | t,d | d | |
| Errichtung der Geothermie-Anlage | Übertage | Schallemissionen | | | | | | | | | | t | t | | |
| | | Bodenerschütterung | | | | | | | | | | t | t | | |
| | | Flächenbelegung | | | | | d | | d | d | d | d | | | |
| | | Anfall von Rest- und Abfallstoffen | | | | | | | | | | | | | |
| | | Verlust von Wasser(funktionen) | | t | t | | | | | | | | | | |
| | | Visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes | | | | | | | | d | | | | d | |

7.3.1.3 Betriebsphase

Für die Betriebsphase der Geothermieranlage sind die oberflächlichen Wirkfaktoren im Wesentlichen potentielle Schallemissionen (Trockenkühlung, Pumpen). Die unterirdischen Wirkfaktoren sind insbesondere von der Einwirkung auf die Integrität des Verbundsystems aus Verrohrung und Zementation abhängig (Tab. 7.4).

Tab. 7.4 Wirkmatrix für die Betriebsphase

| Phase | Wirkfaktoren | Schutzgüter | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|--|---|-------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|-------|-----------------------------|---------|---|--|
| | | Tiefenfluide | Grundwasser (i.w.S. nutzbare TW-Aquifere) | Oberflächenwasser | Gestein, geologischer Untergrund | Boden | Klima | Luft, Atmosphäre | Landschaft, Landschaftsbild | Pflanzen/Biotope | Biologische Vielfalt | Tiere | Mensch, menschl. Gesundheit | Sachgut | | |
| Betriebsphase | Übertage | Visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes | | | | | | d | d | d | | | | | | |
| | | Schallemissionen | | | | | | | | | | d | d | | | |
| | | Lichtemission | | | | | | | | | | d | d | | | |
| | | Elektromagnetische Felder | | | | | | | | | | d | d | | | |
| | | Verlust von Wasser(funktionen) | | d | d | | | | | | | | | | | |
| | | Stoffliche Emmission in oberflächliche Gewässer | | | t | | t | | | | t | t | t | | | |
| | | Stoffliche Emission in die Luft | | | | | | | d | | | t | t | | | |
| | | Anfall von Rest- und Abfallstoffen | | | | | | | | | | | | d | | |
| | | Akkumulation von NORM: Strahlenexposition | | | | | | | | | | | | d,t | | |
| | | Abgabe von Radionukliden (gasförmig, flüssig, fest) | | | | | | | | | | | t | | | |
| | Thermischer Einfluss - Atmosphäre | | | | | | d | d | | | | | | | | |
| | Untertage | Stoffliche Emmission in den Boden | | t,d | | | t,d | | | | | t,d | t,d | | | |
| | | Thermischer Einfluss Boden | | | | | d | | | d | d | | | | | |
| | | Stoffliche Emission in das Grundwasser | | t,d | | | | | | | | t,d | t,d | | | |
| | | Geomechanische Ereignisse | | | | d | d | | | | | | | | | |
| | | Hydraulischer Kurzschluss (Verbinden mehrerer Grundwasserstockwerke) | | d | | | | | | | | | d | | | |
| | Reservoir | Stoffliche Einträge in das Reservoir | d | | | | | | | | | | | | | |
| | | Kurzschluss zwischen Förder und Injektionsbohrung | | d | | | | | | | | | | | | |
| | | Thermische Beeinflussung des Speichergesteines | d | | | d | | | | | | | | | | |
| | | Geomechanische Ereignisse | Subsidenz | | d | d | | d | | | d | d | d | | d | |
| Hebung | | | | | | d | | | | | | | t | d | | |

7.3.1.4 Rückbauphase

Für die Rückbauphase treten Wirkfaktoren aufgrund kontaminierter Anlagenbauteile auf. Auch hier sind unterirdische Einflüsse vor allem in der Langzeitphase nach Stilllegung der Bohrung von der Integrität des Verbundsystems abhängig (Tab. 7.5).

Tab. 7.5 Wirkmatrix für die Rückbauphase

| Phase | Wirkfaktoren | Schutzgüter | | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------------|---|---|-------------------|----------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------|-------|-----------------------------|---------|--|
| | | Tiefenfluide | Grundwasser (i.w.S. nutzbare TW-Aquifere) | Oberflächenwasser | Gestein, geologischer Untergrund | Boden | Klima | Luft, Atmosphäre | Landschaft, Landschaftsbild | Pflanzen/Biotope | Biologische Vielfalt | Tiere | Mensch, menschl. Gesundheit | Sachgut | |
| Rückbau | Über Tage | Entsorgung radioaktiv kontaminierter Rückstände | | | | | | | | | | | | t | |
| | | Anfall von Rest- und Abfallstoffen | | | | | | | | | | | | t | |
| | Unter Tage | Hydraulischer Kurzschluss | | d | | | | | | | | | | | |

7.3.2 Wechselwirkungen

Die einseitige Betrachtung eines Wirkfaktors auf ein Schutzgut lässt Wechselwirkungen, wie z. B. Schadstoffverlagerungen und damit Auswirkungen auf weitere Schutzgüter außer Acht. Eine adäquate Berücksichtigung von Wechselwirkungen ist notwendiger Bestandteil von Prüfungen, um auch zwischen einzelnen Bestandteilen der Umwelt herrschende Prozesse zu erfassen. Die durch ein Vorhaben verursachten Wirkungen auf ein Schutzgut dürfen nicht nur in direkter Weise bewertet werden, sondern müssen auch Veränderungen von Prozessen und Wirkungsketten Beachtung schenken.

Die GRS ermöglichte die Bearbeitung des hochkomplexen Themas durch interdisziplinäre, bereichsübergreifende Arbeit mit Experten verschiedenster Fachdisziplinen.

7.3.3 Konzept für die Bewertung der Wirkfaktoren

In Anlehnung an UVPG, Anhang 2 (Kriterien für die Vorprüfung des Einzelfalls im Rahmen einer Umweltverträglichkeitsprüfung) Satz 3 werden die möglichen Auswirkungen eines Vorhabens anhand folgender Kriterien beurteilt:

- Ausmaß der Auswirkungen (geographisches Gebiet und betroffene Bevölkerung),
- Etwaiger grenzüberschreitender Charakter der Auswirkungen,
- Schwere und Komplexität der Auswirkungen,
- Wahrscheinlichkeit von Auswirkungen,
- Dauer, Häufigkeit und Reversibilität der Auswirkungen (z. B. vorübergehende, kurz- oder langzeitige oder permanente Wirkungen),
- Positive oder negative Wirkung,
- Vorhandensein von Maßnahmen zur Milderung, Vermeidung oder Ausgleicheung negativer Einwirkungen im Anlagendesign

Für die Bewertung der Wirkfaktoren bzw. die potentiellen Einwirkungen auf Schutzgüter wird zur Abgrenzung bzw. übersichtlichen Darstellung der Wirkfaktoren in Kap. 7.1 erwähnten Projektphasen zugeordnet. Zur räumlichen Abgrenzung wird der Wirkfaktor zudem eingeteilt ob er Schutzgüter an der Geländeoberfläche oder unter der Geländeoberfläche beeinflusst, wobei einige Wirkfaktoren natürlich beiden Bereichen zugeordnet werden können. Im Wesentlichen wird der Normalbetrieb in allen Projektphasen beschrieben. Störfälle werden gesondert aufgeführt.

Für die Bewertung der Wirkfaktoren ist es zudem wichtig, die Standort- und technischen-Faktoren zu berücksichtigen, wie z. B. eine mögliche Verkarstung des Untergrundes, Art des Bohrlochausbaus, angewendete technische Verfahren etc. Diese Bedingungen haben Einfluss darauf ob der Wirkfaktor z. B. ein Schadstoffaustrag global (über das Anlagengelände hinaus) oder lokal (innerhalb des Anlagengeländes) auftritt. Eine scharfe Abgrenzung der Begriffe global und lokal kann nur oberhalb der Geländeoberfläche erfolgen. Unterhalb der Geländeoberfläche ist dies aufgrund der räumlichen Ausdehnung des Einzugsgebietes der Förder- und Injektionsbohrung nicht möglich.

Unter der Zugrundelegung der gesetzlichen Vorschriften und Grenzwerte kann unter den oben genannten Bedingungen eine „Einwirkungen auf das Schutzgut“, „Beeinträchtigung des Schutzguts“ oder „Schutzgutverletzung“ unter der Einwirkung eines Wirkfaktors vorliegen oder nicht. Wird eine Einwirkung auf das Schutzgut identifiziert, kann eine Gegenmaßnahme zur Vermeidung oder Milderung des Wirkfaktors erfolgen. Zeigt die Gegenmaßnahme Wirkung und die gesetzlichen Vorgaben können eingehalten werden, kann der Wirkfaktor vernachlässigt werden. Wenn die Gegenmaßnahmen keine Wirkung zeigen und der Wirkfaktor nicht vernachlässigt werden kann, müssen andere Maßnahmen erfolgen, wie z. B. eine Veränderung der angewendeten Technik bzw. Verfahrens.

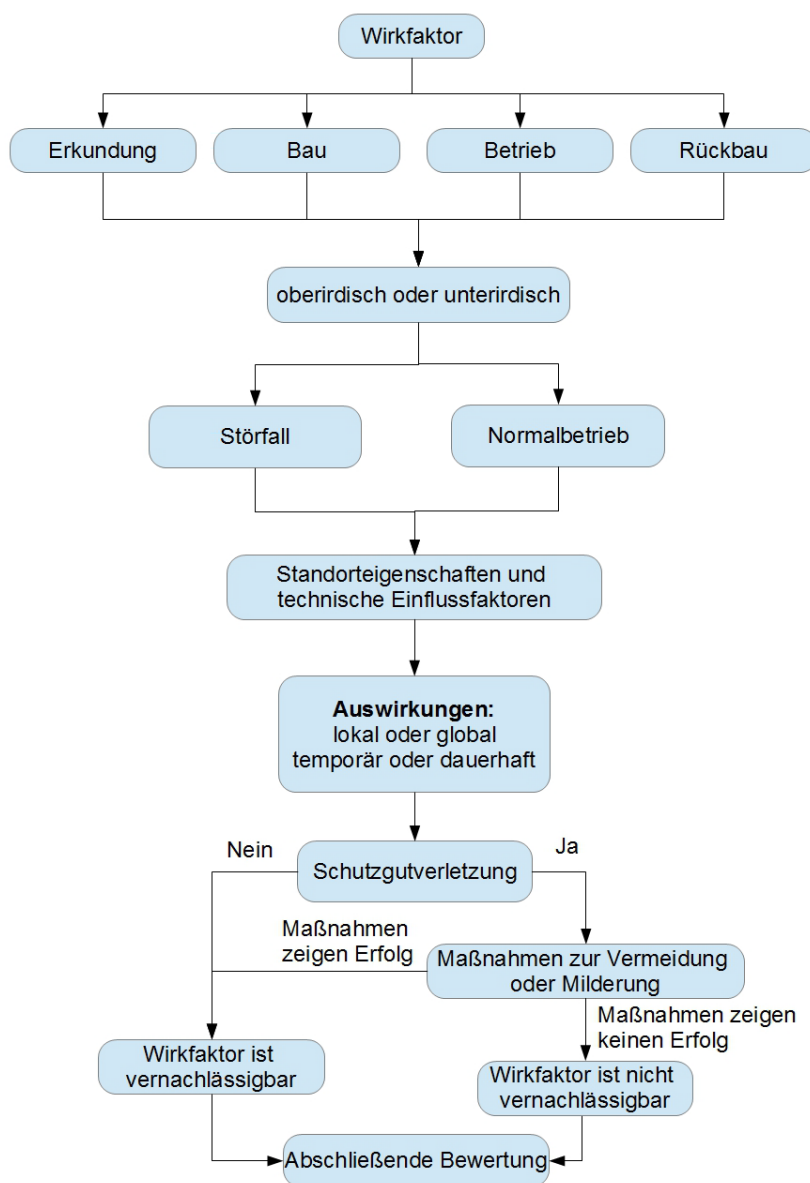


Abb. 7.3 Schematische Darstellung der Bewertung eines Wirkfaktors

7.4 Transportpfade für Schadstoffe

In diesem Kapitel werden die Emissionspfade identifiziert und beschrieben, die einen Transport von Schadstoffen in die Schutzgüter Boden und Grundwasser ermöglichen können. Die zitierte Literatur stammt größtenteils aus der E&P-Industrie und der Untersuchung von Bohrungen und Lagerstätten zur Speicherung von CO₂ (CCS – Carbon Capture and Storage). Da in der Tiefengeothermie eine Förderung und Injektion von Thermalwasser und nicht von Gasen stattfindet, ist die Problematik bei der Gasspeicherung gravierender, weil hier das Gas in der Lagerstätte und dem Deckgebirge schneller durch Fließpfade migrieren kann. Viele Prozesse können jedoch auf Geothermie-Bohrungen übertragen werden.

Der Transport von Schadstoffen von tiefen Aquifersystemen in oberflächennahe Aquifere ist vom Transportpfad sowie zahlreichen anderen Prozessen abhängig, welche die Wechselwirkungen zwischen tiefen und oberflächennahen Aquiferen steuern.

Aquifere sind aufgrund der Wechsellagerung verschiedenere Gesteinsschichten, insbesondere trennende Tonschichten (Grundwasserhemmer) in verschiedene Stockwerke unterteilt (Abb. 7.4). In der Regel findet man eine klare hydrogeologische Zweigliederung in oberflächennahe Aquifere mit nutzbaren Süßwässern und tiefe Aquifere mit häufig salinaren Wässern vor. Die oberflächennahen Aquifere werden von meteorischen Wässern gespeist. Die salinaren Tiefenwässer sind z. B. im Norddeutschen Becken überwiegend basinalen Ursprungs und stehen in der Regel nicht in Verbindung mit den oberflächennahen Aquiferen. Wenn zwei Aquifere durch einen Grundwasserhemmer getrennt sind kann ein advektiver Fluss nur über Störungen bzw. Verwerfungen stattfinden (Abb. 7.4).

Für die Bewertung einer potentiellen Migration von Schadstoffen in Schutzgüter, ist es entscheidend, welche Prozesse dazu führen, die Grundwasserhemmer zu überbrücken.

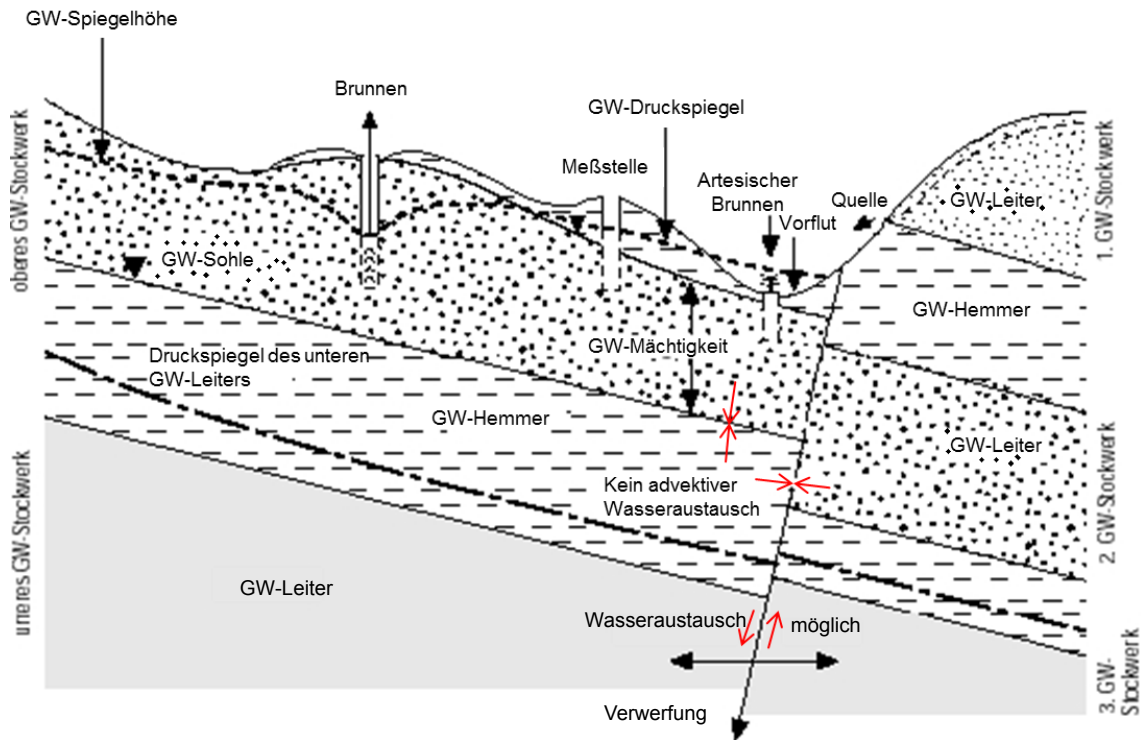


Abb. 7.4 Grundwasserstockwerke

Der grau dargestellte GW-Leiter (GW = Grundwasser) stellt den Tiefenaquifer dar, darüber befinden sich die oberflächennahen GW-Stockwerke, welche vom Niederschlagswasser gespeist werden (verändert nach /MAT 03/).

In der Abb. 7.5 /MEI 12a/ sind die potentiellen Transportpfade für Schadstoffe insbesondere in das Grundwasser dargestellt. Im Folgenden werden diese Pfade näher erläutert:

- **Pfad 0:** Oberflächlicher Schadstoffeintrag in Oberflächengewässer, den Boden und in das Grundwasser durch die Lagerung und Verwendung wassergefährdender Chemikalien während der Bohrung bzw. der Stimulation an der Oberfläche.
- **Pfad 1:** Aufstieg von Fluiden entlang erstellter Bohrungen (Verrohrung / Zementation) bzw. von Altbohrungen. Durch eine undichte Ringraumzementierung wird eine hydraulische Verbindung zwischen verschiedenen Grundwasserstockwerken hergestellt.
- **Pfad 2:** Aufstieg von Fluiden entlang von Störungen. Die Bildung/Reaktivierung von Fließpfaden im Untergrund durch Stimulationsmaßnahmen und damit mög-

licherweise einhergehender Verbindungen von natürlichen Kluft- und Aquifersystemen bis in oberflächennahe Grundwasserleiter.

- **Pfad 3:** Diffusiver Aufstieg von Fluiden durch überlagernde Schichten und die laterale Ausbreitung von Schadstoffen in einem Aquifer, ohne besondere Fließpfade.

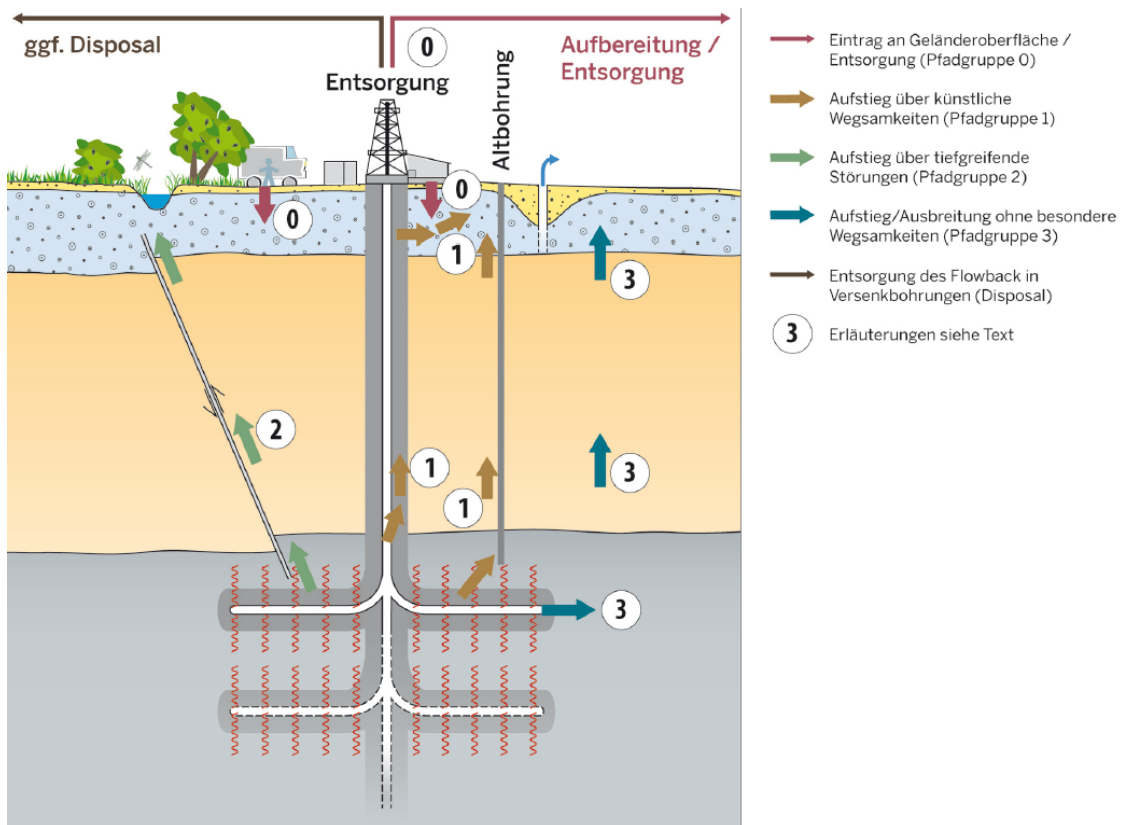


Abb. 7.5 Schematische Darstellung potentieller künstlicher und geologischer Fließpfade /MEI 12a/

7.4.1 Pfad 0: Oberflächlicher Schadstoffeintrag

Die Pfadgruppe 0 beinhaltet den oberflächlichen Stoffeintrag in den Boden sowie in Grund- und Oberflächenwasser. Während des Bohrbetriebes werden viele (Schad)Stoffe an der Oberfläche gelagert. Um ein großes Volumen dieser Stoffe freizusetzen, ist in der Regel ein Versagen von technischen Anlagenbauteilen erforderlich, deshalb muss besonders in dieser Pfadgruppe zwischen Normalfall und Störfall unterschieden werden.

7.4.2 Pfad 1: Fließpfade entlang von Bohrungen

Die Pfadgruppe 1 umfasst Schadstoffemissionen durch Bohrungen, bei denen die Bohrlochintegrität verletzt ist. Im Wesentlichen können zwei Fließpfade entstehen:

- Vertikaler Fluidfluss entlang des Ringraumes zwischen der Verrohrung und dem Gestein bei Versagen der Zementierung
- Horizontaler Fluidfluss aus dem Inneren der Verrohrung in den Ringraum, aufgrund des Versagens der Verrohrung

Bei Vorhaben, wie der Speicherung von CO₂ (CCS) oder Fluiden in tiefen geologischen Gesteinsschichten vor allem in der E&P-Industrie, und dem darauf folgenden Rückbau und Verschließen alter Bohrungen ist der Erhalt der Integrität von Bohrungen von großer Bedeutung. Überall, wo gesundheitsgefährdende Stoffe durch Bohrungen gefördert werden, muss das Verbundsystem Verrohrung-Zement-Gestein dicht gegenüber einem Fluidfluss im Ringraum sein, damit keine schädlichen Stoffe in die Umwelt gelangen bzw. Aquifere nicht künstlich hydraulisch miteinander verbunden werden (Abb. 7.6). Die Integrität einer Bohrung ist gewährleistet, wenn keine Leckagen an der Verrohrung, dem Tubing und den Packern vorliegen bzw. wenn kein vertikaler Fluidtransport im Ringraum der Bohrung stattfindet /SAU 12/.

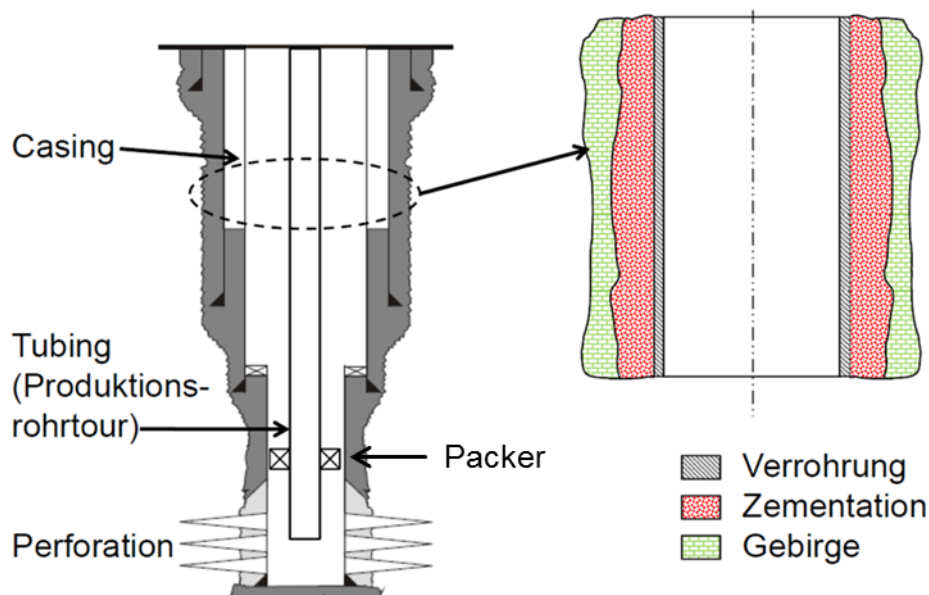


Abb. 7.6 Das Verbundsystem Verrohrung-Zement-Gestein (verändert nach /FIC 08/)

In der Abb. 7.7 sind im Detail mögliche Fließpfade in und entlang eines verrohrten und zementierten Bohrloches dargestellt. Folgende Fließwege sind denkbar:

- f) Fluidtransport entlang eines Zwischenraums zwischen der Verrohrung und der Zementation
- g) Fluidtransport entlang eines Zwischenraums zwischen der Verrohrung und der Verfüllung. Dies tritt nur bei aufgegebenen verfüllten Bohrungen auf
- h) Fluidtransport durch die Matrix des Füllmaterials
- i) Fluidtransport je nach Druckpotenzial in die oder aus der Verrohrung heraus durch Korrosion der Verrohrung
- j) Fluidtransport entlang von Rissen und Klüften der Zementation
- k) Fluidtransport entlang des Zwischenraumes zwischen Gebirge und Zementation

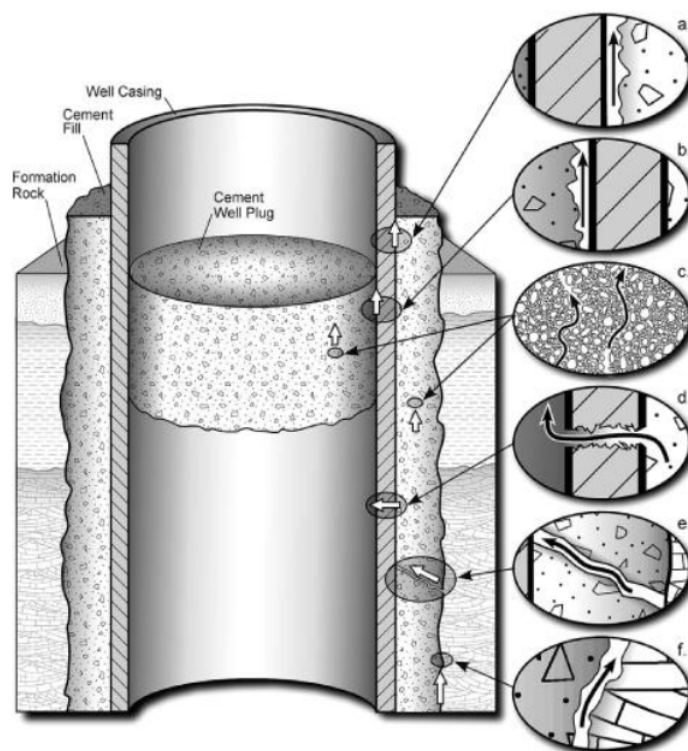


Abb. 7.7 Schematische Darstellung einer verrohrten und versiegelten Bohrung

In der Betriebsphase befindet sich kein Zementstopfen in der Verrohrung. Dargestellt sind die möglichen Fließpfade durch das Verbundsystem Verrohrung (well casing), Zement (cement fill) und Gestein (formation rock) /CEL 04/.

7.4.2.1 Versagensmechanismen

Die Bohrlochintegrität kann durch verschiedene Prozesse beeinflusst werden. Die chemische Korrosion sowie mechanisch-thermische Beanspruchungen der Verrohrung und des Zementes können zu Rissen und Klüften und somit zu Wegsamkeiten für Fluide führen. Vor allem aber führen Herstellungsdefizite beim Bohrlochausbau, sowie eine falsche Materialauswahl zu einer unzureichenden Bohrlochintegrität, deren Auswirkungen meistens erst nach Jahren zum Tragen kommen. In der Abb. 7.8 sind die verschiedenen Schadensmechanismen schematisch dargestellt.

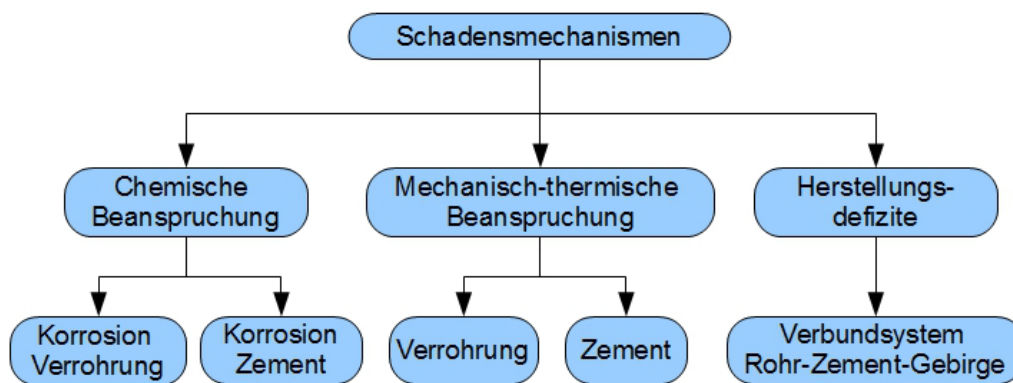


Abb. 7.8 Darstellung der unterschiedlichen Schadenmechanismen, welche die Bohrungsintegrität beeinflussen (verändert nach /STR 09/)

7.4.2.1.1 Chemische Beanspruchung

Die Integrität von Bohrungen kann im Laufe der Zeit durch Korrosion der Verrohrung oder durch Alteration des Zementes versagen.

Verrohrung

Die Metallkorrosion nimmt bei der Anwesenheit von Wasserstoff- und Sulfationen bei pH-Werten < 7 stark zu. Gase wie z. B. Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid und Ammoniak verursachen Spannungsrisskorrosion und einen flächenhaften Materialabtrag. Die Anwesenheit von Sauerstoff und Metallen begünstigt ebenfalls die Korrosion /BAC 12/.

Zusätzlich treten unterschiedliche Korrosionsformen der Verrohrung auf, wie z. B. Lochfraßkorrosion, Spaltkorrosion und elektrochemische Korrosion, die auf bestimmte korrosive Wasserinhaltsstoffe zurückgeführt werden können /SCR 09/.

Zementierung

Die Integrität der Ringraumzementierung kann durch Zementkorrosion beeinträchtigt werden. Wichtige Einflussgrößen bei der Zementkorrosion sind der Druck, die Temperatur, die Hydrodynamik und die Zusammensetzung der Fluide, die mit den Werkstoffen in Kontakt stehen. Die Zerstörung der Zementmatrix ist verbunden mit einem Verlust an Druckfestigkeit und einer Zunahme der Permeabilität und Porosität.

Die Zusammensetzung der Zementsuspension und der angreifenden Lösungen (z. B. Grundwasser, NaCl- oder $MgCl_2$ -reich) entscheidet über die Korrosions- bzw. Auflösungsrate. Prinzipiell handelt es sich dabei jedoch immer um die Auflösung bzw. Veränderung von Mineralphasen des Bindemittels (Zement) in der Zementstruktur, einer damit verbundenen Schwächung der Festigkeit und eine Veränderung der Porosität bzw. Permeabilität des Zementes.

Der Ablauf der Zementkorrosion wird von thermodynamischen und kinetischen Prozessen bestimmt, da viele der entstehenden Phasen zunächst als gelartige, amorphe Strukturen ausfallen und erst mit der Zeit kristallin werden. Die thermodynamische oder kinetische Datenbasis bzgl. der sich bildenden Mineralphasen ist gering. Nur im Zusammenhang mit den bisherigen Untersuchungen zur Langzeitsicherheit bei der Endlagerung von radioaktiven Abfällen ist die Kinetik der Zementkorrosion nur sehr vereinfacht betrachtet worden /SEH 12/.

Die Zementkorrosion unterscheidet einen lösenden und einen treibenden Korrosionsangriff. Bei der lösenden Korrosion wird durch wasserlösliche Reaktionsprodukte der Zementstein von dessen Oberfläche her gelöst. Begünstigt wird die lösende Korrosion laut /SCI 12/ durch:

- Säuren (CO_2 , H_2SO_4 u. a.),
- Chloride (z. B. Magnesiumsalze) und
- Nitrate.

Bei der treibenden Korrosion (Alteration) wird durch Reaktionsprodukte ein Quelldruck im Zement aufgebaut, der zur Festigkeitsminderung des Zements führt. Die treibende Korrosion wird durch folgende Prozesse begünstigt:

- Sulfatangriff (sekundäre Mineralbildung von Ettringit sowie Gipsbildung)
- Alkali-Kieselsäure-Reaktion

In Versuchen unter stationären Gleichgewichtsbedingungen zwischen Zement und einem Fluid liegen die Korrosionsraten von verschiedenen Zementen in Bereichen von < 0,1 bis 1,3 mm/d. Unter dynamischen Bedingungen liegen die Korrosionsraten um zwei Größenordnungen höher /STR 09/.

Auch nach Alteration des Zementes sollte auf ausreichend langer Strecke die Mindestdruckfestigkeit von > 3 MPa und eine maximale Permeabilität von 0,1 mD sichergestellt sein. Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Zementzersetzungsrate sind /SCI 12/:

- Typ und Menge der hydratisierten Phasen:
Die Korrosionsrate nimmt mit zunehmendem Gehalt an Portlandit zu.
- Typ und Menge der Zementadditive:
Zement-Zusätze, wie Bentonit und Gips, haben negative Auswirkungen auf die Zement-Lebensdauer.
- Zementherstellung:
Die Zementkorrosionsrate nimmt mit einem höheren Wasser-Zement Verhältnis zu.
- pH-Wert:
Die Korrosionsrate nimmt mit abnehmendem pH-Wert zu.
- Saure Phasen:
Durch CO₂ findet eine Umwandlung der alkalischen Bestandteile des Zementsteines in Calciumcarbonat statt (Karbonatisierung).
- Temperatur und Druck:
Die Korrosion der Zementprodukte wird bei hohen Temperaturen deutlich beschleunigt.

Von /STR 09/ werden neue Wege bei der Zementierung von CO₂ Speicherbohrungen zusammengefasst.

- Der Einsatz von Zementsystemen höherer Elastizität.

- Die Nutzung von Zementsystemen mit speziellen Additiven und/oder kleineren Anteilen von Portland- Zement, um die Zementbeständigkeit zu erhöhen.
- Der Einsatz von Zementsystemen ohne Calcium, das durch CO₂ zu einem Karbonat umgewandelt werden kann: Einsatz von Calcium-Phosphat-Hydraten sowie Calcium-Aluminosilikaten.

In der Abdichtung des Ringraumes können z. B. arteigene Abdichtungsmaterialien wie Ton oder Salz verwendet werden. Diese verhalten sich plastisch und können anders als der spröde Zement entstandene Risse und Klüfte wieder verheilen.

7.4.2.1.2 Mechanisch-thermische Beanspruchung

Nach dem Bohrlochausbau ist das Verbundsystem aus Verrohrung und Zement extremen Spannungen durch unterschiedliche Druck- und Temperaturbedingungen ausgesetzt. Dadurch können Ablösungen (Debondings) an der Grenzfläche Gestein/Zement oder Zement/Rohr auftreten /STR 09/.

/TEO 12/ führte Simulationen des Spannungsfeldes im Kontaktbereich der Verrohrung und des Zementes durch. Die Simulationen haben zu folgenden Schlussfolgerungen geführt:

- Spannungsänderungen verursachen Risse im Zement.
- Temperaturveränderungen in der Verrohrung führen zu hohen Spannungen aufgrund der Kontraktion oder der Ausdehnung im Verbundsystem.

Die Förderung von Thermalwasser oder Prozessfluiden mit unterschiedlichen Temperaturen und Drücken führt zu Änderungen der Länge bzw. des Durchmessers einer Verrohrung und damit eventuell zur Schädigung der Zementation. Durch vorrauschaufendes Planen sollten gravierende Temperatur- und Druckänderungen in der Verrohrung vermieden bzw. reduziert werden. Bei Wartungsarbeiten an der Anlage sollte z. B. das Thermalwasser trotzdem weiter gefördert werden, um ein Auskühlen der Bohrung zu verhindern. Dies ist bereits ein gängiges Verfahren bei Geothermieranlagen.

Aufgrund des hohen Drucks während der hydraulischen Stimulation besteht das Risiko, dass die Ringraumzementierung sowie die Verrohrung bei falscher Auslegung und unsachgemäßem Ausbau diesem Druck nicht standhalten. Nach jeder Stimulations-

maßnahme wird deshalb die Zementierung durch eine hydraulische Druckprüfung überprüft, um die Integrität des Verbundsystems sicherzustellen.

Um das bestmögliche Bohrloch- und Verrohrungsdesign auf die auftretenden Spannungen und daraus resultierenden Belastungen auszulegen, muss im Vorfeld durch Bohrloch-Loggings und Spannungsanalysen im Bohrloch eine diesbezügliche Datengrundlage geschaffen werden.

Nach /DUS 01/ entstehen Schädigungen an der Verrohrung durch Scherung, wenn weiträumig induzierte Spannungsänderungen im Gestein um die Bohrung auftreten. Diese Spannungsänderungen können durch die Reaktivierung alter Störungen, hydraulische Stimulationsmaßnahmen oder durch eine massive Feststoffproduktion aus der Lagerstätte entstehen. Die Lithostratigraphie und der Initiale Spannungszustand haben einen starken Einfluss auf das Ausmaß der Scherung. Der einzige Weg, diese Faktoren zu quantifizieren, ist eine geomechanische 3D-Modellierung. Spannungsfeldmodellierungen ermöglichen die Beurteilung der Bewegungsrichtung, der Geschwindigkeit und des Ausmaßes der Deformation von Scherzonen. Die Modellergebnisse können zudem verwendet werden, um Bohrstrategien zu entwickeln.

/SCI 12/ fasst nochmal die Prozesse zusammen, die zum Scherversagen einer Bohrung führen können:

- Eine Kompaktion des Speichergesteines im Reservoir kann zu Bewegungen an Grenzflächen im Deckgebirge führen. Eine Reservoir-Kompaktion kann durch die Porendruckreduktion aufgrund der Thermalwasserförderung, Abkühlen der Lagerstätte und die Gebirgslast ausgelöst werden. Durch den Setzungsvorgang können alte Störungen reaktiviert oder neue gebildet werden. Wenn diese Störungen durch die Bohrung verlaufen, werden Scherkräfte über den Zement an die Verrohrung übertragen. Es wird angenommen, dass dies ein langsamer Prozess ist. Kurzzeitige Porendruckänderungen durch Stimulationsmaßnahmen werden wahrscheinlich nicht im Deckgebirge wirksam. Ein größeres Problem stellen induzierte Beben da. Wenn durch Erdbeben alte Störungen reaktiviert werden, kann dies zu einem geringen Versatz von Scherflächen führen.
- Einknicken und Abscherung der Verrohrung im Produktionsbereich.

Folgende Möglichkeiten bestehen, um die Wahrscheinlichkeit von Verrohrungsschäden durch Scherversagen zu verringern /SCI 12/:

- Die Vermeidung des Erbohrens von kritischen Scherzonen:
Dies ist in der Geothermie nicht immer möglich, weil bevorzugt Klüfte und zerrüttete Zonen aufgrund deren höheren Gebirgspermeabilität angebohrt werden. Eine Möglichkeit wäre, die Bohrungen parallel zu Störungszonen abzuteufen.
- Erhöhung der Festigkeit des Verrohrung-Zement-Systems:
Verbesserungen konnten nur in weichen und porösen, plastisch fließenden Gesteinen (z. B. Tonen) erreicht werden. Darin verteilt sich die Scherung, so dass es nur zu geringeren Deformationen der Verrohrung und der Zementierung kommt. Modellberechnungen und Feldbeobachtungen zeigten jedoch, dass je steifer die Verrohrung und der Zement ausgelegt werden, desto eher kommt es in kompetenten Gesteinen zum Aufbau von Scherspannungen, wenn eine Störung durch die Bohrung verläuft, und damit zu einem Versagen des Verbundsystems.
- Erhöhung der Elastizität des Verbundsystems:
Keine Zementierung in Scherzonen bzw. Verwendung eines duktilen Zements. In der Erdöl- und Erdgasfördertechnik hat sich bewährt, den Bohrlochdurchmesser in Scherzonen zu vergrößern (Underreaming) (Abb. 7.9, rechts). Zudem kann ein größerer Verrohrungsdurchmesser gewählt werden, um eine größere Deformation zu ermöglichen, bevor der Förderstrang berührt wird (Abb. 7.9, links)

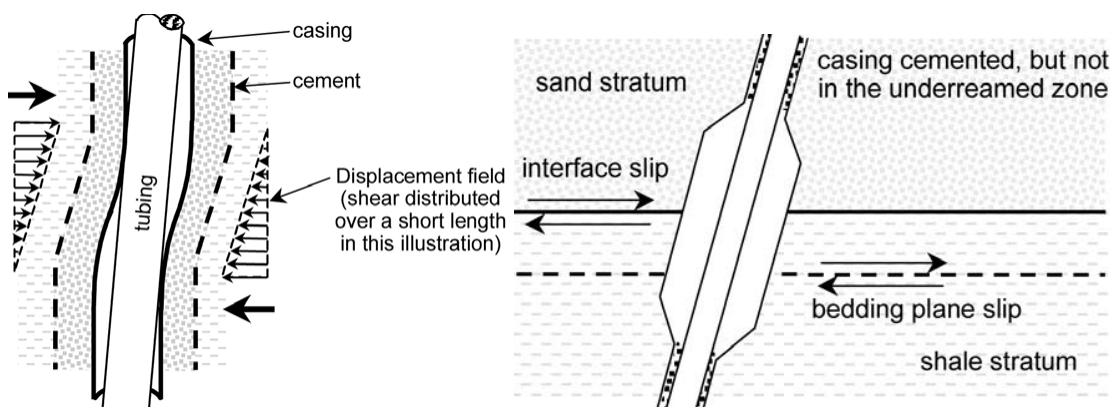


Abb. 7.9 Verformung der Verrohrung im Falle einer Scherspannung

Durch die Vergrößerung des Verrohrungsdurchmessers wird der Verformungsraum erhöht (links). Durch eine Vergrößerung des Bohrlochdurchmessers wird mehr Verformungsraum gegeben, bis die Verrohrung ebenfalls verformt wird (rechts) /DUS 01/.

- Druckerhaltungsmaßnahmen:
Um die Kompaktion der Lagerstätte auf ein Minimum zu begrenzen, sollten gleichzeitig mit der Förderung von Fluiden aus der Lagerstätte Fluide zur Erhaltung des Reservoir-Druckes reinjiziert (zurück gepumpt) werden.

Um bei Stimulationsmaßnahmen die Bohrungsintegrität zu gewährleisten, empfiehlt /SCI 12/ vor und nach einer hydraulischen Stimulation folgende Untersuchungen, Messungen bzw. Maßnahmen:

- Möglichst vollständige Erfassung der Störungssysteme und ihrer Orientierung im Untergrund sowie deren mögliche Entwicklung durch Stimulationsmaßnahmen.
- Modellierung der Rissausbreitung (Ausdehnung und Orientierung) vor einer Stimulationsmaßnahme.
- Stimulation außerhalb potenzieller Scherhorizonte (in der Geothermie nur bedingt durchführbar).
- Prüfung der Bohrungs-Integrität vor und nach der hydraulischen Stimulation.
- Erstellung eines Monitoring-Konzeptes im Hinblick auf:
 - seismisches Monitoring während der Stimulation zur Detektion der Seismizität bzw. Rissausbreitung (ggf. muss die Stimulation abgebrochen werden, wenn die Gefahr besteht, dass eine Scherzone, die durchörtert wurde bzw. in der Nähe der Bohrung verläuft, reaktiviert werden könnte und die Bohrung beschädigt)
 - Überwachung der Ringraumdrücke.
- Ausgeglichene Produktionsstrategie während des Anlagenbetriebes, damit starke Druck- und Temperaturunterschiede durch Produktion und Injektion vermieden werden

7.4.2.1.3 Herstellungsdefizite

Viele der in Bohrungen beobachteten Integritätsprobleme sind nicht auf mechanische, thermische oder chemische Belastungen, sondern auf Herstellungsdefizite beim Bohrlausbau zurückzuführen /STR 09/.

Verrohrung

Mögliche Herstellungsdefizite bzgl. der Verrohrung werden hervorgerufen durch:

- unsachgemäße Materialauswahl,
- unsachgemäße Verbinder-Auswahl,
- falsche Verschraubungen,
- falsche Verbinderfette,
- unzureichende Qualitätssicherung bei der Verrohrung.

Zementierung

Die Zementation des Ringraumes ist ein wichtiges Element zur Abdichtung der Bohrung. Bereits beim Einbringen des Zementes können viele Fehler gemacht werden. Schädigungen der Zementation und eine damit verbundene erhöhte Permeabilität entstehen durch:

- falsche Zementrezeptur (Korrosionsbeständigkeit),
- eine verfrühte Aushärtung,
- unzureichende Bohrspülungsverdrängung,
- Feststoffsedimentation oder freies Wasser in der Zementsuspension,
- keine Zentrierung der Verrohrung im Bohrloch,
- mangelhafte Bohrlochreinigung bzw. Entfernung des Filterkuchens (Abb. 7.10, rechts),
- Zementschrumpfung (Abb. 7.10, links) und
- unzureichende Abbindezeit vor Fortsetzung des Bohrvorganges.

Dadurch kann der Zement keine optimale Anbindung an die Verrohrung bzw. das Gestein ausbilden. Zudem können durch zu starkes Verpressen des Zementes beim Einbringen in den Ringraum sowie durch Volumenänderungen des Zementes beim Aushärten Spannungsrisse im anstehenden Gestein induziert werden, die eine erhöhte Gebirgspermeabilität hervorrufen (Auflockerungszone).

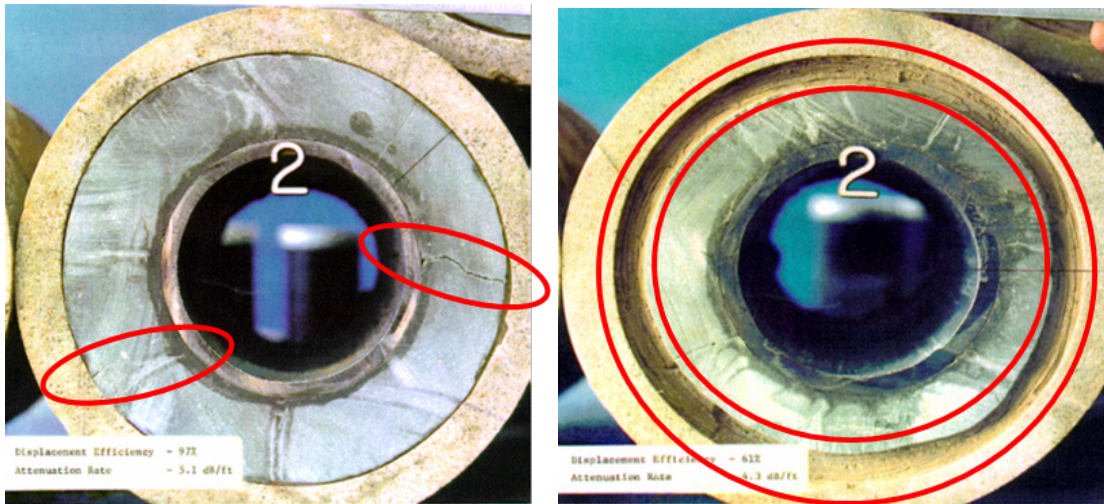


Abb. 7.10 Linke Abbildung: Durch Zementschrumpfen können Risse im Zement entstehen (rote Kreise). Rechte Abbildung: Unzureichend entfernter Filterkuchen (Bereich zwischen den roten Kreisen) /CRE 06/

Die Verwendung von Zentralisatoren soll die Verrohrung im Bohrloch zentrieren und damit eine ausreichende Zementschicht im einheitlichen Ringraum zwischen Verrohrung und Gebirge garantieren. Hierzu sind an den Rohren alle 3 m Abstandshalter an der Außenseite einzubauen /OST 08/. Zudem muss der Bohrllochdurchmesser groß genug sein, damit die Zementierung zwischen Verrohrung und Gebirge eine ausreichende Mächtigkeit aufweist.

In der Abb. 7.11 sind Mechanismen, die zum Versagen der Zementation führen, schematisch dargestellt:

- a) Fehlerhafte Anbindung des Zementes an das Gestein durch Kontraktion des Zementes,
- b) Fehlerhafte Anbindung des Zementes an die Verrohrung durch Kontraktion der Verrohrung,
- c) Bildung von Rissen im Zement durch Zementschrumpfung,
- d) Ausdehnung der Verrohrung durch hohe Innendrucke, thermische Ausdehnung oder durch plastische Deformation.

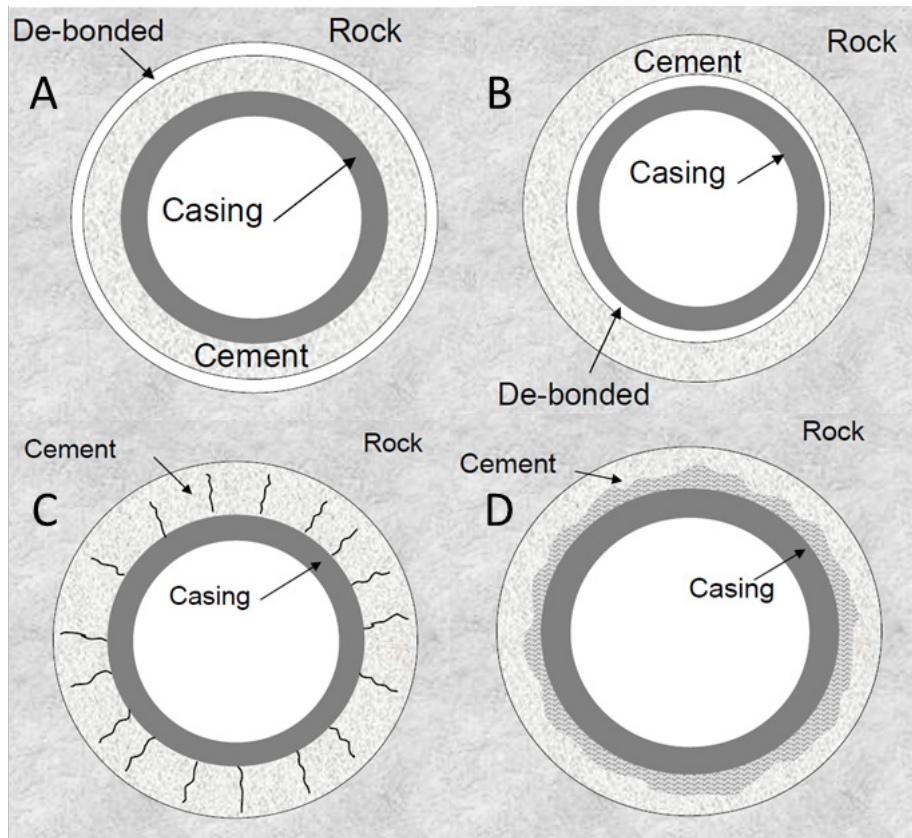


Abb. 7.11 Mechanische Prozesse die zum Versagen der Zementation führen (verändert nach /PET 03/)

Zur Vermeidung von Prozessen, die zum Versagen der Zementation führen, können folgende Maßnahmen durchgeführt werden:

- Modellierung der durch die Temperatur- und Druckbedingungen im Untergrund zu erwartenden Belastungen.
- Erfassung von Verlusten durch Abfließen in Hohlräume durch die Berechnung des benötigten Zementvolumens , wenn die geforderte Zementsäule nicht erreicht wird.
- Einstellen des Zementes auf die mit Hilfe der Bohrlochloggings gewonnenen Daten (gasführende Gesteinsschichten, Chemismus der anstehenden Wässer, Druck und Temperaturbedingungen, Verlustzonen) im Untergrund. /BEN 04/ gibt z. B. Beispiele für Zementrezepturen, die widerstandsfähiger gegen Schrumpfprozesse sind.

7.4.2.2 Integritätsprüfung

Nach erfolgter Zementierung jedes einzelnen Bohrabschnittes werden die Qualität des Zementes und damit das Verbundsystem (Verrohrung-Zementation-Gebirge) überprüft. Es stehen nur indirekte Prüfverfahren zur Qualitätsprüfung der Zementation zur Verfügung. Dazu werden verschiedene Messinstrumente in die Verrohrung eingelassen, mit denen z. B. folgende Untersuchungen möglich sind /SCI 12/:

- Anbindung des Zementes an die Verrohrung und das umgebende Gestein (cement bond log (CBL))
- Temperaturmessungen in der Verrohrung (Lokalisierung der Zementierung beim exothermen Abbinden des Zementes)
- Leak Off Tests (Druckdichtigkeit der Rohrtour inkl. Zementation)

Bei einem Zement-Bond-Log wird eine Ultraschall-Messsonde in das Bohrloch abgelassen. Sind Fehlstellen im Zement oder an der Grenzfläche Stahl-Zement, bzw. Zement-Gestein vorhanden, werden die Ultraschallwellen stärker reflektiert als im intakten System /SCI 12/.

Durch das exotherme Abbinden des Zementes, erwärmt sich die Verrohrung um 1 – 3 °C. Aus dem Temperaturlog kann die Höhe der Zementsäule aber auch die radiale Mächtigkeit der Zementierung abgeleitet werden.

An die Zementierung werden bestimmte Anforderungen gestellt, damit das Verbundsystem hydraulisch als dicht bezeichnet werden kann. Die Mindestzementationsstrecke und deren Qualität wird über einen entsprechenden Bond-Index festgelegt /MEI 12a/.

Nach API Richtlinie „Hydraulic Fracturing Operations - Well Construction and Integrity Guidelines“ soll der Zement um den Futterrohrschuh eine Druckfestigkeit von mindestens 3,44 MPa aufweisen und bei Bohrlochsohlen-Bedingungen in 48 Stunden eine Druckfestigkeit bis 8,27 MPa erreichen /API 09/.

Die Wasserdurchlässigkeit sollte nicht höher sein als $1E-4 \text{ m}^2$ /SAL 13/. Allerdings sollte die Druckfestigkeit für den Zement des Förderrohrs so ausgelegt werden, dass er die zu erwartenden Fluiddrücke der Lagerstätte und bei Frackmaßnahmen standhält.

Ob die Durchlässigkeit des Zementes den Anforderungen entspricht, kann durch einen so genannten „Leak Off Test“ überprüft werden. Dazu wird ein Fluid in das Bohrloch gepumpt und der damit einhergehende Druckaufbau registriert. Bleibt der Druck konstant, ist das System technisch dicht /SCI 12/.

7.4.2.3 Versiegelung von Bohrungen

Im Anlagenbetrieb wird davon ausgegangen, dass sich durch die Entnahme von Thermalwasser ein Potenzialunterschied des Druckes zwischen der Förder- und Injektionsbohrung einstellt, wodurch sich das Thermalwasser bevorzugt zwischen den Bohrungen bewegt und nicht entlang einer möglichen Wegsamkeit im Gebirge aufsteigt. Nach Beendigung des Betriebes und Aufgabe der Bohrung werden sich i. d. R. wieder die ursprünglichen Druckverhältnisse in der Lagerstätte einstellen.

In Deutschland werden der Rückbau und die Versiegelung von stillgelegten Bohrungen durch das Bundesberggesetz (/BDJ 80/), die Tiefbohrverordnung (u. a. /NRW 06/) und die DVGW Richtlinie W 135 /DVG 98a/ zur Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermeßstellen und Brunnen geregelt.

Grundsätzlich ist eine Rückbaumaßnahme immer unter dem Gebot des dauerhaften Schutzes des Grundwassers vorzunehmen. Die Entscheidung über die zu wählende Rückbauvariante ist eine Einzelfallentscheidung, die von den natürlichen oder gestörten Lagerungsverhältnissen, vom Kenntnisstand über den Ausbau der Bohrung sowie mögliche Kontaminationsgefahren durch hydraulische Kurzschlüsse abhängt. Der Rückbau von Bohrungen muss entsprechend den hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Standortbedingungen so erfolgen, dass die dichtende Wirkung von hydraulisch wirksamen Trennschichten (d. h. Grundwasserstauer und -hemmer) durch die Rückbaumaßnahme erhalten bzw. wiederhergestellt wird /IHL 09/.

Die Anforderungen an die Materialien für die Versiegelung einer Bohrung sind nach /NAG 02/:

- Ausreichende Festigkeit
- Ausreichende Duktilität
- Quellfähigkeit, um das Ausfüllen von Hohlräumen zu gewährleisten

- Geringe Durchlässigkeit
- Langzeitstabilität gegenüber korrosiven Fluiden

7.4.2.4 Aufgetretene Schadensfälle

Bislang gibt es noch keine aussagekräftigen Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Bohrungsintegrität von Geothermie-Bohrungen in Deutschland. Die Tiefengeothermie ist in Deutschland eine junge Technologie, weshalb die Betriebserfahrungen noch gering sind. Die Erfahrungen zur Bohrlochintegrität in Geothermie-Projekten aus anderen Ländern und anderen Disziplinen, wie der P&E-Industrie sind nur bedingt übertragbar. Die Integrität von Bohrungen ist von vielen Faktoren, wie der Art des Betriebes, von den geförderten bzw. injizierten Fluiden, von den geologischen Verhältnissen aber auch von den regulatorischen Vorgaben abhängig. Weiterhin besitzt jedes Land eigene regulatorische Anforderungen zum Ausbau und der Versiegelung von nicht mehr benötigten Bohrungen. Deshalb werden hier keine statistischen Angaben zu Schadens- und Versagensfällen gemacht, obwohl eine Betrachtung aufgetretener Havarien zur Vermeidung von Schadensfällen beitragen kann.

Es gibt eine Vielzahl von Berichten aus anderen Ländern zum Versagen der Bohrungsintegrität. Studien zu undichten Bohrungen in anderen Ländern beziehen sich meistens auf Bohrungen der P&E-Industrie. *WAT 07/* fand z. B. heraus, dass viele undichte Bohrungen in einem Gasfeld in Kanada nur eine Verrohrung besitzen, das heißt keine kritischen Gesteinsschichten gegeneinander abgedichtet wurden oder ältere Bohrungen nicht ausreichend zementiert wurden. Die Ergebnisse dieser Studie lassen sich aufgrund der strikteren Auflagen in Deutschland nicht auf die Verhältnisse in Deutschland übertragen. Zudem beziehen sich die Studien meistens auf Kohlenwasserstoff-Lagerstätten, in denen es zu Gasaustritten kam, die bei Geothermie-Bohrungen in Deutschland sehr unwahrscheinlich sind.

7.4.3 Pfad 2: Fließpfade von Fluiden entlang von Störungen

Die Pfadgruppe 2 umfasst Fließpfade aus der geothermalen Lagerstätte in oberflächliche Aquifere entlang von bestehenden, reaktivierten oder neu erzeugten Störungen bzw. Klüften. Es besteht die Gefahr, dass Störungen oder Klüfte durch Stimulationsmaßnahmen entweder reaktiviert oder neu gebildet werden und damit die sie trennen-

den Grundwasserhemmer überbrücken. Der Transport von Schadstoffen entlang von Fließpfaden in den oberflächennahen Wasserkreislauf ist nur möglich, wenn diese Pfade eine ausreichende Permeabilität, verbunden mit einem Druckpotenzial aufweisen, welches das Thermalwasser bis in oberflächennahe Aquifere transportiert. Die Permeabilität von Störungszonen ist abhängig von der Anzahl der Klüfte (Kluftnetzdicke), der Kluftweite und der Vernetzung der einzelnen Klüfte untereinander. Die hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen sind aufgrund ihrer diskreten Ausprägung und räumlichen Heterogenität nur sehr schwer zu bestimmen /SAU 12/. Zudem sind Störungen meistens keine offenen Klüfte, sondern durch Sekundärminerale verfüllt, und damit ist der advective Fluidfluss stark gehemmt.

Ein aufsteigendes Druckpotenzial ist gegeben, wenn der hydrostatische Druck in der Lagerstätte den hydrostatischen Druck in einer Kluft oder Störung übersteigt. Dadurch können Fluide vertikal aufsteigen. In der Regel stellt sich im Anlagenbetrieb durch die Entnahme des Thermalwassers ein Druckgradient zwischen der Injektions- und Förderbohrung ein, wodurch das Thermalwasser bevorzugt zur Förderbohrung fließt.

Eine Bewertung potentieller Fließpfade ist abhängig von den lokalen geologischen und tektonischen Gegebenheiten (aktive Scherzonen), den Aquifertypen (Karst-, Sandsteinaquifer) und auch von den Gesteinseigenschaften (kompakte oder duktile Gesteine). Für jeden Standort ist aus diesem Grund ein hydrogeologisches Systemverständnis unerlässlich. Im Norddeutschen Becken sind die Lagerstätten vielerorts durch Grundwasserhemmer (z. B. Tone) überlagert und somit vom Oberflächenwasser getrennt. Zudem mischen sich hoch mineralisierte Thermalwässer nicht ohne weiteres mit gering mineralisierten meteorischen Wässern. Im stark geklüfteten Oberrheingraben findet nachweislich ein Austausch zwischen oberflächennahen und tiefen Grundwässern statt. Im süddeutschen Molassebecken sind die Thermalwässer so gering mineralisiert, dass sie keine Umweltgefährdung für oberflächennahe Gewässer darstellen.

Es wird befürchtet, dass durch Stimulationsmaßnahmen in Erdgaslagerstätten sich neu gebildete bzw. reaktivierte Klüfte bis in oberflächennahe Grundwasserleiter fortführen könnten. Diese Befürchtungen bestehen auch für die Stimulation von tiefen geologischen Gesteinsschichten. Im Wesentlichen sind die Risslängen abhängig von:

- den Gesteinseigenschaften,
- dem Spannungsregime und dem Gebirgsdruck,

- den rheologischen Eigenschaften des Stimulationsfluides und
- den Injektionsdrücken.

/AND 12/ stellt Modellierungen der BGR zur Rissausbreitung aufgrund von hydraulischen Stimulationsmaßnahmen in der E&P-Industrie dar. Aufgrund der Vielzahl von Einflussgrößen auf die Rissausbreitung sind die modellierten Risslängen abhängig von den lokalen Standorteigenschaften. Die Rechenergebnisse zeigten maximale Risslängen von 540 m in der horizontalen Ebene und 370 m in der vertikalen Ebene (Abb. 7.12). Die postulierte Tiefe für die Modellierungen lag bei etwa 1.000 m. Wirtschaftlich nutzbare Lagerstätten zur geothermalen Energieerzeugung liegen meist in Tiefen > 2.000 m. Erfahrungen aus anderen Geothermie-Projekten, bei denen hydraulische Stimulationsmaßnahmen durchgeführt wurden, wie in Groß Schönebeck /ZIM 10a/, Genesys /SCS 09/ und Soultz-sous-Forêts /POR 09/ zeigen jedoch ähnliche Werte. Die vertikalen Risslängen erreichten meistens Werte von < 500 m Länge.

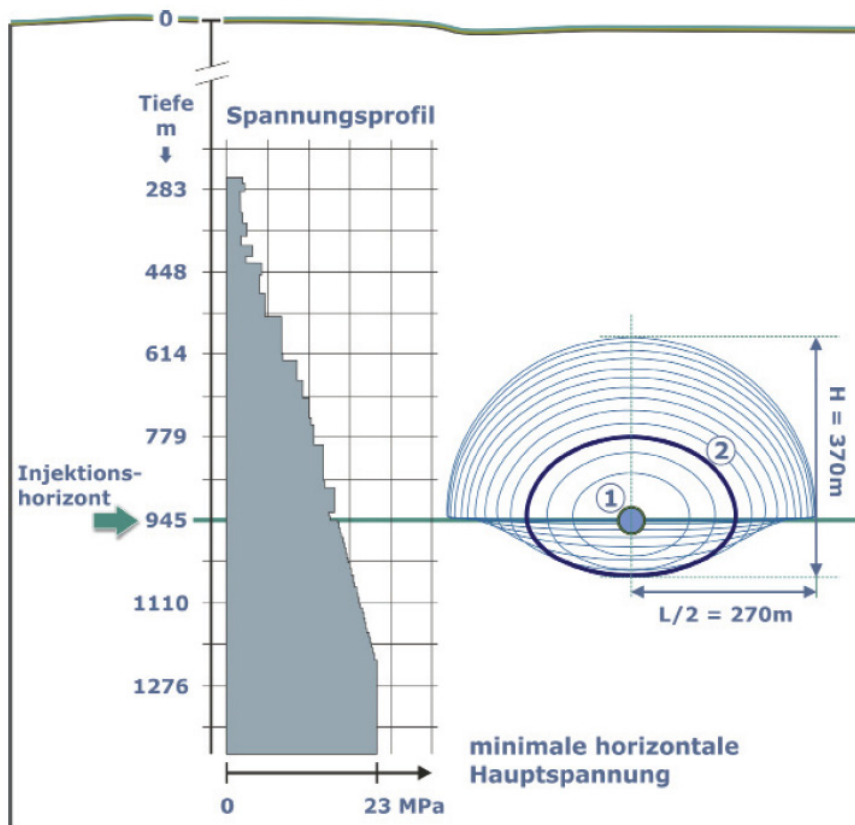


Abb. 7.12 Links: schematisches Spannungsprofil der Modelllithologie. Rechts: simulierte räumliche Ausdehnung der Rissflächen - (Sicht von der horizontalen Injektionsbohrung aus) bei einer Injektion von 5.000 m^3 Wasser nach einer Fracking Maßnahme von knapp 14 Stunden. Dünne Ringe:

äußere Begrenzung der Rissfläche nach jeweils einer Stunde Injektionsdauer. 1) Injektionsbohrung 2) berechnete Ausdehnung der Rissfläche nach rund drei Stunden Injektionsdauer bei einem bis dahin injizierten Volumen von rund 1.000 m³ /AND 12/

/DAV 12/ untersuchte die Rissausbreitung anhand von natürlichen und künstlich erzeugten Rissen (P&E-Industrie, Geothermie, usw.) in den USA, Europa und Afrika. Nur ein Prozent der erzeugten Risse erreichten Längen größer als 350 m. Die Risslängen liegen zumeist zwischen 200 bis 400 m. Einige Risse waren länger als 700 m und Risse über einen Kilometer Länge sind extrem selten (Abb. 7.13). Mikroseismische Daten aus Fracking-Maßnahmen in den USA zeigen, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass sich Risse weiter als einen Kilometer in vertikaler Richtung ausbreiten.

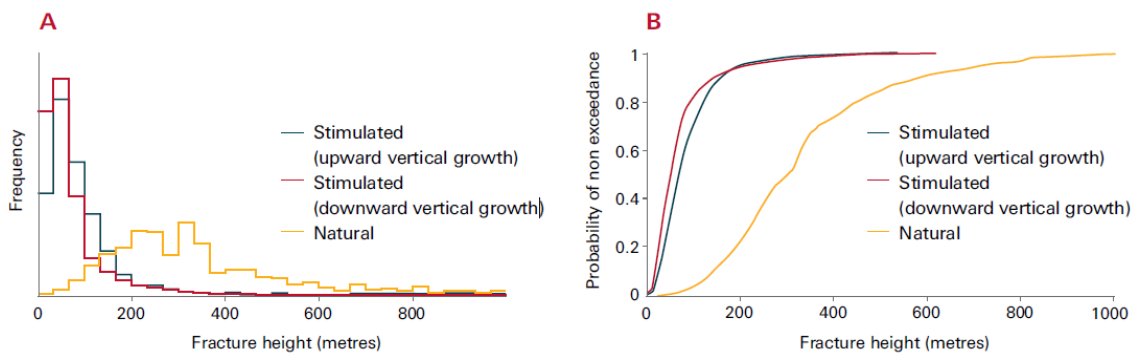


Abb. 7.13 (A) Frequenz der Risslänge für künstlich erzeugte und natürlich entstandene Risse im tiefen Untergrund und (B) Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von Risslängen (verändert nach /DAV 12/, /KOP 12/)

/FIS 12/ untersuchte die Rissausbreitung nach Stimulationsmaßen und gibt Hinweise, warum die Rissausbreitung bis in oberflächennahe Grundwasserleiter unwahrscheinlich ist.

- Je weiter man sich vom Bohrloch entfernt, desto geringer werden die Fluiddrücke. Die bei Stimulationsmaßnahmen induzierten Fluidvolumen sind nicht ausreichend, um die erforderlichen Drücke zu erzeugen bzw. den Druck aufrechtzuerhalten, damit Risse bis in oberflächennahe Grundwasserleiter penetrieren.
- Klüfte bzw. Abschiebungen durch mehrere Gesteinsschichten bilden sich nur bei einer großen Volumenentnahme aus der Lagerstätte und einer daraus resultierenden Subsidenz der Deckgebirgsschichten.

- Häufig sind Klüfte durch Minerale verfüllt, welche die Durchlässigkeit stark reduzieren.

7.4.4 Pfad 3: Ausbreitung von Schadstoffen in Aquiferen

Die Pfadgruppe 3 umfasst im Wesentlichen die Ausbreitung eines Schadstoffes in einem Aquifer, z. B. wenn Thermalwasser aus einer undichten Bohrung austritt. Ein diffusiver Aufstieg von Fluiden insbesondere der hochmineralisierten Thermalwässer durch die Schichtenfolgen im Hangenden einer geothermalen Lagerstätte (Deckschichten), wie er in der Abb. 7.5 dargestellt ist, wird ausgeschlossen. Die Migration von Fluiden (Thermalwässer und Gase) findet bevorzugt entlang von Klüften statt, somit wird dieser Emissionspfad in der Pfadgruppe 2 behandelt.

Wenn Schadstoffe in einen Aquifer austreten, bildet sich in Abhängigkeit von der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers und den geologisch-chemischen Eigenschaften des Aquifergesteines eine Schadstofffahne aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und -länge der Schadstofffahne im Aquifer ist im Wesentlichen abhängig von /MAT 09/:

- der Freisetzungsrate des Schadstoffs,
- der Dauer des Eintrags (permanenter oder einmaliger Eintrag),
- den hydrogeologischen Eigenschaften des Grundwasserleiters (Grundwassermächtigkeit, hydraulischer Gradient, Durchlässigkeitsbeiwert, nutzbare Porosität, Adsorptions-, Desorptions- und Filtrationseigenschaften),
- dem hydrogeochemischen Milieu im Aquifer (oxidierende/reduzierende Verhältnisse, pH-Wert, Lösungsinhalte) sowie
- den Schadstoffeigenschaften (organisch oder anorganisch, Wasserlöslichkeit, Lösungskinetik, Abbaubarkeit, Retardierungs-, Reaktions-, Diffusions- und Dispersionsverhalten).

Durch natürliche Abbau- und Rückhalteprozesse (Sorption) können die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die räumliche Ausdehnung der Schadstofffahne in lateraler, aber auch in vertikaler Richtung reduziert werden.

7.5 Einwirkungen der Wirkfaktoren auf Schutzgüter

In diesem Kapitel werden die Wirkfaktoren und deren Auswirkungen auf Schutzgüter detailliert beschrieben. Zu diesem Zweck erfolgt eine Unterteilung des Auftretens des Wirkfaktors für die unterschiedlichen Projektphasen, die möglichen Einwirkungen auf Schutzgüter, mögliche Gegenmaßnahmen zur Minderung oder Vermeidung der Einwirkung und eine abschließende Bewertung.

Eine Schutzgutverletzung liegt dann vor, wenn in unzulässiger Weise auf das Schutzgut eingewirkt worden ist. Bewegt sich die Einwirkung im entsprechenden gesetzlich erlaubten Rahmen, liegt keine Schutzgutverletzung, unter Umständen jedoch eine Schutzgutbeeinträchtigung vor.

Unter Erkundung werden nur die seismischen Vorerkundungsmaßnahmen behandelt nicht aber Erkundungsbohrungen. Alle Bohrmaßnahmen werden unter dem Punkt „Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau“ behandelt. Dazu werden auch die Erkundungsbohrungen gezählt, die in der Regel nach Fündigkeit als normale Förder- oder Injektionsbohrung ausgebaut werden können.

7.5.1 Ökologische Einflüsse

7.5.1.1 Scheuchwirkung

Die Scheuchwirkung auf Tiere kann durch die Anwesenheit von Menschen oder beweglichen Objekten im Lebensraum oder auch von Störschallimpulsen ausgelöst werden.

7.5.1.1.1 Auftreten des Wirkfaktors in den Projektphasen

Erkundung

Im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen kann es durch die Fahrzeuge und die induzierten Vibrationen zu einer Scheuchwirkung von Tieren kommen. Die Scheuchwirkung kann durch jegliche Präsenz im Messfeld (insb. außerhalb des bebauten Bereiches: Verlegen von Geophon-Kabeln, Bohren für Sprengseismik etc.) ausgelöst werden.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Die Scheuchwirkung ist vergleichbar der Effekte während der Erkundung und wird durch Präsenz im Messfeld ausgelöst.

Betrieb

Die Scheuchwirkung ist vergleichbar der Effekte während der Erkundung und wird durch Präsenz im Messfeld ausgelöst.

Rückbau

Die Scheuchwirkung ist vergleichbar der Effekte während der Erkundung und wird durch Präsenz im Messfeld ausgelöst.

Einwirkungen auf Schutzgüter

Irritation und Aufscheuchen von Tieren durch plötzliche Lärmbelastungen und Anwesenheit im Habitat. Bei Nichtbeachtung von Nutzungsgeboten oder Verboten muss von einer Schutzgutverletzung ausgegangen werden.

7.5.1.1.2 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Vermeidung möglich (nicht in Brutzeit, weniger Sprengseismik, kein Entfernen von Gehölzen, Maßnahmen zur Vermeidung/Minimierung (§ 12 BNatSchG).

7.5.1.1.3 Bewertung

Es werden keine nachteiligen Auswirkungen der temporären Erkundungsmaßnahmen erwartet. Die Beeinträchtigung ist vergleichbar mit jeglichem Eindringen in das Habitat der Lebewesen, was nicht grundsätzlich ausgeschlossen ist.

7.5.1.2 Visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes

Die Schönheit und Eigenart der Landschaft ist ein subjektiver Begriff, der auch die bereits vorhandene kulturräumliche und kulturhistorische Ausprägung des Raumes (wie vorhandene Landschaftsbild-prägende Siedlungselemente) beinhaltet.

7.5.1.2.1 Projektphasen

Erkundung

Nicht zutreffend

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Als landschaftsprägendes Element wird in der Erschließungsphase der Anlage der Bohrturm errichtet. Die Bohranlage RIG 23 der Firma ITAG, welche während der Geothermie-Bohrung in Pullach eingesetzt wurde, hat eine Höhe von 56 m (Abb.7.14).



Abb. 7.14 Bohrturm für tiefe Bohrungen der Firma Herrenknecht /VOL 14/

Betrieb

Visuelle Beeinträchtigung durch das Anlagengebäude, letztlich auch die Anlage selbst insb. durch die Kühltürme (wenn vorhanden). Bei Stillstand der Anlage oder bei deren Anfahren kommt es zu einer visuellen Abgabe von Wasserdampf Wolken.

Rückbau

Die visuelle Beeinträchtigung bei Rückbaumaßnahmen führt zu keiner wesentlichen Beeinträchtigung von Schutzgütern.

7.5.1.2.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

§ 1 Abs. 3 des Bundesnaturschutzgesetzes beschreibt als Ziel des Naturschutzes und der Landschaftspflege, dass Natur und Landschaft so zu schützen, zu pflegen, zu entwickeln und, soweit erforderlich, wiederherzustellen sind, dass die Vielfalt, Eigenart und Schönheit sowie der Erholungswert von Natur und Landschaft auf Dauer gesichert sind.

Die Ausweisung von Landschaftsschutzgebieten nach § 26 BNatSchG bietet grundsätzlich die Möglichkeit, bereits prägende Bestandteile des Kultur- oder Naturraumes, die aufgrund ihrer Vielfalt, Eigenart und Schönheit oder der besonderen kulturhistorischen Bedeutung der Landschaft bedeutsam sind, besonders zu schützen und bestimmte Nutzungen zu untersagen.

Die Höhe des Bohrturmes sowie das Anlagengebäude können zu einer visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes führen. Durch das Ablassen von Dampf bei Zirkulationstest kann es zu einer visuellen Beeinträchtigung durch Wasserdampf kommen.

7.5.1.2.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Durch Verringerung der Bohrzeit kann die visuelle Beeinträchtigung des Landschaftsbildes zeitlich begrenzt werden.

Aufgrund der subjektiven Empfindungen von Betroffenen bietet es sich an, die Errichtung der Bohranlage positiv zu belegen. So kann z. B. die Anlage als vorübergehende

einmalige technische Einrichtung beworben werden und der Bevölkerung durch Besuchertage die Möglichkeit gegeben werden, die weithin sichtbare Konstruktion aus der Nähe zu betrachten.

Bestimmte Farbgebungen der Mastanlage können die optische Verschmelzung mit dem Hintergrund fördern.

7.5.1.2.4 Bewertung

Die Sichtbarkeit der vertikalen Struktur der Bohranlage mit etwa 35 – 55 m liegt, je nach Relief der Landschaft, bei einigen 100 m. Als prägende Auswirkung wird dabei insbesondere die Zerschneidung der Horizontlinie empfunden. In deutlich reliefierterem Gelände und bei Positionierung des Bohrplatzes in Geländesenken (Tälern) besteht hohe Wahrscheinlichkeit, dass sich die Bohranlage nicht vor dem Hintergrund abhebt (optische Verschmelzung mit dem Hintergrund). Somit ist eine standortspezifische Bewertung der visuellen Beeinträchtigung des Einzelelementes „Bohrturm“ geboten. Im Gegensatz zu den häufig gruppenweisen und auf erhöhten Plätzen errichteten Windkraftanlagen mit Höhen von ca. 150 m geht von Bohranlagen von Geothermieanlagen lediglich eine punktuelle und temporäre Beeinträchtigung des Landschaftsbildes aus. Eine lineare Zerschneidung des Landschaftsbildes wie durch etwa 60 m hohe Hochspannungsmasten ist gleichfalls für Bohranlagen der Geothermie nicht gegeben.

Zu einer permanenten visuellen Beeinträchtigung durch Wasserdampf, wie in Hochenthalpie-Gebieten wie Island, wo der Wasserdampf direkt zur Verstromung genutzt werden kann, kommt es in Deutschland nicht. Eine direkte Verstromung durch Dampf ist in Deutschland bei Nutzung der Niedrigenthalpie-Lagerstätten nicht möglich.

Der durch Zirkulationstests oder Anlagenstillstände hervorgerufene Wasserdampf beim Austritt aus dem Separator kann zu einer visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und somit zu einem Akzeptanzverlust führen. Jedoch stellt nicht die visuelle Beeinträchtigung das Problem dar, sondern es werden von der Bevölkerung vielmehr schädliche Inhaltsstoffe in dem Wasserdampf vermutet. Ein möglicher Schadstoffeintrag in die Luft wird im Kapitel 7.5.2.3 diskutiert.

Zur Bewertung der visuellen Beeinträchtigung durch das Anlagengebäude ist es geboten, vergleichbare industrielle Anlagen als Vergleichsmaßstab heran zu ziehen. Im

Grundsatz unterscheiden sich die meist kleinen abgegrenzten Betriebsgebäude- und Gelände nicht von kleineren Betrieben. Die Abwägung erfolgt im Rahmen des grundsätzlichen Planungsverfahrens für die Errichtung eines Gebäudes und berücksichtigt die lokalen Vorgaben.

7.5.1.3 Anfall und Entsorgung von Rest- und Abfallstoffen, auch radioaktive Reststoffe

Für alle Rest- und Abfallstoffe ist der zuständigen Bergbehörde, gemäß BBergG im Rahmen des Hauptbetriebsplanes oder in einem Sonderbetriebsplan, eine Darstellung aller Entsorgungswege vorzulegen. Entsprechend dem KrW-/AbfG (Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen) sind „Abfälle, die beim Aufsuchen, Gewinnen, Aufbereiten und Weiterverarbeiten von Bodenschätzen in den der Bergaufsicht unterstehenden Betrieben anfallen, ausgenommen Abfälle, die nicht unmittelbar und nicht üblicherweise anfallen, (d. h. bergbautypische Abfälle), vom Geltungsbereich des Gesetzes ausgenommen. Gemäß der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) werden Bohrschlämme (siehe Kap. 3.4.1) und Bohrklein entsprechend ihrer Zusammensetzung unterschieden. Gemäß dem jeweils zutreffenden Abfallschlüssel, werden das Bohrklein und ggf. auch die Bohrspülung auf entsprechende Deponien verbracht /FRK 07/.

7.5.1.3.1 Projektphasen

Erkundung

In der Erkundungsphase werden keine Rest- oder Abfallstoffe produziert.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Zunächst fallen allgemeine Abwässer des Bohrplatzes an. Je nach Verschmutzungsgrad müssen die Abwässer aufbereitet oder gesondert entsorgt werden.

Rückgeförderte Stimulationsfluide, aber auch Bohrspülungen können toxische oder trinkwassergefährdende Stoffe enthalten. Die Bohrspülung kann nach erfolgter Aufbereitung und Entfernen des Bohrkleins auch wiederverwendet werden. Es wird im Allgemeinen davon ausgegangen, dass mit der Druckentlastung nach Stimulationsmaß-

nahmen zwischen 20 und 80 % des Stimulationsfluides rückgefördert werden, der Rest verbleibt im Untergrund /ROS 12/. Wenn rückgepumpte Flüssigkeiten, wie Bohrspülung, Formations- und Lagerstättenwässer und Stimulationsfluide nicht soweit aufbereitet werden können, dass sie auf konventionelle Weise entsorgt werden dürfen, z. B. Einspeisung in Oberflächenwässer oder Kanalisation, müssen sie gesondert entsorgt werden. Gängige Praxis ist es, diese Fluide in so genannte Disposalbohrungen in ausgebeutete Lagerstätten der E&P-Industrie zu verpressen /SCN 12/.

Während des Bohrvorganges wird das Bohrklein bzw. der Bohrschlamm aus der Bohrspülung durch Absetzbecken oder Rüttelsiebe wieder entfernt. Je nach Bohrlochvolumen fällt ein Volumen von 360 – 1.200 m³ an Bohrklein an /FRK 07/. In dem Bohrklein können sich Schadstoffe aus der Bohrspülung oder aus Formationswässern angereichert haben. Deshalb ist in manchen Fällen eine Zuordnung zu Deponieklassen und dementsprechend gesonderte Entsorgung erforderlich. /FRK 07/ ermittelte für Referenzkonzepte in allen drei Geothermie-Regionen in Deutschland die zu erwartenden Abfall-Mengen. Es ist mit Mengen von etwa 1.700 t im Oberrheingraben, 2.400 t im Süddeutschen Molassebecken und 2.700 t im Norddeutschen Becken zu rechnen.

Bei der Geothermie-Bohrung in Basel wurden folgende Abfallmengen veranschlagt /KAI 04/:

- Bohrklein (fest) ca. 1.280 m³
- Bohrschlamm (feststofffrei, salzhaltig) ca. 2.000 bis 3.000 m³
- Bohrschlamm (feststoffführend) ca. 1.280 m³

Die Planungen für die Geothermie-Bohrung in Basel sahen vor, dass das feste, unbedenkliche Bohrklein auf einer sog. Inertstoffdeponie entsorgt wird, soweit es nicht für Rekultivierungen verwendet werden kann. Der feststofffreie Bohrschlamm sollte dosiert in die Schmutzwasserkanalisation abgegeben werden. Für den feststoffführenden Bohrschlamm war ebenfalls eine Entsorgung auf einer Inertstoffdeponie vorgesehen, wenn keine Einschränkungen bezüglich hoher Salzkonzentrationen bestünden /KAI 04/.

Laut /WAC 09/ fielen während der Bohrung für das Geothermie-Projekt in Kirchstockach folgende Abfallmengen an (Tab. 7.6):

Tab. 7.6 Abfallstatistik für die Geothermie-Bohrung in Kirchstockach

| Abfallarten | Bohr-intervall 1 | Bohr-intervall 2 | Bohr-intervall 3 | Bohr-intervall 4 | Gesamt |
|--|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|
| Cuttings (wasserbasisch) [mt] | 1.689,56 | 608,82 | 594,68 | 54,60 | 2.947,66 |
| Bohrplatzabwasser (innerer Bereich) [mt] | 0 | 102,08 | 638,57 | 300,92 | 1.041,57 |
| Zementmischzone[mt] | 84,94 | 78,03 | 47,28 | 30,75 | 241 |
| Total [mt] | 1.774,5 | 788,93 | 1.280,53 | 386,27 | 4.230,23 |

(mt = metrische Tonnen)

Im ersten Intervall der Bohrung wurde mit einer Bentonitspülung gebohrt. Diese wurde lokal über zugelassene Deponien nach AVV 010504 (Schlämme aus Süßwasserbohrungen) entsorgt. Ab dem zweiten Bohrabschnitt wurde mit einer Polymerspülung weiter gebohrt. Diese wurde als Bergversatz nach AVV 00508 (chloridhaltige Bohrschlämme und Abfälle) entsorgt. Die angefallenen Schmutzwässer bestehen aus Bohrplatz- und Reinigungswässern. Nach einer chemischen und physikalischen Aufbereitung in einer Abfallentsorgungsanlage wurden diese in die Kanalisation eingeleitet.

Die Planung für die Geothermie-Bohrung in Holzkirchen sah z. B. vor, unbedenkliche Wässer wie z. B. Niederschlagwässer des äußeren Bohrplatzes, nach vorheriger Genehmigung durch das zuständige Bergamt über Versickerungsmulden abzuleiten. Abwässer können aufgrund der Nähe zu einer entsprechenden Kanalisation hierüber abgeleitet werden. Im ersten Intervall der Bohrung wird mit Bentonitspülung gebohrt. Diese kann nach vorheriger Behandlung für die Herstellung der später einzusetzenden KCl-Spülung verwendet werden. Die KCl-Spülung der ersten Bohrung soll soweit wie möglich in einem externen Lager zwischengelagert und für eine zweite Bohrung wiederverwendet werden. Nach erfolgreicher Beendigung der Bohrung GT2 wird die KCl-Spülung als Bergversatz entsorgt oder für andere Bohrungen angeboten. Das erbohrte Bohrklein wird in wasserdichten Containern aufgefangen und anschließend entsorgt oder einer Wiederverwertung zugeführt. Durch Bentonitspülung erbohrtes Bohrklein ist unproblematisch und wird auf lokalen Deponien entsorgt. Das Bohrklein aus Bohrphasen mit KCl-Spülung wird als Bergversatz entsorgt. Anfallende Zementsuspension nach der Zementation wird in wasserdichten Containern aufgefangen und in geeigneten Deponien entsorgt oder einem Zementwerk zur Wiederverwertung zugeführt /ERD 13/.

Betrieb

Während des Anlagen-Betriebes fallen verbrauchte Filter, Rückstände aus der Anlagenreinigung, verbrauchte Schmiermittel, Chemikalienreste (Inhibitoren) und Putzmittel an. Die Filter, aber auch ausgewechselte Anlagenteile können hohe Strahlungswerte aufgrund von angereicherten natürlichen Radionukliden aufweisen und müssen deshalb gesondert entsorgt werden.

Rückbau

Während des Rückbaus der Geothermieanlage fallen folgende Abfallstoffe an: Die Verrohrung, Pumpen, Gebäudeabbruch, Bodenaushub, Altmetall (Armierung, Zäune, Zellenkühler), Rückbau der Zufahrtswege, Schmiermittel, Arbeitsmittel im Sekundärkreislauf und Inhibitoren. Auch während des Rückbaus ist mit dem Auftreten von radioaktiv kontaminierten Anlagenteilen und ausgelösten Ablagerungen zu rechnen, die in geeigneter Weise beseitigt oder verwertet werden müssen.

7.5.1.3.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Das Lagerstättenwasser, die Bohrspülung, die Stimulationsfluide und anfallende Baustellenabwässer sind in der Regel mit umweltgefährdenden Inhaltstoffen belastet, diese sollten nicht in die Biosphäre gelangen.

Im Bohrklein sowie in dem von der Bohrspülung separierten Bohrschlamm können sich chemotoxische Stoffe angereichert haben. Bei einem unkontrollierten Eintrag dieser Stoffe in die Umwelt (Boden, Grund- und oberflächliche Gewässer) kann sich dies negativ auf die Fauna und Flora, aber auch den Menschen auswirken.

7.5.1.3.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Zur Bemessung von Regenrückhalteräumen wird das Arbeitsblatt DWA-A 117 (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.) herangezogen.

Die Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in eine kommunale Kläranlage ist Grundlage des Merkblattes DWA-M 115 Indirekte Einleitung nicht häuslichen Abwassers aus dem DWA-Regelwerk.

Für die Entsorgung von Abwässern aus der Erdgasexploration und -förderung werden in Deutschland u. a. alte Produktionsbohrungen genutzt. Dies erfolgt entsprechend der Tiefbohrverordnung BVOT /ROS 12/. Dieses Verfahren wird auch für Abwässer von Geothermie-Bohrungen angewandt.

Durch ein spezielles Bohrplatzdesign kann die Menge an kontaminiertem Schmutzwasser erheblich reduziert werden. Erfahrungen zeigen, dass damit bis zu 70 % der produzierten Schmutzwässer einem Klärwerk direkt zugeführt werden können. Das Gesamteinsparpotenzial beträgt bis zu 50 % /WAC 09/.

Die Menge an Bohrklein und Bohrspülung ist abhängig von der Tiefe und dem Bohrl Lochdurchmesser und kann nur durch eine Verringerung des Bohrdurchmessers verringert werden. Umweltgefährdende Stoffe können durch umweltfreundliche substituiert werden, soweit dies möglich ist.

7.5.1.3.4 Bewertung

Die Bestimmungen und die gesetzliche Regelung zur Entsorgung des Bohrkleins und Bohrschlammes sowie zu den anfallenden Abfällen während des Bohrbetriebes werden als ausreichend angesehen.

Als kritisch wird das Verpressen von Prozessfluiden in sog. Disposal-Bohrungen bzw. ausgebeutete Lagerstätten gesehen. Die Lebensdauer von Bohrungen ist begrenzt und es gibt keine gesetzliche Regelung, die eine Integritätsprüfung dieser Bohrungen vorschreibt. Zudem sind die Langzeitwirkungen der unter Druck stehenden Fluide im Untergrund unklar. Ein durch den anstehenden Gebirgsdruck ausgelöstes Auspressen der Fluide muss zudem ausgeschlossen werden /ROS 12/.

Die allgemeinen Abwässer und Abfälle des Anlagenbaus sind mit den anfallenden Abfällen von „normalen“ Industriebetrieben vergleichbar.

7.5.1.4 Akkumulation von NORM: Strahlenexposition

Teil 3 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) regelt den Schutz von Mensch und Umwelt vor natürlichen Strahlenquellen bei Arbeiten. Gegenwärtig wird auch der Schutz der nicht-menschlichen Lebewelt vor unzulässigen Strahlenexpositionen auf

seine Regelungserfordernisse geprüft. Für eine Bewertung des Wirkfaktors „Akkumulation von NORM“ wird jedoch nach vorliegender Rechtsprechung ausschließlich die Einwirkung auf das Schutzgut „Menschliche Gesundheit“ beurteilt. Man geht davon aus: Ist der Mensch geschützt, ist auch die Umwelt geschützt. Dosis-Wirkungsbeziehungen für Pflanzen und Tiere sind noch nicht in dem Maße untersucht, als dass entsprechenden Vorschriften erlassen werden können, wenngleich internationale Empfehlungen dies für die nahe Zukunft erwarten lassen.

Eine intensive Bearbeitung der Spezialthematik „NORM“ erfolgt in Kapitel 8 und Kapitel 9.

7.5.1.4.1 Projektphase

Erkundung

Keine Akkumulation von Radionukliden.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Die Durchörterung des Gebirges kann mit Bohrschlämmen oder dem Bohrklein natürliche Radionuklide zu Tage fördern. Vereinzelt können radiologisch auffällige Gesteinsschichten mit natürlichen Anreicherungen durchbohrt werden und Materialien einer spezifischen Aktivität $\geq 0,2$ Bq/g für die Radionuklide der Thorium-232 oder Uran-238 Zerfallsreihen anfallen.

Betrieb

Je nach Chemismus des Thermalwassers und seiner Herkunft sind erhöhte Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide im Fluid zu erwarten. Die Förderung wird diese Radionuklidfracht an die Erdoberfläche bringen. Durch die Ausfällung bestimmter Minerale an Anlagenteilen können sich diese Radionuklide in den so genannten Scale (Ablagerungen) anreichern. Neben Scale Rückständen muss mit signifikanten Mengen weiterer Industrieabfälle wie Filtersäcke, Dichtungen, Overalls usw. gerechnet werden, bei denen der brennbare (und nicht für eine Deponierung geeignete) Anteil beträchtlich ist.

Eine intensive Bearbeitung der Spezialthematik „NORM“ erfolgt in Kapitel 8 und Kapitel 9.

Rückbau

Die beendete Förderung des Thermalwassers verhindert ein weiteres Anwachsen von Ablagerungen und unterbindet damit die Akkumulation von Radionukliden. Durch den Rückbau der Anlage fallen jedoch vermehrt metallische Anlagenteile an, die geordnet einer Beseitigung oder Verwertung unter Beachtung abfallrechtlicher Beläge zugeführt werden müssen.

Ein gebräuchliches Verfahren zur Beseitigung von NORM-Rückständen war die Rückverfüllung von Bohrlöchern der Erdöl- und Erdgasförderung nach Ziehen der Förderer. Diese müssen gemäß Abschlussbetriebsplan nach Bundesberggesetz (BbergG) wieder verfüllt und verplombt werden. Hierzu wurden z.B. Scale aus den Steigrohren mittels Hochdruckwasserstrahlverfahren entfernt und mit Zement vermischt zur Rückverfüllung der Bohrlöcher verwendet. Wegen der erforderlichen Nachweisführung nach WHG, dass eine Grundwasserkontamination ausgeschlossen werden muss, wird dieses Verfahren neuerdings nicht mehr von der zuständigen Bergbehörde zugelassen. Maßgeblicher Grund der Ablehnung ist nicht die radioaktive Kontamination, sondern das Vorhandensein von Quecksilber.

7.5.1.4.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Verletzung des Schutzgutes Mensch durch erhöhte Strahlenbelastung denkbar, aber nach probabilistischen Abschätzungen eher nicht unzulässig hoch.

7.5.1.4.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Die Anreicherung von Scale wird durch Zugabe von Inhibitoren unterbunden oder verlangsamt. Wenn nötig, müssen beim Überschreiten von Grenzwerten Anlagenteile ausgetauscht werden.

Die Entsorgung metallischer Anlagenteile erfordert gemäß abfallwirtschaftlicher Kriterien eine Verwertung. Vor einer Verwertung des eingeschmolzenen Stahls müssen jedoch radioaktive Anlagerungen beseitigt werden. Abrasive Verfahren (Hochdruck-

Wasserdampfreinigung oder Sandstrahlen) sind geeignet, wenig fest haftende Kontaminationen zu beseitigen, wodurch diese gesondert als Rückstände entsorgt werden können.

In den meisten Fällen erfolgt eine Beseitigung von NORM-Rückständen nach Entlassung aus der Strahlenschutzüberwachung gemäß § 98 (1) StrlSchV i. V. m. Anlage XII Teil C (und ggf. Anlage XII Teil D) auf konventionellen übermäßigen Abfalldeponien der Klassen DK I (nur für Abfälle ohne gefährliche Stoffe), DK II und DK III.

Festhaftende radioaktive Ablagerungen an metallischen Anlagenteilen erfordern eine Rezyklisierung durch kontrolliertes Einschmelzen. Derzeit gibt es drei Anlagen in Deutschland, in denen NORM-Rückstände zur Gewinnung von (nicht radioaktiven) Wertstoffen verarbeitet werden. Es handelt sich dabei um

- Siempelkamp Nukleartechnik GmbH Krefeld (Schmelze von Metallen)
- GMR Gesellschaft für Metallrecycling mbH Leipzig (Quecksilber Recycling)
- DELA GmbH Dorsten (Quecksilber Recycling).

Diese Anlagen nehmen grundsätzlich auch Materialien an, die nach ADR Klasse 7 transportiert werden. Sie entsorgen die bei ihnen anfallenden Abfälle bzw. NORM-Rückstände auf eigenen zugelassenen Entsorgungswegen oder geben sie an die ursprünglichen Abfallbesitzer zurück.

Die Fa. Siempelkamp Nukleartechnik GmbH Krefeld nimmt NORM-haltige metallische Abfälle zum Einschmelzen in der Schmelzanlage GERTA an. Dabei handelt es sich meist um kontaminierte Rohre und Anlagenteile aus der Erdöl- und Erdgasgewinnung, die auch Quecksilber enthalten können, aber auch Anlagenteile aus Geothermieanlagen. Die Fa. Siempelkamp verfügt sowohl über eine Genehmigung zum Einschmelzen von radioaktiv kontaminiertem Material als auch von quecksilberhaltigen Materialien. Die Rückstände aus der Metallschmelze (Aschen und Schlacken) werden weitgehend auf der betriebseigenen Deponie abgelagert. Werden Materialien mit hoher spezifischer Aktivität (Annahmewert abhängig von Gesamtaktivität zu erwartetem Aufkommen an Asche und Schlacke aus der Schmelze) angeliefert, muss der Abfallbesitzer diese Rückstände wieder zurücknehmen.

Beim Quecksilber Recycling der Firmen GMR Leipzig und DELA Dorsten werden aus quecksilberhaltigen Schlämmen und Scale der Erdöl- und Erdgasgewinnung mittels

vakuothermischer Verfahren metallisches Quecksilber mit sehr hohem Reinheitsgehalt gewonnen. Die natürlichen Radionuklide, vor allem Radium-Isotope, verbleiben in den Rückständen und werden im Ergebnis der thermischen Behandlung aufkonzentriert.

Die bei der Fa. GMR Leipzig anfallenden NORM-Rückstände werden nach § 98 StrlSchV entlassen. Dazu werden sie mit Geopolymer vermischt und mit einem Transport nach ADR Klasse 7 zur Deponie Cröbern (DK III) transportiert und dort deponiert. Die Anlieferung nach ADR Klasse 7 ist bei der Deponie Cröbern ausschließlich für diese immobilisierten Abfälle genehmigt.

Eine Möglichkeit der Wiederverwertung von NORM-Rückständen wurde in der Verwertung als Material zum untertägigen Bergversatz gesehen. Nach StrlSchV Anlage XII Teil B Nr. 3. gilt die Überwachungsgrenze $C = 5 \text{ Bq/g}$ sowohl für die untertägige Deponierung als auch Verwertung. Bei Anwendung von Anlage XII Teil D ist eine Entlassung aus der Überwachung nach § 98 zum Zwecke der untertägigen Verwertung auch für höhere spezifische Aktivitäten möglich. Der hierzu notwendige Transport derartiger NORM-Abfälle muss aber nach ADR Klasse 7 erfolgen, so dass eine untertägige Deponierung wie in Kapitel 3. dargestellt mit Verweis auf den Planfeststellungsbescheid nicht möglich ist. Demgegenüber steht einer Annahme von mit ADR Klasse 7 angelieferten (aus der Strahlenschutzüberwachung entlassenen) NORM-Abfällen zum Zwecke der untertägigen Verwertung zunächst nichts entgegen. Aber auf Grund neuerdings höherer Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen /LAG 03/, die in die aktuelle Fassung der Verordnung über den Versatz von Abfällen unter Tage (Versatzverordnung - VersatzV) /LAG 03/ aufgenommen wurden, erfüllen die meisten der hierfür infrage kommenden NORM-Rückstände diese physikalisch-chemischen Anforderungen nicht. Somit ist diese Option der Wiederverwertung nicht oder nur sehr begrenzt möglich.

7.5.1.4.4 Bewertung

Bei deutlichem Ausbau der energetischen Nutzung Tiefer Geothermie ist im Norddeutschen Becken sowie im Oberrheingraben mit einem vermehrten Aufkommen radioaktiver Rückstandsmaterialien zu rechnen. Darüber hinaus lässt die geplante Erschließung petrothermaler Lagerstätten durch das wohl anteilig, wenngleich mit geringeren Volumina ebenfalls zu fördernde Lagerstättenwasser, ebenfalls das Auftreten von NORM erwarten.

Hinsichtlich des Strahlenschutzes kann der Umgang mit NORM durch den Betreiber in Zusammenarbeit mit der zuständigen Behörde auf der Grundlage des gegenwärtigen Regelwerkes zielführend gestaltet werden. Unzulässige Strahlenexpositionen von Einzelpersonen der Bevölkerung sind nicht zu erwarten.

Der Einsatz von Fremdfirmen in den Anlagen in Zuge von Wartungs- und Reinigungsmaßnahmen bedarf ebenso wie Arbeiten der Stammmannschaft entsprechender Arbeitsschutzanweisung inklusiver Aussagen zum Strahlenschutz.

Gegenwärtig sind Beseitigungsoptionen für radioaktive Rückstandsmaterialien vorhanden und werden genutzt. Bei anhaltend restriktivem Verhalten der Beseitiger ist zukünftig grundsätzlich mit Schwierigkeiten bei der Entsorgung von NORM zu rechnen. Die Entsorgungssicherheit für brennbare Rückstände ist nicht nachgewiesen beziehungsweise ihre Entsorgung gegenwärtig nur hohen, unkalkulierbaren finanziellen Risiken verbunden.

7.5.2 Emissionen und Immissionen

Laut § 50 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) muss die räumliche Zuordnung von Flächen (z. B. des Bohrplatzes oder der Geothermieanlage) so erfolgen, dass schädliche Umwelteinwirkungen, hervorgerufen durch mögliche Störfälle bzw. Unfälle, keine negativen Auswirkungen auf bewohnte oder sonstige schutzbedürftige Gebiete haben /BDJ 13/.

7.5.2.1 Lichtemission

Licht gehört zu den Emissionen und Immissionen im Sinne des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG). Entscheidend ist, ob es sich um genehmigungsbedürftige oder nicht genehmigungsbedürftige Anlagen handelt.

Nach § 4 BImSchG i. V. m § 1 der 4. BImSchV (-) gelten die oberirdischen Anlagenteile als nicht-genehmigungsbedürftig. Gemäß § 22 ff. BImSchG (nicht genehmigungsbedürftige Anlage) sind die Anlagen so zu errichten und zu betreiben, dass schädliche Umwelteinwirkungen durch Licht verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind, und dass nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

Der Gesetzgeber hat bisher keine rechtsverbindlichen Vorschriften zur Bestimmung der immissionsschutzrechtlichen Erheblichkeitsgrenzen für Lichtimmissionen erlassen und auch nicht in Aussicht gestellt.

Die Richtlinie zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen" (Licht-Richtlinie) vom Mai 1993 des Länderausschusses für Immissionsschutz (LAI) systematisiert die Beurteilung der Auswirkung von Lichtemissionen auf den Menschen. Mit Beschluss des LAI wurden am 10. Mai 2000 Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtemissionen gegeben, die auch die schädliche Einwirkung auf Tiere – insbesondere Vögel und Insekten - berücksichtigt /LAI 00/.

Die Erheblichkeit der Belästigung durch Lichtimmissionen hängt wesentlich von der bestehenden Nutzung des Raumes, dem Zeitpunkt (Tages- oder Nachtzeit) sowie der Zeitdauer der Einwirkungen ab. Die Einwirkung auf den Menschen wird in Form eines Vergleiches (wie Aufhellung von Aufenthaltsräumen) oder Beurteilung einer direkten Blendung bewertet.

Die Einwirkung künstlicher Lichtquellen auf nachtaktive Tiere (insbesondere Insekten) bedarf einer komplexeren Bewertung, da auch die spektrale Zusammensetzung des Lichtes, Kontrastverhältnisse zur Umgebung und Höhe der Lichtquelle berücksichtigt werden müssen. Die Dezimierung der Insektenpopulation kann nachfolgend wechselwirkend Auswirkungen auf ökologische Gleichgewichte, z. B. durch verminderte Bestäubungsrate von Blütenpflanzen, haben. Starke Leuchtquellen beeinflussen die räumliche Orientierung nachtmobiler Vögel. Komplexe Wirkungsgefüge in Form von Nahrungsketten verbinden allgemein nachtaktive Tiere. Durch Störungen und Anlockung von Insekten durch Licht werden diese Nahrungsketten gestört.

7.5.2.1.1 Projektphasen

Erkundung

Während der Erkundungsmaßnahmen treten nur Lichtemissionen der Fahrzeuge auf.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Aus Kostengründen wird 24 Stunden pro Tag und an 7 Tagen der Woche gebohrt. Der Bohrplatz der Anlage ist demzufolge nachts weitläufig ausgeleuchtet. Neben dem Ein-

satz von mobilen oder stationären Lichtmasten ist von einer umfassenden Beleuchtung des Bohrturmes über die gesamte Länge sowie der Bohreinrichtung auszugehen.

Die Beleuchtungsstärke wird an die Anforderung am jeweiligen Arbeitsplatz angepasst.

Betrieb

Im Regelbetrieb der Anlage existieren keine besonders hohen Anlagenbauten. Vereinzelte Lichtmasten sind erforderlich, um Transportwege auch nachts auszuleuchten. Die Anforderungen an die Beleuchtungsstärke von nur periodisch oder selten begangenen Wegen sind deutlich geringer als an Arbeitsplätze mit mechanischen Arbeiten. Nur zeitweilig genutzte Flächen können über durch Bewegungssensoren gesteuerte Lampen ausgeleuchtet werden.

Von einer Geothermieanlage gehen nur geringe Lichtemissionen aus. Nachts muss die Anlage nicht beleuchtet sein.

Rückbau

Bei den Rückbaumaßnahmen kommt es nicht zu Lichtemissionen.

7.5.2.1.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Die Lichtemission stellt immer auch eine visuelle Veränderung der gewohnten Nachtansicht des Lebensraumes dar.

Eine Irritation von Menschen und Tieren ist möglich, die für Tiere mit einem Verlust der Orientierung und einer Störung des Tag-Nacht-Rhythmus einhergehen kann. Detaillierte Untersuchungen mit entsprechenden Fallzahlen speziell für Geothermieanlagen liegen den Autoren gegenwärtig nicht vor, sodass die Prüfung anhand vergleichbarer industrieller Anlagen erfolgt.

7.5.2.1.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

In der Erschließungsphase ist die Beleuchtung der Bohranlage aus Sicherheitsgründen nicht zu vermeiden. Es sollte jedoch überprüft werden, ob wirklich der gesamte Bohrturm ausgeleuchtet sein muss oder nicht auch eine geringe Ausleuchtung ausreicht.

In geeigneter Weise können Lichtkegel begrenzt und ausgerichtet werden (insbesondere Vermeidung direkter Blendung).

Maßnahmen zur Verminderung oder Vermeidung schädlicher Auswirkungen auf Vögel und Insekten werden wie folgt vorgeschlagen:

- Eine größere Lichtpunktzahl geringer Höhe und Leistung ist gegenüber wenigen Lichtpunkten großer Höhe und Leistung vorzuziehen.
- Eine Abstrahlung der Lichtquellen nach oben oder in horizontale Richtung kann durch entsprechende Abschirmungen minimiert werden.
- Natriumdampflampen sind Quecksilberdampflampen vorzuziehen. Letztere weisen eine spektrale Zusammensetzung auf, die zu einer erhöhten Anlockung von Insekten führt.

Gegenwärtig nicht einzuschätzen ist die zunehmende Verwendung von Kaltlicht-LED. Deren Einsatz ist ökonomisch interessant, jüngere Untersuchungen über die ökologische Verträglichkeit der LED-Lampen im Vergleich zu Quecksilberdampflampen belegen, dass die Verwendung deutliche Vorteile birgt.

7.5.2.1.4 Bewertung

Die auftretenden Lichteinwirkungen bewegen sich im Bereich der Belästigung, die im Aufenthaltsraum (Gebäude) auftritt. Die Ausleuchtung einer Bohrstelle, die weithin sichtbar wird, kann schwerer bewertet werden. Anhaltspunkte geben Bewertungen vergleichbarer Großbaustellen. Aufgrund der Lage der Bohreinrichtung im Außenbereich wird von einer vernachlässigbaren Lichtemission (keine Aufhellung von Aufenthaltsräumen, keine Blendung in den Wohnbereich) ausgegangen.

Neben dem Schutz des Menschen ist es ebenfalls Ziel des BImSchG, Tiere und Pflanzen vor schädlichen Umwelteinflüssen zu schützen und dem Entstehen schädlicher

Umwelteinwirkungen vorzubeugen. Die Errichtung der Bohranlage (in der Regel im Außenbereich) stellt temporär eine ortsfeste Lichtquelle in einem üblicherweise wenig beleuchtetem Raum dar. Im Wesentlichen sind die Bohrarbeiten temporär und Hinweise zur Vermeidung und Verminderung sind zu beachten.

Die geringen Lichtemissionen während der Erkundung, des Anlagenbetriebs und des Rückbaus der Geothermieanlage können vernachlässigt werden.

7.5.2.2 Schallemissionen

7.5.2.2.1 Projektphasen

Erkundung

Während der Erkundungsphase treten Schallemissionen der Erkundungsfahrzeuge, insbesondere der Rüttelplatten auf.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Die größten Lärmbelastungen treten während der Bohrmaßnahmen auf. Während der Bohrphase wird im Schichtbetrieb an 24 Stunden pro Tag an 7 Tagen / Woche gebohrt. In der Bohrphase ist mit einer relativ gleichmäßigen Lärmbelastung über den gesamten Tag zu rechnen. Dabei sind die hauptsächlichsten Lärmquellen nach /KAI 04/:

- Top Drive (Drehkopf, Elektroantrieb)
- Hebevorrichtung (Elektroantrieb, Scheibenbremsen)
- Schlammumpen (Elektroantrieb, schallgedämmt)
- Siebanlagen (Elektroantrieb)
- Zentrifugen (Elektroantrieb, Schallcontainer, neben den Bohrgeräten kein Lärmeinfluss)
- Notstromgeneratoren (Dieselgeneratoren, Schallcontainer)
- Baumaschinen (Hebegeräte fürs Auf- und Abladen)
- Verkehr (nur Tagzeit)

Tab. 7.7 Vergleich zu erwartender Lärmwirkungen im Bohrbetrieb /FRK 07/

| Arbeitsprozess | Lärmpegel in dB(A) |
|---|---------------------------|
| Bohren (Luftspülung) ^a | 85 ^c – 125 |
| Bohren (Flüssigspülung) ^b | 75 – 80 |
| Produktions-Tests ^b | 70 – 100 |
| Bauarbeiten mit Schwermaschinen ^b | < 90 |
| <small>(^a Entfernung 7,5 m, ^b Entfernung 15 m, ^c mit Schalldämpfung)</small> | |

Lärmemissionen sind zudem mit den Fahrverkehren (Zufahrt, Bohrplatz; werktags) verbunden. Während der hydraulischen Stimulation des Reservoirs oder während Zirkulationstests kann es zu einer Lärmbelästigung durch den Einsatz von Pumpen kommen.

Betrieb

Während des Anlagenbetriebs kann es zur Schallentwicklung durch den Betrieb von Zellenkühlern und den Betrieb der Förder- und Reinjektionspumpe kommen.

Rückbau

Eine Überschreitung von Schallgrenzwerten ist bei Rückbaumaßnahmen nicht zu erwarten.

7.5.2.2.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Vor allem plötzliche Schallemissionen können zur Scheuchwirkung, aber vor allem zur Irritation von Menschen und Tieren führen.

7.5.2.2.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Durch Schallschutzwände um den Bohrplatz und lokalen Schallschutz an Stromgeneratoren direkt an den Maschinen sind ab einer Entfernung von ca. 200 m zum Bohrplatz keine unzulässigen Geräusche mehr festzustellen /GTV 13/.

Nach /KAI 04/ sind folgende Maßnahmen möglich, um die Lärmemissionen im Bohrbetrieb zu vermindern:

- Vermeidung von Dieselaggregaten und Verwendung von Netzstrom, wenn möglich (Dieselaggregate nur für Notstrom bei Netzausfall)
- Verbesserung der Lärmemissionen durch zusätzliche Lärmschutzverkleidungen von Anlagenkomponenten
- Sämtliche Peripherieanlageteile auf dem Boden (Schlammumpen, Siebanlagen, Zentrifugen, Hebewinde) sollten eingehaust oder mit Lärmschutzwänden ausgerüstet werden
- Optimale lärmtechnische Ausrichtung der Geräte (Standort der Geräte nahe an der Lärmschutzwand)
- Transporte und lärmintensive Arbeiten sollten ausschließlich während der Tageszeiten erfolgen.

Auch die Schallemissionen einer Geothermieanlage im Betrieb können durch die Einkapselung schallintensiver Anlagenbauteile stark vermindert werden. Die Geothermieanlage in Unterhaching ist z. B. komplett eingekapselt und somit sehr geräuscharm.

Bei der Geothermieanlage in Insheim wurden z. B. die Lüfter zur Kühlung des Sekundärkreismittels optimiert, sodass ihre Schallemissionen stark vermindert sind.

7.5.2.2.4 Bewertung

Bei allen Arbeiten müssen die Vorschriften der TA-Lärm eingehalten werden. Folgende Grenzwerte werden in der TA-Lärm aufgeführt:

- in reinen Wohngebieten: tags 50 dB(A), nachts 35 dB(A),
- in Gewerbegebieten: tags 65 dB(A), nachts 50 dB(A),
- in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten: tags 60 dB(A), nachts 45 dB(A).

Kurzzeitige Spitzen (z. B. durch Abblasen) dürfen die Immissionsrichtwerte am Tage um nicht mehr als 30 dB(A) und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten. Bei der Errichtung einer Geothermie-Anlage wird in der Regel Tag und Nacht gebohrt. Eine Überschreitung der Immissionsrichtwerte ist ohne Lärmschutz wahrscheinlich; Lärmschutzmaßnahmen werden deshalb empfohlen.

Wie alle Anlagen unterliegen auch Geothermieanlagen der „Technischen Anleitung (TA) Lärm“. Diese legt die gesetzlich zulässigen Höchstwerte für Geräusche fest. Gemessen wird immer am Immissionsort, also nicht an der Anlage selbst, sondern z. B. am nächstgelegenen Wohnhaus. In einem allgemeinen Wohngebiet gilt als nächtlicher Grenzwert 40 dB (A), das entspricht dem Brummen eines Kühlschranks /GTV 13/.

7.5.2.3 Stoffliche Immissionen in die Luft

7.5.2.3.1 Projektphasen

Erkundung

In allen Projektphasen eines Geothermie-Projektes treten Abgase aller Arten von Verbrennungsmotoren der Baufahrzeuge oder der Dieselgeneratoren auf.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Der Betrieb von Baugeräten und Maschinen zur Herrichtung des Bohrplatzes sowie der LKW-Verkehr führen zu Schadstoffausstößen.

Durch den Betrieb von Dieselgeneratoren zur Stromgewinnung während des Bohrbetriebes oder zum Betrieb der Pumpen während Stimulationsmaßnahmen werden ebenfalls Abgase produziert.

Während des Bohrbetriebs können sich Gase aus Gesteinsschichten in der Bohrspülung lösen. Diese können an der Oberfläche durch die Verringerung des Druckes wieder entgasen. Insbesondere das toxische Sauer gas (Schwefelwasserstoff) beinhaltet das Risiko einer Schutzgutverletzung „Menschliche Gesundheit“ in Folge eines Einatmens, wenngleich H₂S aufgrund seines penetranten Geruchs sehr frühzeitig bereits in geringen Konzentrationen wahrgenommen wird.

Bei vorbereitenden Förder- bzw. Zirkulationstests kann es zeitweise zu sichtbaren Dampf-Schwaden kommen. Das bei den Tests geförderte Thermalwasser wird dabei in ein Auffangbecken geleitet. Bei kalter Außenluft kann es dann zu Nebelbildung kommen.

Betrieb

Im störungsfreien Anlagenbetrieb zirkuliert das Thermalwasser in einem geschlossenen Kreislauf und führt nicht zu einer Dampf-Bildung. Während Wartungsarbeiten von Anlagenbauteilen wird das Thermalwasser z. B. bei der Anlage in Landau in ein Zwischenbecken geleitet (Wärmesenke) und danach wieder in die Lagerstätte injiziert. Durch das kontrollierte Entspannen des Thermalwassers an der Oberfläche kommt es zu einer starken Dampf-Bildung. Während des Anfahrens der Anlage nach einem Stillstand wird der Thermalwasserstrom temporär ebenfalls über das Zwischenbecken geleitet, was ebenfalls zu einer Dampf-Bildung führte. Dieses Verfahren wird nicht bei allen derzeit realisierten Anlagen in Deutschland angewendet.

Eine permanente Dampf-Bildung im Anlagenbetrieb, wie sie bei Hochenthalpie-Lagerstätten in Island oder Italien auftritt, ist in Deutschland aufgrund der unterschiedlichen Technik (Kalina oder ORC-Verfahren) und der Niedrigenthalpie-Lagerstätten nicht der Fall.

Der Betrieb von mit fossilen Brennstoffen befeuerten Zusatz- bzw. Spitzenlastanlagen führt zur Emission entsprechender Verbrennungsgase.

Der Betrieb von Geothermie-Kraftwerken kann in Abhängigkeit von den eingesetzten Menge an Sekundärkreislaufmitteln der Störfall-Verordnung unterliegen (z. B. wenn mehr als 10 Tonnen Isopentan im Geothermie-Kraftwerk gelagert werden, was die Grundpflichten nach StörfallV auslöst. Stoffe die im Anhang I der StörfallV aufgeführt sind, sind daher besonders relevant.

Rückbau

Siehe Erkundung.

7.5.2.3.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Die Emission von klimaschädlichen oder toxischen Gasen beeinträchtigt bei Überschreitung von Grenzwerten unmittelbar das Schutzgut menschliche Gesundheit.

Die Emissionen von Schwefelwasserstoff können eine beträchtliche olfaktorische Belastung darstellen ohne dass unmittelbare gesundheitliche Folgen zu besorgen sind.

7.5.2.3.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Wenn möglich, kann ein Großteil der Bohranlage mit Netzstrom betrieben werden, dadurch wird die Emission von Abgasen lokal reduziert. Die Emissionen zur Stromproduktion werden nicht betrachtet.

Zudem kann durch eine Verlagerung des LKW-Verkehrs auf die Schiene (wenn möglich) ein großer Teil der LKW-Fahrten, z. B. zum Abtransport des Bohrkleins reduziert werden /WAC 09/.

Zur Vermeidung einer plötzlichen Freisetzung von Gasen (u.a. auch Schwefelwasserstoffgas), werden Gasabscheider vorgeschrieben /BUJ 11/. Zudem kann den Prozessfluiden Ätznatron (Natriumhydroxid) zugemischt werden, welches den Schwefelwasserstoff neutralisiert. Für Bohrungen bei denen Schwefelwasserstoff auftritt gibt es Gasalarmpläne, die im Falle einer H_2S -Freisetzung zum Tragen kommen.

Die Verminderung der Dampfemissionen bei Wartungsarbeiten wurde in neueren Geothermieranlagen wie z. B. in Insheim optimiert. Der Thermalwasserstrom muss nun nicht mehr über das Zwischenspeicherbecken geführt werden, sondern wird kurzfristig über die entsprechende Kühlung geleitet.

7.5.2.3.4 Bewertung

Gasemissionen aus Prozessfluiden werden im planmäßigen Bohrbetrieb durch entsprechende Gasabscheider aufgefangen und wenn nötig an Ort und Stelle abgefackelt.

Bei einer entsprechenden Druckerhaltung im Anlagenbetrieb wird ein Ausgasen möglicher Gase ebenfalls verhindert.

Der Gasaustritt aus der Lagerstätte durch Klüfte bis an die Oberfläche wird aufgrund der großen Tiefe in der Regel von mächtigen Gesteinsüberdeckungen behindert. Einerseits sind im Lockerstein keine Klüfte ausgebildet und andererseits kann der advektive Gastransport allenfalls im Porenraum gröberer klastischer Gesteine (Sand, Kies) oder diffusiv in feinkörnigen Gesteinen (Ton, Schluff) erfolgen. Auch Störungen bieten in Lockergesteinen keine bevorzugte Wegsamkeiten, da keine offenen Bahnen ausgebildet sind, sondern die Gesteinsbestandteile durch Verschleppung des Gefüges auf tektonische Bewegungen reagieren /PGF 12/.

Dampfemissionen, die während der Erschließungsphase bei Zirkulationstests oder im Anlagenbetrieb bei Anlagenstillzeiten auftreten, müssen noch optimiert werden, weil diese, auch wenn sie keine umweltgefährdenden Inhaltstoffe enthalten, zu einer großen Verunsicherung in der Bevölkerung führen.

7.5.2.4 Stoffliche Immissionen in den Boden und oberflächliche Gewässer

Der Boden erfüllt nach (§ 2 Abs. 2 BBodSchG) folgende Aufgaben /SCN 12/:

- Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen („Lebensraumfunktion“)
- Bestandteil des Naturhaushaltes, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen („Regler- und Speicherfunktion“)
- Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen auf Grund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers („Filter- und Pufferfunktion“)
- Funktionen als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte („Archivfunktion“)
- Nutzungsfunktionen (Rohstofflagerstätte, Fläche für Siedlung und Erholung, Standort für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung. Standort für sonstige wirtschaftliche und öffentliche Nutzungen, Verkehr, Ver- und Entsorgung)

Nach § 27 des Wasserhaushaltsgesetzes muss eine Bewirtschaftung oberflächlicher Gewässer so erfolgen, dass eine nachteilige Veränderung ihres ökologischen und chemischen Zustandes vermieden und ein guter ökologischer und chemischer Zustand erhalten oder erreicht wird /BDJ 09/.

7.5.2.4.1 Projektphasen

Erkundung

Durch eine Befahrung der Geländeoberfläche mit Erkundungsfahrzeugen, kann es zu einem Austrag von Öl und Schmierstoffen kommen.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Durch Unfälle beim Transport und der Lagerung von Gefahrstoffen an der Geländeoberfläche können Schadstoffe, wie Chemikalien, Kraftstoff, Schmier- und Kühlmittel der Fahrzeuge und der Bohranlage in den Boden und oberflächliche Grundwasser gelangen /FRK 07/. Durch genehmigte Ableitungen von nicht wassergefährdenden Abwässern in Vorfluter kann es zu einer kurzzeitigen Eintrübung von Oberflächengewässern kommen.

Tiefe Thermalwässer sind in der Regel hoch mineralisiert (Solen). In den Wässern aus dem Norddeutschen Becken oder dem Oberrheingraben können bis zu 300 g/l an Inhaltsstoffen gelöst sein /SEI 08/. In diesen Solen sind hohe Konzentrationen an Metallen enthalten.

Bei Störfällen wie z. B. einem unkontrollierten Blow-out oder bei Undichtigkeiten an Lagerbehältern, Stapeltanks oder dem Zwischenspeicherbecken, kann Thermalwasser an der Oberfläche austreten und im Boden versickern. Im Normalbetrieb sind diese Emissionen nicht zu erwarten.

Betrieb

Anders als bei konventionellen thermischen Kraftwerken wird bei Temperaturen unter 200 °C, wie sie ausschließlich in den hydrothermalen Lagerstätten in Deutschland auftreten, nicht Wasser verdampft, sondern die Wärmeenergie wird durch einen Wärmetauscher an einen Sekundärkreislauf übertragen. In dem Sekundärkreislauf zirkuliert ein spezielles Arbeitsmittel, welches einen geringeren Siedepunkt besitzt. Die sogenannten Organic Rankine Cycle (ORC) verwenden organische Arbeitsmittel, wie z. B. Isopentan. Das Kalina-Verfahren verwendet ein Wasser-Ammoniak Gemisch /FRK 08/.

Bei Störfällen im Anlagenbetrieb können Gefahrstoffe (Chemikalien) und insb. Betriebsmittel des Sekundärkreislaufes oder Thermalwasser an der Oberfläche austreten und im Boden versickern. Thermalwasser kann aus dem Zwischenspeicherbecken bei Undichtigkeiten in den Boden und in das Grundwasser gelangen. Im Normalbetrieb sind diese Emissionen nicht zu erwarten.

Rückbau

Potentieller Eintrag von Öl oder Schmierstoffen von Fahrzeugen in den Boden.

7.5.2.4.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Der Eintrag von Schadstoffen führt zu einer Biodegradation der Lebewesen im Boden. Zudem kann das Pflanzenwachstum gestört werden. Über das Sickerwasser können die Schadstoffe zudem in das Grundwasser oder oberflächliche Gewässer gelangen /BLU 10/.

Der Eintrag wassergefährdender oder gesundheitsgefährdender / trinkwassergefährdender Stoffe in ein Oberflächengewässer führt zur Biodegradation der Lebewesen im Wasser und nach Überschreiten von Grenzwerten auch zur Gefährdung von Menschen und Tieren.

7.5.2.4.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Additive, die der Bohrspülung zugemischt werden, werden in geeigneten Behältern, die auf Spezial-Transportfahrzeugen montiert sind, transportiert. Unter den Transportbehältern befinden sich Auffangwannen aus Edelstahl, mit denen evtl. freigesetzte Stoffe aufgefangen werden /EWE 12/. Additive zum Anmischen der Bohrspülung werden auf dem Bohrplatz in geeigneten Silos gelagert und vor Ort dem Wasser beigemischt.

Ein vom Bohrplatz ausgehender stofflicher Eintrag kann durch eine entsprechende Bohrplatzeinrichtung minimiert bzw. ausgeschlossen werden (siehe Kap. 3.2.2). Durch den Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (WEG) wurden Richtlinien und Leitfäden erarbeitet, die die Mindestanforderungen an Bohrplätze beschreiben und die als Konkretisierungshilfe der bestehenden gesetzlichen Bestimmungen dienen /MEI 12a/. Jeder Bohrplatz wird zudem durch das zuständige Bergamt abgenommen. Durch vorbeugende Maßnahmen wie Leckage-Überwachungssysteme, Ablaufrinnen und Auffangbehältnisse (Slopsysteme) können Umwelteffekte vermindert oder ausgeschlossen werden /BUJ 11/. Für die Entwässerung des Bohrplatzes werden zwei Abwasserbecken errichtet, so dass der WGK (Wassergefährdungsklassen)-Bereich und der sonstige Bereich separat entwässert werden können.

Durch einen Bohrloch-Preventer wird der unkontrollierte Ausfluss von Prozesswasser bei Bohrarbeiten an der Oberfläche ausgeschlossen. Bohrlochabsperreinrichtungen bedürfen einer Betriebsplangenehmigung nach §§ 51, 52, 54, 56 BbergG. Vorschriften für Bohrlochabsperreinrichtungen sind auch in § 112 und § 113 Bergverordnung für

Tiefbohrungen, Tiefspeicher und die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen (BVOT) enthalten /NRW 06/.

Es sollte zudem eine sorgfältige geologische Recherche auch in Hinblick auf erfolgte Bohrungen und Schadensfälle im Explorationsgebiet erfolgen. Somit können schon im Vorfeld mögliche beispielsweise artesische Gesteinsschichten identifiziert werden.

In der Betriebsphase können Schadstoffe nur durch Störfälle in den Boden gelangen. Dies kann z. B. durch Leckagen oder einen unsachgemäßen Umgang mit Stoffen an der Oberfläche erfolgen. Herr Reinecker von der Firma GeoT beantwortete diese Fragestellung in Laufe eines Bürgerdialoges in Groß Gerau folgendermaßen /HOL 13a/:

„Falls eine Leckage trotz aller Vorsichtsmaßnahmen auftritt, sind folgende Vorkehrungen getroffen: Das Kraftwerk wird außer Betrieb genommen und durch technische Einrichtungen (Schieber, Ventile etc.) die Menge an ausgetretener Flüssigkeit begrenzt. Die Flüssigkeiten werden umgehend mit Bindemitteln aufgefangen. Der Boden ist so abgedichtet, dass kein Wasser in den Untergrund gelangen kann und ist beckenartig aufgebaut, so dass die ausgetretene Flüssigkeit den gesicherten Bereich nicht verlassen kann. Durch Sicherheitsüberwachungseinrichtungen wird Personal alarmiert, welches die Sicherungsmaßnahmen überprüft und eine fachgerechte Beseitigung der ausgetretenen Flüssigkeiten veranlasst. Der Grundwasserschutz ist auch eines der wichtigsten Themen bei den Bauauflagen und den Betriebsplänen des Kraftwerks und unterliegt deshalb der besonderen Aufmerksamkeit der Zulassungs- und Genehmigungsbehörden.“

Geothermiekraftwerke werden in der Regel nicht permanent vor Ort überwacht. Von Bürgerinitiativen wird deshalb hinterfragt, wie bei Störfällen reagiert wird. André Glöckner von der Firma Unternehmenskommunikation ÜWG weist in Bezug auf das Geothermievorhaben in Groß Gerau auf folgenden Umstand hin:

„Das geplante Geothermiekraftwerk in Groß Gerau kann fernüberwacht werden. Im späteren Betrieb ist es somit möglich, von einer Leitwarte aus den Betriebszustand und die Betriebsparameter ferntechnisch zu überwachen und zu regeln. Um schnell Eingriffe tätigen zu können, muss daher nicht 24 Stunden rund um die Uhr Personal vor Ort vorgehalten werden. Sollte dennoch Personalbedarf vor Ort bestehen, wird dieses in der Regel gemäß eines Notfallplans benachrichtigt. Trotzdem wird während normaler Arbeitszeiten zu Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten fachtechnisch ausgebildetes

Personal (z. B. Kraftwerkstechniker, Kraftwerksleiter oder Servicefirmen) vor Ort sein. Im Falle eines Brandes wird die ortsansässige Feuerwehr alarmiert /HOL 13a/.

7.5.2.4.4 Bewertung

Die Wahrscheinlichkeit des oberflächlichen Eintrages von Schadstoffen in den Boden und oberflächliche Gewässer ist bei einem nach den Richtlinien erstellten Bohrplatz und einem planmäßigen Betrieb sehr gering. Nur durch das Bersten von Stapeltanks zur Aufnahme oder Zwischenspeicherung der Bohrspülung oder Leckagen am Spülteich kann es zu einem oberflächlichen Schadstoffeintrag kommen (Störfall).

Wenn die Oberflächengewässer nicht unmittelbar in der Nähe des Emissionsherdes liegen, muss ein Expositionspfad vorhanden sein. Ist dieser nicht gegeben, ist der Eintrag von Schadstoffen bei einem Störfall in oberflächliche Gewässer nicht zu betrachten. Somit ist dieser Wirkfaktor stark abhängig von der Lokalität.

Das Anlagengelände ist üblicherweise betoniert und versiegelt und mit Regenablauf- rinnen sowie Auffangbecken versehen. Somit ist auch hier ein Eintrag von Schadstoffen in den Boden sehr gering. Zudem werden bei einem Rohrbruch aufgrund des Druckabfalles automatisch Absperrarmaturen betätigt damit ein unkontrolliertes Auslaufen von Thermalwasser verhindert.

Die Betriebsführungs-, Alarmierungs- und Notfallpläne sind immer abhängig vom Anlagentyp und dem Standortbedingungen. Somit müssen diese Pläne für jede Anlage separat erstellt werden. Die Erstellung eines einheitlichen Konzeptes für alle Anlagen ist somit nicht zu empfehlen.

7.5.2.5 Stoffliche Immissionen in das Grundwasser

7.5.2.5.1 Projektphasen

Erkundung

Siehe Wirkfaktor „Stoffliche Immissionen in den Boden und oberflächliche Gewässer“.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Durch den oberflächlichen Eintrag von Schadstoffen (siehe Kap. 7.5.2.4), können diese über den Boden oder oberflächliche Gewässer auch in das Grundwasser gelangen.

Um bestimmte Eigenschaften in Bohrspülungen zu verbessern, werden der Bohrspülung Additive zugemischt. Diese Additive werden detailliert in Kapitel 2.3 bzw. im Anhang beschrieben. Die Bohrspülung dringt in den bohrlochnahen Bereich ein, dies ist erwünscht und führt zur Bildung eines Filterkuchens, welcher die Bohrlochwand stabilisiert und abdichtet /FRK 07/. Die Bohrspülung sowie die Stimulationsfluide vermischen sich zudem mit Formations- und Lagerstättenwässern. Im Thermalwasser aus tiefen geologischen Gesteinsschichten können hohe Konzentrationen an gelösten Salzen und Metallen auftreten.

Betrieb

Bei einem Verlust der Bohrungsintegrität während des Anlagenbetriebes, kann es zu einem Ausfluss von Thermalwasser in oberflächennahe Aquifere kommen.

Rückbau

Siehe Wirkfaktor „Schadstoffimmissionen in den Boden“.

7.5.2.5.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Ein Eintrag von Prozessfluiden in oberflächennahe Grundwasserleiter während der Erschließung der Lagerstätte, von Thermalwasser im Anlagenbetrieb oder der Nachbetriebsphase kann Trinkwasserressourcen nachteilig beeinträchtigen.

Der Eintrag von Mikroorganismen in das Grundwasser mittels Bohrspülung kann die Ausbildung von Biofilmen durch Bakterien und Algen induzieren /PGG 11/. Zudem spielen mikrobielle Prozesse eine ausschlaggebende Rolle bei Lösungs- und Fällungsreaktionen im Grundwasser (z. B. Verockerung) /PGG 11/.

Der Bohrlochausbau in einem oberflächennahen Aquifer stellt einen Eingriff in diesen dar. Insbesondere durch die Ringraumzementierung werden Fremdstoffe wie Zement, Verflüssiger, Erstarrungsverzögerer und Abdichtmaterialien in den Untergrund eingebracht.

Durch einen unkontrollierten Austritt von Thermalwasser während des Anlagenbetriebes in einen (nutzbaren) Aquifer, können Grenzwerte von grundwassergefährdenden bzw. trinkwassergefährdenden Stoffen überschritten werden.

Die zugelassenen Grenzwerte für z. B. Metalle lassen sich dem LAWA-Hinweis „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“ /LAW 04/ entnehmen. Leckagen können durch das Versagen der Bohrungsintegrität (Kap. 7.4.2) durch Korrosion oder durch hohe Scherkräfte im Bereich von Störungen entstehen.

7.5.2.5.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Der Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch wassergefährdende Stoffe wird durch das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) /BDJ 09/ geregelt. Die Grenzwerte für Stoffeinträge bzw. die Einteilung der Stoffe in Wassergefährdungsklassen (WGK) wird in der „Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe“ /BDJ 99/, /BDJ 05/ und dem LAWA-Hinweis „Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser“ /LAW 04/, /LAW 06/ beschrieben.

Für den Einsatz von Spülungszusätzen in Bohrspülungen sind die Vorgaben des DVGW-Merkblattes W 116 und W 115 /DVG 98b/ einzuhalten. Die Zulassung der Bohrspülung ist Teil des bergrechtlichen Betriebsplanes für die Bohrungsniederbringung. Es dürfen nur Stoffe zum Einsatz kommen, die im Betriebsplan durch die Bergbehörde zuvor zugelassen wurden. Durch die Verwendung von Anmischwasser mit Trinkwasserqualität für Bohrspülungen wird z. B. ein Eintrag von Mikroorganismen verhindert /DVG 98b/.

Die Infiltration von Bohrspülung in das umgebende Gestein ist nicht vermeidbar und sogar Teil des Bohrverfahrens. Während des Durchteufens von oberflächennahen Grundwasserleitern dürfen deshalb nur Stoffe verwendet werden, welche durch die Bergbehörde zugelassen wurden. Die Bohrung für die Ankerrohrtour wird mit Spülungen unter Ausschluss von grundwassergefährdenden Stoffen durchgeführt. Oft kann hier „Leitungswasser“ ohne Zusätze verwendet werden /SCI 12/.

Der Eintrag von Bohrspülung in bereits abgeteufte Bohrabschnitte wird durch unmittelbares Verrohren und Zementieren vermieden. Im Bereich oberflächlicher Grundwas-

serleiter besteht die Verrohrung aus mindestens drei einzementierten Röhren. Bei vollständigem Verlust der Bohrspülung sollte, wenn möglich, mit einer Luftspülung weiter gebohrt werden. Gefährliche Gase in der Bohrspülung werden durch Gasabscheider entfernt /BUJ 11/. Ein wichtiger Aspekt ist die Ausbildung des Bohrpersonals; dieses muss für den Bau von Geothermie-Bohrungen besonders geschult werden.

In der Betriebsphase wird das Thermalwassers in einem separaten Rohr innerhalb der Rohrtouren gefördert, somit kommt das Thermalwasser nicht in den Kontakt mit der äußeren Verrohrung (Casing). Der Ringraum zwischen der Verrohrung und der Förderrohrtour ist mit einer nicht korrosiven Flüssigkeit gefüllt. Zudem wird der Druck in der Flüssigkeit kontrolliert. Kommt es zu einem Druckabfall in der Flüssigkeit, kann dies einen Integritätsverlust der Bohrung bedeuten und es werden umgehend Gegenmaßnahmen eingeleitet. Für die Injektionsbohrung ist in der Regel keine separate Rohrtour innerhalb des Casings vorgesehen. Zudem baut sich innerhalb der Injektionsbohrung ein höherer Fluidruck auf, weil das Thermalwasser injiziert und nicht gefördert wird.

7.5.2.5.4 Bewertung

Bei einem ordnungsgemäßen Bohrbetrieb und bei der Berücksichtigung der in „Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung“ genannten Punkte ist nicht mit einem signifikanten Eintrag von Schadstoffen in den Untergrund zu rechnen.

Im Betrieb ist der Eintrag von Mikroorganismen in oberflächennahe Grundwasserleiter unwahrscheinlich. Bei Sicherstellung der Integrität der Bohrung insbesondere der Zementierung, besteht kein Kontakt des Thermalwassers mit dem oberflächennahen Grundwasser.

Zusammenfassend werden die möglichen Prozesse zum Schadstoffeintrag in oberflächennahe Grundwasserleiter nochmals aufgeführt und bewertet (siehe auch Kap. 7.4):

Pfad 0: Schadstoffimmissionen an der Oberfläche in den Boden und durch die Bodenpassage in das Grundwasser. Dieser Pfad wird im Kapitel 7.5.2.4 behandelt.

Pfad 1: Aufstieg von grundwassergefährdenden Fluiden entlang einer fehlerhaften Ringraumzementierung oder Ausfluss aufgrund von Leckagen in der Verrohrung und Schadstoffemissionen durch die Erschließungsarbeiten (Bohr- und Stimulationsprozess). Die einzementierten Standrohre stellen eine wirkungsvolle Abschirmung des

Grundwasserleiters vor dem Ausfluss der Bohrspülungen und im späteren Betrieb des Thermalwassers dar /KAI 04/. Während des Anlagenbetriebes sollte die Dichtigkeit (Integrität) der Bohrung von Zeit zu Zeit überprüft werden, um stoffliche Emissionen in den Untergrund auszuschließen. Die Integrität von Bohrungen muss durch entsprechende Messungen und Monitoringmaßnahmen gewährleistet werden. Dazu können folgende Verfahren angewandt werden (siehe auch Kap. 7.4.2):

- Druckprüfungen Bohrlochintegrität nach dem Bohrlochausbau
- Zementbondlogs
- Drucküberwachung des Fluides innerhalb der Förder- und Injektionsbohrung im Anlagenbetrieb

Pfad 2: Aufstieg von Fluiden in höher liegende Gesteinsschichten über Störungen oder Klüfte. Der Aufstieg von Fluiden aus tiefen geothermischen Lagerstätten ist aus folgenden Gründen unwahrscheinlich (siehe auch Bewertung Kap. 7.5.2.3):

- Bruchlängen bei Stimulationsmaßnahmen erreichen aufgrund der großen Tiefe der stimulierten Gesteinsschichten nicht oberflächennahe Grundwasserleiter
- Durch das Monitoring der seismischen Ereignisse können nicht planmäßig erzeugte Risse detektiert werden
- Störungen und Verwerfungen sind oft durch sekundäre Minerale verheilt

Modellierungen und Erfahrungen aus durchgeführten Projekten zur Stimulation von niedrigpermeablen geothermalen Lagerstätten ergaben, dass Risslängen maximal bis zu 500 m anwachsen können. Somit würden oberflächennahe Grundwasserleiter bei den Teufenbereichen der in Deutschland realisierten Geothermie-Projekte nicht durch künstlich erzeugte Risse erreicht. Zudem wird die Kluftausbreitung durch seismische Geophone überwacht (Abb. 7.15). Somit werden Klüfte, die weiter migrieren als prognostiziert, identifiziert und es können Gegenmaßnahmen getroffen werden. In der Abb. 7.15 erkennt man die so genannten seismischen Wolken. Jeder Punkt stellt ein Mikrobeben im Untergrund da.

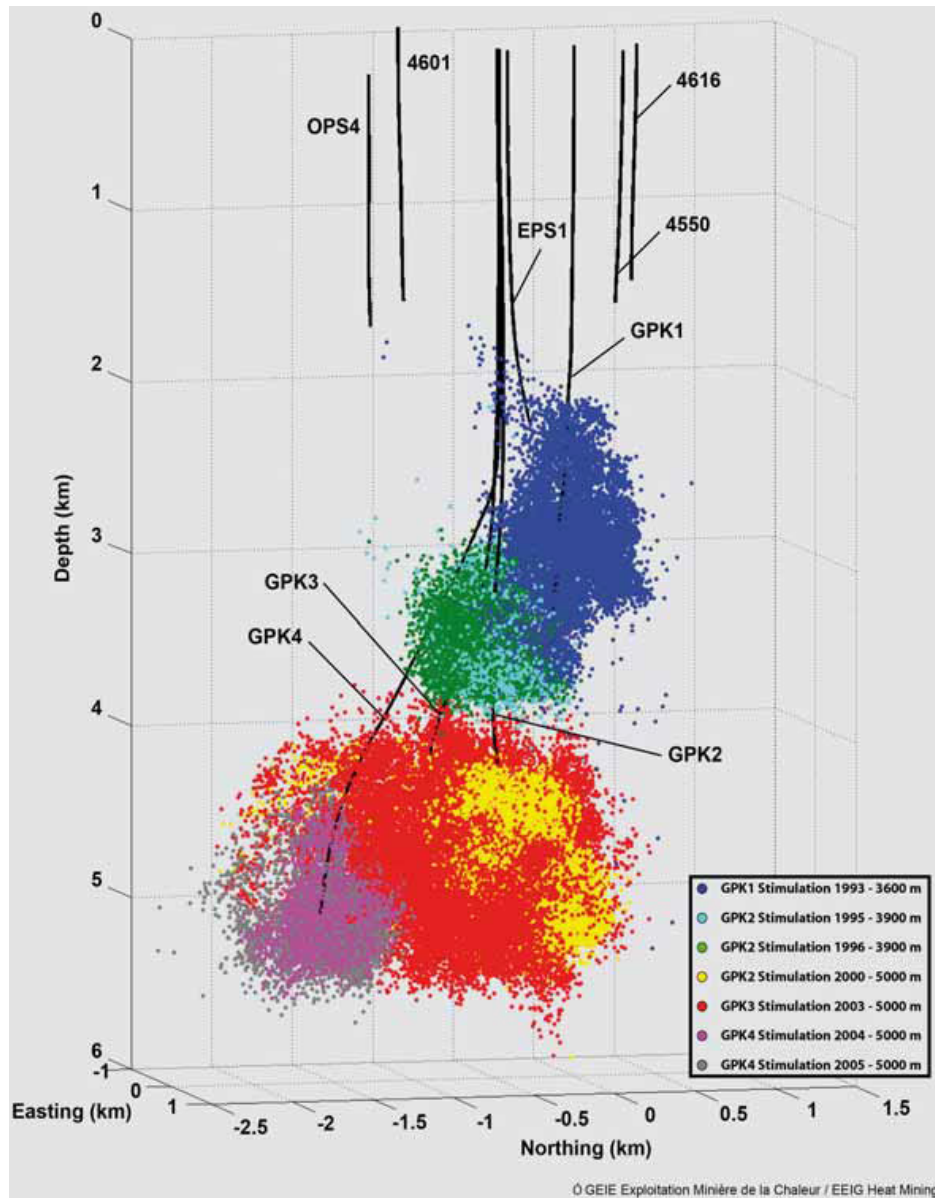


Abb. 7.15 Seismische Ereignisse während der einzelnen hydraulischen Stimulationsphasen am EGS-Standort in Soultz-sous-Forêts /MER 12/

Im Hintergrundpapier zur Stimulation geothermaler Lagerstätten /GTV 11/ wird hervorgehoben, warum eine Rissausbreitung in oberflächennahe Grundwasserleiter unwahrscheinlich ist:

- im Vorfeld jeder hydraulischen Stimulationsmaßnahme werden umfangreiche Untersuchungen und Minifrac's durchgeführt, die eine verlässliche Prognose der Rissausbreitung erlauben.

- Durch das Monitoring während der Stimulation (Druck, Seismoakustik) wird eine wirksame Kontrolle der Rissausbreitung möglich. Dadurch kann die hydraulische Stimulation ggf. rechtzeitig unterbrochen oder gar abgebrochen werden.
- Grundwasserhemmer in Verbindung mit dem großen vertikalen Abstand zwischen der Lagerstätte und oberflächennaher Aquifere, begrenzen in natürlicher Weise die Rissausbreitung auf Horizonte der Trinkwassernutzung.

Die für den Bohrlochausbau eingesetzten Materialien und Stoffe müssen in Bezug auf mögliche Veränderungen der Grundwassereigenschaften beurteilt werden. Nur wenn alle Materialien das Grundwasser nicht gefährden oder schädlich verändern, darf das Einbringen zugelassen werden. Der beabsichtigte Einsatz von Zement, Bentonit, Weichgelen oder Hilfsstoffen im Grundwasser bedarf daher einer näheren Betrachtung hinsichtlich der Auswirkungen auf die Grundwasserqualität. Grundsätzlich darf während des Einbringvorgangs auch keine Grundwasserverunreinigung durch Öle, Kraft- oder Schmierstoffe erfolgen. Das gilt insbesondere auch für die Lagerplätze dieser Stoffe. Aus diesem Grund dürfen aus wasserrechtlicher Sicht ausschließlich Baumaschinen eingesetzt und Lagerplätze errichtet werden, die diese Auflage einhalten.

7.5.2.6 Stoffliche Immissionen in das Reservoir

7.5.2.6.1 Projektphasen

Erkundung

In der Erkundungsphase findet kein Stoffeintrag in das Reservoir (geothermische Lagerstätte) statt.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Durch Bohrspülungen oder Fracking-Fluide kann Sauerstoff in das Reservoir eingetragen werden. Zudem kann der Eintrag zur Veränderung der Eh- und pH-Bedingungen führen. Dies führt zur Ausfällung oder Lösung von Mineralen. Dieser Prozess, sowie der direkte Eintrag von Feststoffen aus dem Bohrfluid in das Reservoir, führen zur Verstopfung des Porenraumes. Dadurch werden die Permeabilität und somit die Ergiebig-

keit der Lagerstätte herabgesetzt. Dadurch kann die Nutzung der hydrothermalen Energie unrentabel werden.

Betrieb

In der Regel wird im Anlagenbetrieb das geförderte Thermalwasser wieder in das Reservoir rückgepumpt, somit werden keine zusätzlichen Stoffe in das Reservoir eingebracht.

Rückbau

Über die Eigenschaften von eingebrachten Verfüllmaterialien liegen den Autoren gegenwärtig nur ungenaue Angaben zu den stofflichen Eigenschaften vor.

7.5.2.6.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Durch die Reduzierung der hydraulischen Durchlässigkeit kann die die Nutzung der hydrothermalen Energie unrentabel werden.

7.5.2.6.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Während des Bohrens in die Lagerstätte wird eine Bohrspülung verwendet, die das Speichergestein nicht schädigt. Zudem wird der hydrostatische Druck der Bohrspülung durch eine Verringerung der Spüldichte reduziert, damit der Eintrag von Bohrspülung in die Lagerstätte so gering wie möglich ist (underbalanced Drilling).

Durch den Einsatz von Inhibitoren, einem optimalen Druckmanagement in der Anlage, der Filterung von Feststoffen und der Verhinderung des Sauerstoffeintrages kann die Veränderung des geochemischen Milieus in der Lagerstätte während des Anlagenbetriebes vermindert oder vermieden werden.

7.5.2.6.4 Bewertung

Der Eintrag von Fremdstoffen in das Reservoir bzw. die geothermische Lagerstätte führt nicht zu einer Verletzung eines Schutzgutes. Im Wesentlichen wird durch die Verringerung der Permeabilität die Wirtschaftlichkeit der Lagerstätte herabgesetzt.

7.5.2.7 Emission von Radionukliden (gasförmig, flüssig, fest)

Die Emission von Radionukliden und damit die Abgabe von Radionukliden über die Grenzen des Betriebsgeländes hinaus finden in flüssiger oder gasförmiger Form statt. Die Abgabe in fester Form wird als geordnete Abgabe zur Beseitigung oder Verwertung eingeordnet. In flüssiger Form können Radionuklide mit dem Thermalwasser oder aber, bei Einhaltung von Ableitungsgrenzwerten, mit den der Kanalisation des Betriebsgeländes zugeführten Abwässer abgegeben werden. Eine detaillierte Betrachtung erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

Bei einem Ausfließen von Thermalwasser ist die Gefahr durch chemotoxische Stoffe gravierender als die Gefahr durch Radionuklide. Gleichwohl ist es denkbar, dass insbesondere mitgeführte Scale-Partikel zu einer Kontamination auf dem Betriebsgelände führen kann, die unbeachtet bleibt.

Die Element-Konzentrationen von Radionukliden im Thermalwasser selbst sind gering.

7.5.3 Funktionsverluste

Funktionsverluste von Boden oder Wasser bedingen den gänzlichen Ausschluss oder zumindest eine starke Einschränkung bisheriger Nutzungsformen. Die Umwandlung einer bisherigen Flächennutzung, wie der einer landwirtschaftlich genutzten Fläche, einer Waldfläche oder aber auch einer Brache auf dem Anlagenstandort führt zum Verlust der Fläche z. B. als Ackerstandort. Mit der Anreicherung von Frischwasser mit Schadstoffen verliert das Wasser z. B. eine mögliche Funktion als Trinkwasser.

7.5.3.1 Verlust von Bodenfunktionen

7.5.3.1.1 Projektphasen

Erkundung

Während der seismischen Vorerkundung durch Vibrotrucks kann es zu einer Befahrung und somit Verdichtung von Boden kommen, insbesondere durch Rüttelplatten.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Zur Gewährleistung der Befahrbarkeit sowie aus Gründen des Grundwasser- und Immissionsschutzes wird vor jeder Bohrung ein Bohrplatz hergestellt. Zusätzlich werden Lagerflächen, insbesondere für den abgetragenen Oberboden und die Infrastruktur, benötigt. Die Baumaßnahmen führen zum temporären Flächenverlust und Bodenverdichtung infolge des Abtrages, der Versiegelung und der Befahrung von gewachsenem Boden /SCN 12/ (siehe Kap. 3.2.2)

Betrieb

Durch den Bau von Betonflächen für die Geothermieanlage zur geothermalen Wärmenutzung und Stromerzeugung kommt es zur Versiegelung von Flächen, Veränderung und Beseitigung von Vegetation und zur Zerschneidung von Lebensräumen von Tieren.

Rückbau

Während des Rückbaus ist mit einer geringen Beeinträchtigung des umgebenden Bodens um das Anlagengelände zu rechnen. Nach der Renaturierung des Anlagengeländes kann ein umgelagerter Boden aufgebracht werden, der zumindest teilweise die ursprünglichen Funktionen erfüllt.

7.5.3.1.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Gewachsener Boden genießt einen höheren Schutzstatus als umgelagerter Boden. Gemäß den Zielen und Grundsätzen des BNatSchG sind Böden als Teil des Naturhaushaltes in ihrer Leistungs- und Funktionsfähigkeit zu schützen, zu pflegen und zu entwickeln bzw. so zu erhalten, dass sie ihre Funktionen im Naturhaushalt erfüllen können (§ 1 Abs. 3 Nr. 2 BNatSchG) /FRK 07/. Der Mutterboden ist so zu behandeln, dass er nutzbar bleibt, so dass er nach Abzug der Bohranlage und Rekultivierung des Platzes wieder verwendet werden kann. Die Funktionen des Bodens sind nachhaltig zu sichern oder wiederherzustellen /UBA 10/.

Durch mechanische Belastungen von Maschinen oder durch den Abbau von organischen Oberböden wird das Bodengefüge verdichtet. Eine Bodenverdichtung geht in der Regel mit einer Reduktion des Porenvolumens einher, wodurch die Lebensbedingungen für Bodenorganismen sowie deren wesentliche Lebensräume beeinträchtigt oder zerstört werden /HLR 04/.

Durch die Verdichtung des Bodens wird die Durchlässigkeit gegenüber Regenwasser vermindert. Dies führt zu Staunässe und Verschlammung. Auf versiegelten Flächen kann das meteorische Wasser nicht versickern und kann deshalb nicht zur Grundwasserneubildung beitragen.

7.5.3.1.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Für die Errichtung des Bohrplatzes auf Rasen- und Feldflächen sowie Waldböden gelten bestimmte Vorschriften, die aus den Vorgaben der oben genannten Gesetze resultieren (z. B. BVOT /NRW 06/ oder Bundesberggesetz /BDJ 80/).

Bei seismischen Feldarbeiten soll eine mögliche Bodenverdichtung durch die WEG-Richtlinie „Zulässige Kontaktflächendrücke bei seismischen Feldarbeiten“ vermindert werden.

Durch Optimierung der Bohrplatzfläche oder Verminderung von Maschinenfahrten kann die Bodendegradierung vermindert werden.

7.5.3.1.4 Bewertung

Die Gestattung einer 2D / 3D Vibroseismik bedarf eines Sonderbetriebsplanes. Flurschäden können mit entsprechenden Bemessungsgrundlagen ausgeglichen werden.

Der Bau eines befestigten Bohrplatzes sowie die Flächenbelegung durch die Geothermieanlage sind nicht vermeidbar. Eine erhebliche Beeinträchtigung des Schutzgutes Boden liegt vor, wenn schutzwürdige Böden mehr als geringfügig (< 1 ha) in Anspruch genommen werden. Die Fläche des Bohrplatzes beträgt weniger als einem Hektar. Die Identifizierung von schutzwürdigen Böden erfolgt gemäß der Klassifizierung des jeweiligen Landesumweltamtes /UBA 10/.

Nach erfolgloser Bohrung kann der Bohrplatz wieder renaturiert bzw. der zwischengelagerte Mutterboden eingebracht werden. Unter diesen Aspekten und bei Einhaltung der Vorschriften wird der rechtliche Schutz des Bodens als ausreichend angesehen.

7.5.3.2 Verlust von Wasser (funktionen)

7.5.3.2.1 Projektphasen

Erkundung

In der Erkundungsphase kommt es nicht zu einer Degradation von Wasserfunktionen.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Zur Bereitstellung der Bohrspülung bedarf es eines stetigen Wasserverbrauchs von Leitungs-, Oberflächen- oder Grundwasser. Ein gewisser Anteil der Bohrspülung fließt vom Ringraum in die jeweiligen Gesteinsschichten ab. Dieser Wasserverlust muss ersetzt werden, damit der hydrostatische Druck auf die Bohrlochwand erhalten bleibt /BUJ 11/. In Abhängigkeit vom Bohrlochvolumen und den geologischen Randbedingungen kann die Spülmengemenge unter Annahme durchschnittlicher Spülmengeverluste zwischen ca. 1.000 bis 4.000 m³ je Tiefbohrung liegen (siehe Kap. 3.2.3).

Für hydraulische Stimulationsmaßnahmen muss ein großes Frischwasservolumen auf dem Bohrplatz verfügbar sein. Die benötigte Wassermenge ist abhängig von der Lagerstätte bzw. den geplanten Stimulationsmaßnahmen und liegt in einer Größenordnung zwischen 30.000 und 250.000 m³ (siehe Kap. 3.3.2).

Betrieb

Während des Anlagenbetriebes wird das in der Lagerstätte vorhandene Thermalwasser als Prozesswasser verwendet; bislang musste bei keinem Tiefengeothermie-Projekt in Deutschland zusätzliches Wasser der Lagerstätte zugeführt werden.

Rückbau

Beim Anlagenrückbau ist nicht mit einem signifikanten Wasserverbrauch zu rechnen.

7.5.3.2.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Degradierung der Wasserqualität insbesondere von Trinkwasser, durch die Vermischung mit wasser- bzw. gesundheitsgefährdenden Stoffen (siehe auch Einwirkungen auf das Schutzgut Kap. 7.5.2.4 und 7.5.2.5).

7.5.3.2.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Durch eine Aufbereitung von Prozesswasser (Bohrspülung, Stimulationsfluide) an der Oberfläche kann der Bedarf an Oberflächen- oder Grundwasser reduziert werden. Die Entnahme von Wasser bedarf gemäß Wasserhaushaltsgesetz (WHG) einer wasserrechtlichen Erlaubnis.

7.5.3.2.4 Bewertung

Das benötigte Wasser zum Anmischen der Bohrspülung oder der Stimulationsfluide kann aus dem öffentlichen Wassernetz oder aus Oberflächen- oder Grundwasserquellen entnommen werden. In allen Fällen sind die Entnahmen temporär und führen nicht zu einer längeren Beeinträchtigung der Strömungs- oder Druckverhältnisse im Untergrund.

Das Wasser, welches für den Bau des Anlagen-Gebäudes benötigt wird, ist im Gegensatz zur benötigten Wassermenge, die zur Erschließung der Lagerstätte benötigt wird, vernachlässigbar.

Da im Anlagenbetrieb das anstehende Thermalwasser aus der Lagerstätte als Prozesswasser verwendet wird, muss bei der geothermalen Nutzung von hydrothermalen Lagerstätten kein zusätzliches Wasser mehr zugeführt werden. Auch bei der geothermalen Nutzung von petrothermalen Lagerstätten, wie z. B. in Soultz-sous-Forêts, wurden bislang ausreichende Förderraten durch Thermalwasser aus der Lagerstätte erreicht und es musste dem Thermalwasserkreislauf kein zusätzliches Frischwasser zugeführt werden.

Tiefe Geothermieanlagen in Deutschland verpressen das geförderte Thermalwasser durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund. Somit entfällt eine Entsorgung

möglicher hochmineralisierter Wässer und es erfolgt keine gravierende Druckreduzierung in der Lagerstätte.

Eine Abwertung von Wasser findet statt, wenn frisches Oberflächen- oder Grundwasser mit hochmineralisiertem Thermalwasser vermischt oder mit Additiven versetzt wird. In beiden Fällen ist das Wasser danach ungenießbar und muss besonders behandelt werden. Die Bohrspülung und Stimulationsfluide werden entweder entsorgt oder aufbereitet. Wenn Frischwasser zur Stimulation von Lagerstätten verwendet wird, verbleibt dieses in der Regel im Untergrund und führt zu keinen Nachteilen für die Umwelt.

7.5.4 Geomechanische und hydraulische Einflüsse

7.5.4.1 Hebung und Subsidenz der Geländeoberfläche

Das Heben und Senken der Geländeoberfläche wird durch elastoplastische Verformungen der Locker- und Festgesteine im Untergrund bewirkt. In der Bodenmechanik ist der Begriff der Setzung bzw. Subsidenz für die Verformung poröser Medien gebräuchlicher. Subsidenz entsteht durch Änderungen der effektiven Spannung, die durch die Änderung des Fluiddruckes in den Poren im Bereich der Förderbohrung und der Wiedereinleitung des abgekühlten Wassers und einer damit verbundenen Temperaturänderung im Bereich der Injektionsbohrung verursacht wird /KÜN 02/.

7.5.4.1.1 Projektphasen

Erkundung

Keine geomechanischen Ereignisse in der Erkundungsphase.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Das Durchteufen leicht löslicher oder quellender Gesteinsschichten, wie Salz, Gips, Anhydrit oder Ton und eine nachfolgende Lösung oder Quellung dieser, kann zu Hebungen oder Subsidenz an der Oberfläche oder zu Problemen beim Bohrlochausbau führen /PGG 11/.

In dem Ort Staufen im Breisgau wurde während des Abteufens oberflächennaher Geothermie-Bohrungen eine Gips-Keuper Schicht durchbohrt. Dies ist bei der richtigen Durchführung der Bohrung unkritisch. Kurz nach der Bohrung kam es aber im Stadtgebiet zur Hebung der Geländeoberfläche. Dies führte zu Schäden an Gebäuden. Man vermutet, dass sich aufgrund von Wasserzuflüssen in eine anhydritische Gesteinschicht (Anhydrit) in Gips umgewandelt hat. Dieser Vorgang ist mit einer Volumenzunahme von bis zu 60 % verbunden. Man vermutet, dass die Verrohrung gegen den im Liegenden anstehenden gespannten Grundwasserleiter nicht ausreichend abgedichtet bzw. die Ringraumzementierung nicht ordnungsgemäß eingebracht wurde /LGR 10/.

In Bergbaugebieten sowie Karstgebieten können Hohlräume angebohrt werden, in denen keine Verrohrung möglich ist /FRK 07/.

Betrieb

Durch das Entnehmen von Grundwasser kann der Porendruck im Untergrund soweit abgesenkt werden, dass es zur Kompaktion des Korngerüsts von Sedimenten kommen kann. Dies führt zu einer Subsidenz der Geländeoberfläche. Bei der Tiefengeothermie in Deutschland befinden sich die Lagerstätten in mehr als zwei Kilometern Tiefe. Hier sind die Gesteine stark kompaktiert und das Korngerüst ist fest miteinander verbunden.

Zudem wird die Lagerstätte im Bereich der Injektionsbohrung abgekühlt, was zu einer Kontraktion des Gesteines führen kann. Der Prozess und mögliche Auswirkungen werden im Kap. 7.5.5.3 beschrieben.

/KÜN 02/ untersuchte die mögliche Subsidenz, die bei der geothermischen Nutzung eines Modell-Sandsteinaquifers unter Verwendung einer Förder- und Injektionsbohrung auftreten kann. Die Modellierungen ergaben, dass eine maximale Subsidenz von 2 bis 3 cm im Bohrungsbereich möglich ist, die aber bereits bei einer Entfernung von 200 m von der Bohrung um mehr als die Hälfte abnimmt. An der geothermischen Anlage Neustadt-Glewe wurde auf dem Anlagengelände eine Absenkung von 3 cm gemessen /FRK 07/.

Rückbau

Durch Rückbaumaßnahmen sind keine geomechanischen Ereignisse zu erwarten.

7.5.4.1.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Durch ungleichmäßige Hebung oder Senkung der Geländeoberfläche kann es zu induzierten Spannungen in überliegenden Gebäuden und nachfolgend zu Schäden an diesen kommen. Eine gleichmäßige Hebung oder Senkung der Geländeoberfläche induziert keine Spannung und ist daher unproblematisch.

7.5.4.1.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Bei Geothermie-Vorhaben wird das geförderte Thermalwasser durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund injiziert. In den meisten Fällen erfolgt die Injektion des Thermalwassers stromaufwärts in der Lagerstätte oder in einer im Hangenden befindlichen Schicht, die hydraulisch (über Störungen, Klüfte) mit der Lagerstätte verbunden ist. Durch das hydraulische Gefälle fließt das Thermalwasser im Untergrund von der Injektions- zur Förderbohrung durch den Kluft- und Porenraum, der damit fluidgefüllt bleibt. Die hydraulische Verbindung der beiden Bohrungen kann durch Zirkulations- oder Tracertests sicher nachgewiesen werden. Damit bleibt auch der Porendruck im Reservoir nahezu konstant und verhindert effektiv Setzungsprozesse /MUE 12/.

In der Literatur wird häufig der Begriff „geschlossener Kreislauf“ für den Thermalwasserfluss zwischen Injektions- und Förderbohrung verwendet, um damit kenntlich zu machen, dass kein Fluidaustausch zwischen der Lagerstätte und grundwasserführenden Schichten insbesondere im Hangenden stattfindet. Im Grunde ist der Begriff „geschlossener Kreislauf“ nicht immer korrekt, weil meist versucht wird, einen großen zerklüfteten Bereich an die Förder- und Injektionsbohrung anzuschließen, um einen ausreichenden Thermalwasserfluss zur Förderbohrung zu erreichen. Durch die Temperaturgradienten ist davon auszugehen, dass eine konvektive Durchmischung des injizierten Wassers und des wärmeren Thermalwassers im umgebenden Gestein stattfindet. Der Einzugsbereich bzw. die Zeit, welche das Thermalwasser braucht, um von der Injektions- zur Förderbohrung zu fließen, kann durch Tracertests ermittelt werden. Bei der Tiefengeothermie handelt es sich deshalb um ein im Untergrund „offenes“ System. Wird das Reservoir aber in erster Näherung als abgeschlossene Einheit betrachtet, kann das System als „geschlossenen“ bezeichnet werden. Dies ist bei den meisten Geothermie-Projekten der Fall, weil der Förderhorizont von Grundwasserhemmern überlagert wird und ein direkter Austausch der Fluide zwischen tiefen und oberflächennahen Auiferen nicht gegeben ist. Anhand der Zusammensetzung von Thermalwasser

im Norddeutschen Becken fand /WOL 11/ z. B. heraus, dass diese häufig marinen Ursprungs sind und beim Absinken des Beckens in den Sedimenten eingeschlossen wurden. Würden meteorische Wässer mit der thermalen Lagerstätte im Kontakt stehen, könnte dies anhand von Altersdatierungen (Auftreten z. B. von Tritium) mit Radionukliden identifiziert werden. Für jedes Geothermie-Projekt müssen die geologischen Verhältnisse gesondert untersucht werden, da die überlagernden Schichten überall unterschiedlich sind.

Durch die Abkühlung des Thermalwassers an der Oberfläche können Minerale ausfallen. Durch unterschiedliche Temperatur- und Druckverhältnisse wird das geochemische Gleichgewicht zwischen gefördert und anstehenden Thermalwassern in der Lagerstätte gestört. Durch das Reinjizieren kann es in der Mischungszone zu Ausfällungs- und Lösungsprozessen kommen, je nachdem welches Fluid betrachtet wird. Durch die Zugabe von Inhibitoren und Druckhaltmaßnahmen versucht man, die Ausfällungen insbesondere in der oberirdischen Anlage zu verhindern.

Das Baden-Württembergische Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg hat das Informationssystem ISONG entwickelt. Wenn Bohrungen in Karbonatgesteine bzw. Karsthohlräume oder größere Spalten abgeteuft werden, kann es zu einem deutlichen Spülungsverlust kommen. Bei einem Spülungsverlust von mehr als 2 l/s, sowie beim Anbohren von großen Hohlräumen (> 2 m), empfiehlt das Informationssystem die Bohrung abubrechen. Ein Abbruch der Bohrung kann erforderlich werden, da die Gefahr besteht, dass das Bohrloch nicht mehr wirksam abgedichtet werden kann. Insbesondere in Gebieten mit deutlicher Verkarstung oder Klüftung des Untergrundes oder beim Vorkommen stark gespannter (artesischer) Grundwässer kann es zu einer unzureichenden Verpressung bzw. Abdichtung von Bohrlöchern kommen. Liegt die Verkarstung weniger als 50 m unter Geländeoberfläche, sind bohrbedingte Brüche mit Setzungen an der Erdoberfläche nicht auszuschließen /LGR 11/.

7.5.4.1.4 Bewertung

Eine mögliche Subsidenz der Geländeoberfläche, die durch die geothermische Nutzung der Lagerstätte induziert wird, ist marginal. Die Modellierungen von /KÜN 02/ zeigen sehr geringe Absenkungswerte von 2 – 3 cm. Zum Vergleich betragen die primären Setzungsbeträge nach dem Errichten von Gebäuden auf durchschnittlich guten

Baugrund 20 – 60 mm. Diese Absenkungsbeträge liegen weit unter denen aus dem Steinkohle-, Erz- und Kalibergbau.

Durch das Wiedereinspeisen von Thermalwasser in die hydrothermale Lagerstätte wird einem Porendruckabfall und einer damit verbundenen Setzung der Kornmatrix entgegengewirkt.

Durch das Quellen von Anhydrit aufgrund eines Wasserzutrittes kann es zu Hebungsprozessen kommen. Damit es zu einer Hebung kommt, muss der Quelldruck von Anhydrit höher sein als der Gebirgsdruck. Laut /STE 10/ kann die Umwandlung von Anhydrit zu Gips einen maximalen Quelldruck von 5,5 MPa aufbauen. Dies entspricht ungefähr einer Tiefe von 255 m, wenn man von einer mittleren Gesteinsdichte des überlagernden Gesteines von 2.200 kg/m^3 ausgeht. Somit könnte Anhydrit der sich in tiefen $> 255 \text{ m}$ befindet das überlagernde Gestein nicht anheben. Tiefengeothermie-Lagerstätten befinden sich in Teufenbereichen $> 2.000 \text{ m}$., In diesen Tiefen sind Hebungsvorgänge aufgrund des Quellens von Anhydrit nicht möglich. In Tiefen $< 255 \text{ m}$ reicht der Quelldruck unter den oben genannten Bedingungen aus um oberflächennahe Schichten anzuheben, deshalb muss die Bohrungsintegrität, insbesondere des Ringraumzementes gewährleistet sein.

7.5.4.2 Bodenerschütterungen

§ 3 BImSchG: Erschütterungen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen.

Grenzwerte sind der DIN 4120 zu entnehmen: Schwingungsgeschwindigkeit von $< 5 \text{ mm/s}$ bei Wohngebäuden bzw. 3 mm/s bei denkmalgeschützten Gebäuden. Für Menschen (DIN 4150/2) gilt die bewertete Schwingungsstärke oder die Beurteilungsschwingstärke KBFTr.

7.5.4.2.1 Projektphasen

Erkundung

Bodenerschütterungen können in allen Projektphasen auftreten. Während der seismischen Erkundung werden durch Erschütterungen an der Oberfläche seismische Signale in den Untergrund gesendet, die an den Grenzflächen der unterschiedlichen Boden- und Gesteinsschichten reflektiert werden. Die Laufzeiten der Wellen werden von Geophonen aufgenommen und von Seismographen registriert. Aus den Ergebnissen können die Teufen der Schichtgrenzen und somit geologische Profile erstellt werden. Diese so genannte Reflexionsseismik erfolgt unter dem Einsatz von Rüttelplatten unter einem LKW. Durch den Einsatz der Fahrzeuge sind Flurschäden möglich. Meistens werden die Fahrzeuge jedoch auf befestigten Wegen eingesetzt, weil die Übertragung der Vibrationen in den Untergrund somit effektiver ist /BUJ 11/.



Abb. 7.16 Seismische Erkundung durch Vibrotrucks

Die Vibrationen werden bevorzugt auf festem Untergrund, wie Straßen zwecks besserer Signalübertragung in den Boden, induziert /STO 11/.

Die dabei auftretenden Maximalkräfte können zwischen ca. 70 und 200 kN betragen. Bei der 2D-Seismik kann die Beanspruchung 2 bis 4 Tage andauern, zwei bis drei Wochen bei der 3D-Seismik. Die Auswirkungen der Bodenerschütterungen auf Mensch und Tier werden durch die Schwingungsfrequenz und Beschleunigung bestimmt, wobei erst ab ca. 400 mm/s^2 und 6 Hz eine für den Menschen unangenehme, erschreckende und ab ca. 2.100 mm/s^2 und 10 Hz eine schädliche Wirkung zu erwarten ist.

In unzugänglichen Gegenden werden auch Verfahren wie Sprengseismik in Bohrlöchern mit Teufen von 5 bis 150 m durchgeführt. Durch die Detonation kleiner Sprengladungen in den Bohrlöchern werden Erschütterungswellen erzeugt.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Bodenerschütterungen können zudem während der Erschließungsphase des geothermischen Reservoirs ausgelöst werden. Zur Vorbereitung der Bohrung wird in den Bereich des Grundwassersleiters ein Rohr mit einem großen Durchmesser gesetzt. Dabei wird ein Stahlrohr durch drehende Bewegungen oder durch Rammen in den Untergrund eingebracht /BUJ 11/. Durch das Rammen können Erschütterungen entstehen. Die induzierten Bodenerschütterungen sind jedoch sehr lokal und nur von kurzer Dauer (ein bis zwei Tage).

Bei der hydraulischen Stimulation geothermischer Lagerstätten, wird mit sehr hohen Drücken gearbeitet. In der Regel müssen die Drücke die Gebirgsspannungen übersteigen, um Klüfte zu erzeugen bzw. vorhandene Klüfte zu vergrößern. Durch einen (plötzlichen) Abbau von Scherspannungen im Untergrund können mikroseismische Ereignisse künstlich ausgelöst werden. Über die umliegenden Gesteinsschichten können sich die Erschütterungen bis zur Erdoberfläche ausbreiten. In der Regel liegen die Mikroben unter der Wahrnehmungsschwelle. Doch in manchen Fällen ist es bei der Stimulation tiefer geothermischer Lagerstätten in der Vergangenheit zu spürbaren Bodenerschütterungen an der Oberfläche gekommen /GTV 10/.

Zudem können durch Zirkulationstest bzw. Leistungstests nach der Erstellung der Geothermiebohrung die hydraulischen Verhältnisse im Untergrund verändert und somit seismische Ereignisse getriggert werden.

Betrieb

Der im vorherigen Kapitel beschriebene Spannungsabbau in Untergrund kann auch im Anlagenbetrieb auftreten. Durch die Entnahme und Injektion des Thermalwassers in das geothermische Reservoir kommt es wie bei Stimulationsmaßnahmen zu einer Porendruckerniedrigung. Der Prozess ist der Gleiche.

Rückbau

Während der Rückbaumaßnahmen der Geothermie-Anlage, kommt es nicht zu signifikanten Erschütterungen.

7.5.4.2.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Erschütterungen an der Oberfläche führen zur Irritation von Mensch und Tier. Beim Überschreiten bestimmter Bodenschwinggeschwindigkeiten können Gebäudeschäden nicht ausgeschlossen werden. Zudem ist der Akzeptanzverlust in der Bevölkerung hinsichtlich der Nutzung geothermaler Energiedurch das Auftreten von Bodenerschütterungen ein weiteres bedeutenderes Problem.

Im Bauwesen wird für die Gefahrenabschätzung von seismischen Ereignissen die DIN 4150 angewandt. Die DIN 4150 Teil 1 bis 3 beschreibt Erschütterungen im Bauwesen in Bezug auf die Vorermittlung von Schwingungsgrößen, Einwirkungen auf den Menschen sowie auf die bauliche Anlage. Eine Gefahr für Wohngebäude besteht nach DIN 4150 nur dann, wenn die Bodengeschwindigkeit über 5 mm/s liegt (und damit die Spürbarkeitsschwelle um etwa das 10-fache überschritten wird). Das wohl bekannteste Ereignis war das Beben in Basel. Während eines Geothermie-Projektes wurde der Untergrund stimuliert und dadurch ein Erdbeben von der Stärke 3,2 auf der Richterskala ausgelöst. Um die auslösenden Prozesse seismischer Ereignisse und deren Auswirkungen besser zu verstehen, wurde das MAGS-Projekt („MAGS – Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme“) und das GEISER-Projekt (**G**eothermal **E**ngineering **I**ntegrating **M**itigation of **I**nduced **S**eismicity in **R**eservoirs) durchgeführt.

7.5.4.2.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Bodenerschütterungen während der Erkundung können nicht verhindert werden. Die Vibrationen sind Teil des Erkundungsverfahrens. Während der Erschließungsphase sind Erschütterungen, die vom Bohrbetrieb ausgehen nicht zu vermeiden.

Bodenerschütterungen, die durch Stimulationsmaßnahmen und den Anlagenbetrieb ausgelöst werden, sind in ihren Magnituden weitaus größer und sollten vermieden werden. Mehrere Projekte befassten sich mit diesem Problem. Ein vollständig sicheres Verfahren zur Vermeidung dieser seismischen Ereignisse gibt es zurzeit nicht.

Es wurde ein Ampelsystem entwickelt, welches folgendermaßen angewendet wird: Zunächst erfolgt die Beobachtung der Mikroseismizität mit Hilfe eines geeigneten Netzes von Seismometern, welche die seismischen Magnituden bis zu einer gewissen Genauigkeit messen können. Das Ampelsystem sieht bestimmte Schwellwerte vor,

nach deren Überschreiten im Vorfeld festgelegte Maßnahmen ergriffen werden. Zum Beispiel wird nach dem Überschreiten bestimmter Schwellenwerte der Injektionsdruck reduziert oder die Injektion von Flüssigkeit komplett gestoppt.

7.5.4.2.4 Bewertung

Der Einsatz vibroseismischer Erkundungsverfahren führt zu temporären Umwelteffekten. Grundsätzlich muss die DIN 4150 beachtet werden: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden: DIN 4150-2. Einwirkungen auf Gebäude: DIN 4150-3.

Die Erschütterungen durch Bohrmaßnahmen und den Bau sind sehr lokal und temporär. Aufgrund des Abstandes der Bohrung zu Wohngebäuden bzw. Siedlungen ist nicht mit einer Beeinträchtigung dieser zu rechnen.

Dauererschütterungen und kurzzeitige Erschütterungen: Erschütterungen gelten nur dann als kurzzeitig, wenn sie für jedes Ereignis höchstens wenige Sekunden andauern und ihre Häufigkeit für Materialermüdungen und ihr zeitlicher Abstand für Resonanzerscheinungen unerheblich sind (z. B. einzelne Sprengerschütterungen).

Die Bodenbewegung wird als Geschwindigkeit in Millimeter pro Sekunde (mm/s) gemessen (Bodenschwinggeschwindigkeit). Spürbar sind Bodenschwingungen ab etwa 0,2 mm/s. Einige Beispiele für natürliche und künstliche Bodenbewegungen sind:

- 0,2 mm/s - Gewitter
- 0,2 mm/s - Schwerlastverkehr, 20 m Entfernung
- 0,3 mm/s - Überschallknall
- 2 mm/s - Presslufthammer, 10 m Entfernung
- 5 mm/s - Abrissarbeiten, 100 m Entfernung

Nach /KEI 10/ liegen die beobachteten maximalen Schwingungsgeschwindigkeiten ab einer Magnitude L von ca. 2,5 M_L über dem Anhaltswert für schützenswerte Gebäude (3 mm/s) DIN 4150. Ein Fit der bisherigen aufgezeichneten seismischen Ereignisse lässt vermuten, dass Beben $> 2,5 M_L$ auch den Anhaltswert für Wohngebäude (5 mm/s) überschreiten. Während Stimulationsversuchen eines Geothermieprojektes in Basel

kam es dort im Jahr 2006 zu seismischen Ereignissen bis zu einer Stärke von 3,4 auf der Richterskala.

7.5.4.3 Hydraulischer Kurzschluss

Der hydraulische Kurzschluss von - durch Grundwasserhemmern getrennten - Aquifere ist für viele problematische Prozesse verantwortlich, deshalb ist dieser Prozess als eigener Wirkfaktor aufgeführt.

7.5.4.3.1 Projektphasen

Erkundung

In der Erkundungsphase werden keine Aquiferstockwerke durchteuft.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Beim Abteufen der Bohrung können unterschiedliche Aquiferstockwerke durchbohrt und hydraulisch miteinander verbunden werden. Diese Aquifere sind meistens durch wasserundurchlässige Gesteine (Grundwasserhemmer), wie z. B. Ton hydraulisch voneinander getrennt. Das Wasser in den verschiedenen Aquifere kann sich im Druckpotenzial und im Stoffgehalt unterscheiden. Das Zufließen von unterschiedlich mineralisierten Wässern aufgrund eines unterschiedlichen Druckpotenziales in einen Aquifer mit geringerem Druck kann zur Ausfällung von Mineralen und zum Verkitten des Porenraums führen. Vor allem Tiefenwässer können unerwünschte Inhaltsstoffe, wie Kohlenwasserstoffe und Metalle enthalten, welche nicht in oberflächennahe Aquifere zur Trinkwassernutzung fließen dürfen /PGG 11/.

Betrieb

Die Alteration der Verrohrung oder der Zementation während des Anlagenbetriebes kann zu einem Integritätsverlust des Verbundsystems und damit zu Wegsamkeiten für Thermalwässer führen.

Auch eine nach dem Einbau physikalisch und chemisch stabile und dichte Ringraumzementierung kann durch korrosive Tiefenwässer alterieren. Sie kann durch chemische

Reaktionen mit höher mineralisierten bzw. sulfathaltigen Wässern oder durch freie Kohlensäure undicht werden. Dadurch ist ein vertikaler Transport entlang des Ringraumes von unerwünschten Stoffen über mehrere Grundwasserstockwerke möglich /PGG 11/. Das Informationssystem ISONG empfiehlt in solchen Gebieten die Verwendung von Zement mit einem hohem Sulfat-Widerstand (HS-Zement DIN 1164). Zementaggressive Grundwässer können wegen lateraler und vertikaler Fließvorgänge auch außerhalb von sulfathaltigen Gesteinen vorkommen. Es wird deshalb empfohlen, generell Zement mit hohem Sulfat-Widerstand (HS-Zement DIN 1164) zu verwenden /LGR 11/.

Zudem können bei einer falschen Wahl der Verrohrungsmaterialien diese korrodieren. Dadurch entstehenden Leckstellen im Rohr, durch die Thermalwasser während der Betriebsphase in den Untergrund ausfließen kann. Deshalb sollte bei stark korrosiven Thermalwässern Titanstahl verwendet werden.

Rückbau

Diese Prozesse gelten genauso für die Nachbetriebsphase. Auch nach dem die Bohrung ordnungsgemäß verschlossen bzw. verfüllt wurde, muss eine Alteration der Verschlussmaterialien in Betracht gezogen werden.

7.5.4.3.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Durch den Einfluss von Wässern aus tiefen in oberflächennahe Aquifere, die z. B. zur Trinkwassernutzung genutzt werden, können diese verunreinigt werden. Zudem können geomechanische Prozesse, wie Hebung oder Senkung, durch das Quellen oder Auflösen von Gesteinen induziert werden. Durch das Verbinden zweier Grundwasserstockwerke kam es in der Vergangenheit bei mindestens einem oberflächennahen Geothermie-Projekt zu einem Abfluss aus einem oberflächennahen Grundwasserleitern in tiefere Grundwasserstockwerke. Dies führte zu einer Setzung des Korngefüges bzw. der Geländeoberfläche.

7.5.4.3.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Um einen hydraulischen Kurzschluss zu vermeiden, gibt es Vorschriften und Richtlinien, welche die Abdichtung des Ringraumes vorschreiben, wenn Grundwasserstock-

werke durchbohrt werden /VDI 01/. Die VDI-Richtlinie bezieht sich im Wesentlichen auf oberflächennahe Geothermie-Bohrungen für Erdwärmesonden, kann aber auch Hinweise für tiefe Geothermiebohrungen enthalten.

Um einen hydraulischen Kurzschluss zu vermeiden, müssen die zu schützenden Gesteinsschichten abgesperrt, d. h. unmittelbar nach Fertigstellung des entsprechenden Bohrabschnitts verrohrt und zementiert werden. Vor allem in der Betriebsphase sollte die Integrität der Bohrung mit Hilfe von Monitoring-Maßnahmen (siehe Kap. 7.5.2.5) gewährleistet werden.

7.5.4.3.4 Bewertung

Während des Abteufens der Bohrung werden unterschiedliche Grundwasserstockwerke durch Bohrloch-Logs registriert und gegeneinander abgedichtet. Damit wird eine hydraulische Verbindung zwischen unterschiedlichen Aquiferen unterbunden. Durch Drucktests werden die Bohrungen auf ihre Dichtheit untersucht. Die Mächtigkeit der eingebrachten Zementierung wird durch Ultraschall Untersuchungen und Temperaturlogs entlang des Casings geprüft. Es ist allerdings sehr schwierig und Kostenaufwendig, eine fehlerhaft eingebrachte Ringraumzementierung zu reparieren.

In der Erschließungsphase sind mögliche Kurzschlüssen nur temporär und bis zum Ausbau bzw. bis zur Zementierung der Rohrfahrten vorhanden. Durch gelegentliche Druckprüfungen muss die Integrität der Bohrung auch während des Anlagenbetriebes sichergestellt werden.

7.5.5 Thermische Einflüsse

7.5.5.1 Thermischer Einfluss Atmosphäre

Das Arbeitsmittel des Sekundärkreislaufes wird nach der Entspannung in der Turbine im Kondensator abgekühlt und kondensiert. Dabei wird Wärme an die Atmosphäre oder Oberflächengewässer abgegeben (Wärmesenke). In Deutschland werden die Kondensatoren hauptsächlich durch Luft (Ventilatoren) gekühlt. Dies kann lokal das Mikroklima beeinflussen.

Den Autoren liegen gegenwärtig keine detaillierten Untersuchungen zum thermischen Einfluss des Betriebes von Geothermieanlagen vor.

7.5.5.2 Thermischer Einfluss Boden, oberflächliche Gewässer und oberflächennahes Grundwasser

7.5.5.2.1 Projektphasen

Erkundung

Keine thermische Beeinflussung des Bodens und oberflächlicher Gewässer in der Erkundungsphase.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Das Einleiten unbedenklicher bzw. aufbereiteter Abwässer in Vorfluter kann zu einer Temperaturveränderung dieser führen. In der Regel handelt es sich um Abwässer vom Bohrplatz, durch die kein signifikanter Temperatureintrag erfolgt.

Im Süddeutschen Molassebecken ist es möglich, die gering mineralisierten Thermalwässer aus Zirkulationstests in Vorfluter einzuleiten. Ein möglicher thermischer Eintrag ist nur temporär und vernachlässigbar gering im Gegensatz zum Wärmeeintrag von z. B. konventionellen Kraftwerken.

Betrieb

Während des Anlagenbetriebes erwärmt das in den Bohrungen zirkulierende Thermalwasser die Bohrungsmaterialien. Deshalb kann es zur Bodenerwärmung im Nahfeld der Förder- und Reinjektionsbohrung kommen. Der Wärmeaustausch ist ein komplexer Prozess und von einer Vielzahl von Parametern abhängig /ERB 99/:

- Struktur und thermophysikalische Eigenschaften des umgebenden Gesteines
- Radiale Bohrungskomplettierung, verwendete Materialien und deren thermophysikalische Eigenschaften
- Fluidsättigung des umgebenden Bodens und Gesteines

- Strömungsgeschwindigkeit im Grundwasserleiter
- Einwirkzeit
- Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des Fluids im Bohrloch

Zur Wärmeübertragung ist besonders die Bohrungskomplettierung entscheidend. Wenn ein Förderstrang im Casing eingebaut ist, muss die Wärme zunächst an die Schutzflüssigkeit abgegeben werden. Dann ist entscheidend, ob die Zwischenrohrtour bis zu Tage geführt wurde oder als Liner in der Ankerrohrtour eingehängt wurde. Wenn die Zwischenrohrtour bis zu Tage eingebaut ist, muss diese nicht immer komplett zementiert werden. Dadurch würde ein Luftspalt entstehen, der schlecht wärmeleitend ist. Entsprechend komplex gestaltet sich die Berechnung des Wärmeaustauschprozesses. /ERB 99/ führte Modellierungen zur Wärmeausbreitung um die Förderbohrung der Geothermieanlage in Neustadt-Glewe durch. Bei einer Kopftemperatur von 98 °C wird im Maximalfall eine Wärmeleistung zu Betriebsbeginn von 230 kW und im 30.ten Betriebsjahr von 180 kW an die unmittelbare Bohrungsumgebung abgegeben. Nach 30 Betriebsjahren würde dies zu einer thermischen Beeinflussung eines Bereiches von 60 m um die Bohrung führen /ERB 99/.

Rückbau

Keine thermische Beeinflussung des Bodens in der Rückbauphase.

7.5.5.2.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Durch die Erwärmung des bohrlochnahen Bereichs kann dort das biologische Gleichgewicht gestört werden. Dies führt zu einer verstärkten mikrobiellen Aktivität bzw. Wachstum /PGG 11/. /SCP 06/ untersuchten den Einfluss der Temperatur auf das Absterben bzw. das Wachstum von Mikroorganismen im Bremer Untergrund. Dazu wurde Probenmaterial aus zehn verschiedenen Tiefen bis zu 38 m bei -20, 8, 20 und 30 °C über 4 Monate inkubiert. Nach 0, 2 und 4 Monaten Inkubationsdauer wurden für jeden Versuchsansatz der pH-Wert, die Gesamtzellzahl und die Lebendzellzahl bestimmt. Ein signifikanter Einfluss der Temperatur oberhalb des Gefrierpunkts auf die Zahl der Mikroorganismen ließ sich nicht nachweisen. Sowohl die Lebendzellzahlen unterhalb von 10 m Tiefe als auch die Gesamtzellzahlen veränderten sich nur ausnahmsweise um mehr als eine Zehnerpotenz bei 8, 20 bzw. 30 °C Inkubationstemperatur. Ein star-

ker Rückgang der Lebendzellzahlen war lediglich bei -20 °C zu verzeichnen. Ein Rückgang der Lebendzellzahlen oberhalb von 10 m Tiefe konnte auf einen Abfall des pH-Wertes aufgrund der Versuchsanordnung zurückgeführt werden /SCP 06/. Es bleibt die Frage offen, wie sich das System bei Temperaturen oberhalb von 30 °C verhält.

Zudem wird durch Temperaturveränderungen im Grundwasser das geochemische Gleichgewicht von Mineralen beeinflusst. /ARN 06/ führte Modellierungen zum Lösungsgleichgewicht von Mineralen in Bezug auf eine Temperaturänderung von bis zu 50 °C durch. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass für quartäre Sedimente Nordwestdeutschlands Temperaturveränderungen im Wesentlichen das Löslichkeitsverhalten von Silikaten (amorphe Kieselsäure, Illit, Kalifeldspat, Albit) beeinflussen. In bestimmten Gesteinsschichten konnte bei einer Temperaturabsenkung auch eine Veränderung in dem Löslichkeitsverhalten von Alunit ermittelt werden. Ebenso wurde festgestellt, dass bei einem Temperaturanstieg im Grundwasser mit Calcit ausfällungen zu rechnen ist. Eine Abschätzung der Porenraumveränderung, verursacht durch die Mineralfällungen, hat ergeben, dass es zu keiner signifikanten Verringerung des Porenraums kommt. Im Gegenteil würde sich der Porenraum in den meisten Tiefen bei einer Temperaturveränderung geringfügig vergrößern, verursacht durch das Lösen von Feldspäten.

Die Ergebnisse der Arbeit beziehen sich auf quartäre Sedimente. Für Schichten des Tertiärs sind keine Aussagen möglich, da sich diese Sedimente in ihrer Zusammensetzung von den quartären Sedimenten wesentlich unterscheiden. Nach /ARN 06/ sind beim Betrieb oberflächennaher geothermischer Anlagen keine nachteiligen Veränderungen der hydraulischen Eigenschaften der hier untersuchten quartären Grundwasserleiter zu erwarten.

7.5.5.2.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Der Wärmeeintrag in den bohrlochnahen Bereich ist technisch bedingt und nicht vermeidbar. Durch die Verwendung von Dämmstoffen im Bereich des Standrohres kann der Wärmeeintrag in den umgebenden Boden vermindert werden.

Eine vorherige Abkühlung von Prozessfluiden in Zwischenspeicherbecken reduziert den Wärmeeintrag in Gewässer, falls diese in Vorfluter eingeleitet werden.

Eine Vermeidung des Wärmeeintrages in oberflächliche Gewässer durch ein Durchlaufsystem kann nur durch eine Trockenkühlung des Sekundärkreismittels erfolgen.

Von der EU-Fischgewässerrichtlinie (RL 2006/44/EG) werden Grenzen zur Aufwärmspanne von oberflächlichen Gewässern gesetzt. Nach EU-Fischgewässerrichtlinie darf die Aufwärmspanne von Salmonidengewässern⁷²⁶ 1,5 °C und von Cyprinidengewässern 3 °C betragen. Die Einstufung eines Gewässers nach Salmoniden- oder Cyprinidengewässern erfolgt danach, wie empfindlich die dort lebenden Fischarten auf Verunreinigungen reagieren. Salmonidengewässer sind in einer solchen Skala die am geringsten belasteten Gewässer, da die genannten Fische gegenüber Verunreinigungen am empfindlichsten sind. Gefolgt werden sie in der Skala von Cyprinidengewässern.

7.5.5.2.4 Bewertung

/ERB 99/ gibt als Fazit der Modellierungen der thermischen Beeinflussung des bohrlochnahen Bereiches:

„Demnach ist selbst unter Zugrundelegung hypothetischer Lastfälle und bei Vernachlässigung des Regenerierungsvermögens im Anlagenstillstand eine weitreichende thermische Beeinflussung des Gebirges bzw. Bodens durch die Bohrungen auszuschließen.“

Der Wärmeeintrag durch sonstige Maßnahmen ist nur temporär und deshalb als vernachlässigbar einzustufen.

7.5.5.3 Thermischer Einfluss Untergrund (Tiefenwasser und Gestein)

Nach dem Durchlaufen des Kraftwerkprozesses wird das abgekühlte Thermalwasser wieder in die Lagerstätte reinjiziert. Diese Injektion führt im Verlauf des Anlagenbetriebs zu einer kontinuierlichen Abnahme der initialen Temperatur im Reservoir und somit zu einem zeitlich variierenden Temperaturgradienten zwischen dem Reservoir

⁷²⁶ Gewässer, in denen das Leben von Fischen solcher Arten wie Lachse (*Salmo salar*), Forellen (*Salmo trutta*) und Äschen (*Thymallus thymallus*) erhalten wird oder erhalten werden könnte.

und dem umgebenden Gestein. Dieser instationäre Prozess initiiert einen konduktiven und konvektiven Wärmefluss aus umgebenden Gesteinsschichten in das Reservoir /ERB 99/. Dies kann zu einer Abkühlung und damit zu einer thermischen Kontraktion des Deckgebirges führen.

7.5.5.3.1 Projektphasen

Erkundung

In der Erkundungsphase findet keine thermische Veränderung des Untergrundes statt.

Erschließung der Lagerstätte und Anlagenbau

Durch den Eintrag der Bohrspülung in den Untergrund kann es zu einer lokalen Temperaturenniedrigung im bohrlochnahen Bereich kommen.

Zudem findet durch das exotherme Abbinden des Ringraumzementes ein Wärmeeintrag statt. Dieser Prozess führt nur zu einer minimalen, temporären Erwärmung des bohrlochnahen Bereiches.

Durch den Eintrag von Stimulationsfluiden kann sich das Speichergestein abkühlen. Durch die plötzliche Temperaturenniedrigung kann es zu Spannungsrissen im Gestein kommen. Dieser Prozess ist gewollt, da er zu einer Erhöhung der Permeabilität im Speichergestein führt. Die Veränderung der Temperatur in der Lagerstätte durch das Stimulationsfluid ist nur temporär. Nach Beendigung der Stimulationsmaßnahmen stellt sich die ursprüngliche Temperatur durch den Zufluss von Thermalwasser wieder ein.

Betrieb

Ein sog. „Worst-Case-Szenario“ zur thermischen Abkühlung des umgebenden Gesteins für das Heizkraftwerk Neustadt-Glewe ergab, dass nach kalkulierten 30 Betriebsjahren das Gestein in einem Umkreis von max. 160 m um die Injektionsbohrung thermisch beeinflusst wird, wobei Temperaturabnahmen von mehr als 10 K lediglich in einem Radius von weniger als 70 m auftreten können /ERB 99/.

Im Falle von EGS-Systemen ist eine entsprechende Abschätzung nur schwer möglich, da hier das Vorhandensein und die Anbindung an ein natürliches Zirkulationssystem im

Fernbereich maßgeblich sind. /HAI 06/ modellierten z. B. bei einer 50 prozentigen Anbindung an einen Fernbereich (Anschluss an entfernte Aquifere durch Klüfte) eine Abnahme der Thermalwassertemperatur nach 20 Jahren im Betrieb von 10 K, während eine fehlende Anbindung nach derselben Dauer einer Temperaturabsenkung von ca. 45 K zur Folge hätte. Untertägig geschlossene Systeme führen zu einer geringeren und lokal begrenzten Auskühlung.

Das Beispiel einer 100 m tiefen Erdwärmesonde zeigt, dass deren Betrieb nach 30 Jahren im Umkreis von 1 m eine Auskühlung des Untergrundes von weniger als 2 K zur Folge hat. Eine ca. 95 % Wiederherstellung des Ursprungszustands kann nach derselben Dauer wie der Nutzung angesetzt werden /FRK 07/.

Rückbau

Durch den Rückbau sind keine signifikanten Temperaturveränderungen im Untergrund zu erwarten.

7.5.5.3.2 Einwirkungen auf Schutzgüter

Im Wesentlichen führt die Wärmeentnahme aus der geothermischen Lagerstätte nicht zu einer direkten Verletzung eines Schutzgutes, vielmehr führt eine zu schnelle Abkühlung der Lagerstätte (vor der geplanten Betriebslaufzeit) zu wirtschaftlichen Problemen.

Die Temperaturabnahme im Untergrund kann zudem indirekt zu einer Schutzgutverletzung führen (Subsidenz der Geländeoberfläche), dies wird in Kap. 7.5.4.1 diskutiert.

7.5.5.3.3 Gegenmaßnahmen zur Vermeidung oder Verminderung

Die Wärmeentnahme ist Teil des technischen Verfahrens und ist nicht vermeidbar. Durch die Optimierung des Anlagenbetriebes bzw. der Fördermenge des Thermalwassers kann eine zu schnelle Abkühlung der Lagerstätte (Temperaturdurchbruch) verhindert werden.

7.5.5.3.4 Bewertung

Die von /ERB 99/ durchgeführten Modellierungen (siehe Beschreibung „Betrieb“) wurden mit sehr konservativen Annahmen durchgeführt. Im realen Anlagenbetrieb treten diese extremen Bedingungen nicht auf, deshalb können die Werte als obere Grenzwerte angenommen werden. Zusammenfassend hebt /ERB 99/ hervor, dass die geohydrothermale Energiegewinnung nur lokale Ressourcen nutzt und somit eine tiefgreifende thermische Beeinflussung der Liegend- und Hangendschichten ausgeschlossen werden kann. Aufgrund dieser Tatsache wird die Annahme eines geschlossenen Kreislaufes nochmal gefestigt.

Die Auswirkungen einer Wärmeentnahme über längere Zeiträume sind noch unklar. Es werden jedoch keine negativen Auswirkungen erwartet. Durch die geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mineralphasen im Gestein reduziert sich der Porenraum bei Abkühlung nur unwesentlich. Die Abkühlung der Lagerstätte führt im Wesentlichen nur zu wirtschaftlichen Problemen.

8 Risikoanalyse

Die Ermittlung und Analyse der Risiken eines Betriebes oder von durch den Betrieb auftretenden Störfällen müssen neben einer detaillierten Beschreibung von Szenarien für das Einnehmen eines Zustandes (wie eines Störfalles) auch die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens neben einer Berücksichtigung der erforderlichen Randbedingungen beinhalten. Entsprechende Anforderungen an eine derartige Risikoabschätzung finden sich auch im Regelwerk (Störfallverordnung /BIM 00/).

Um eine Vergleichbarkeit entsprechender Bewertungen zu ermöglichen, müssen Verfahren zur systematischen Ermittlung der Gefahren festgelegt werden und Konsens bezüglich der Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten bestehen.

Eine grundsätzliche Unterscheidung ist zwischen deterministischen und probabilistischen Herangehensweisen zu treffen. Während erstere sich mehr auf die Auswirkungen eines „Störfalls“ oder Betriebszustandes konzentrieren und typischerweise durch konservative Annahmen („Worst-Case-Scenarios“) Unsicherheiten abdecken, berücksichtigen probabilistische Verfahren vielmehr die Eintrittswahrscheinlichkeiten, Unsicherheiten (z. B. auch der Eingangsparameter) und somit das Risiko des Eintretens von Zuständen und deren Auswirkungen (Abb. 8.1) . Während z. B. ein deterministisches Verfahren der Risikoanalyse den Ausfall einer Komponente schlicht annimmt, verwendet das probabilistische Verfahren das beobachtete Ausfallverhalten der Komponente, abgeleitete Zuverlässigkeitskenngrößen, Betriebserfahrungen, angenommene Eintrittshäufigkeiten für Störungen aber auch menschliches Fehlverhalten und gemeinsam verursachte Ausfälle als Grundlage der Analyse.

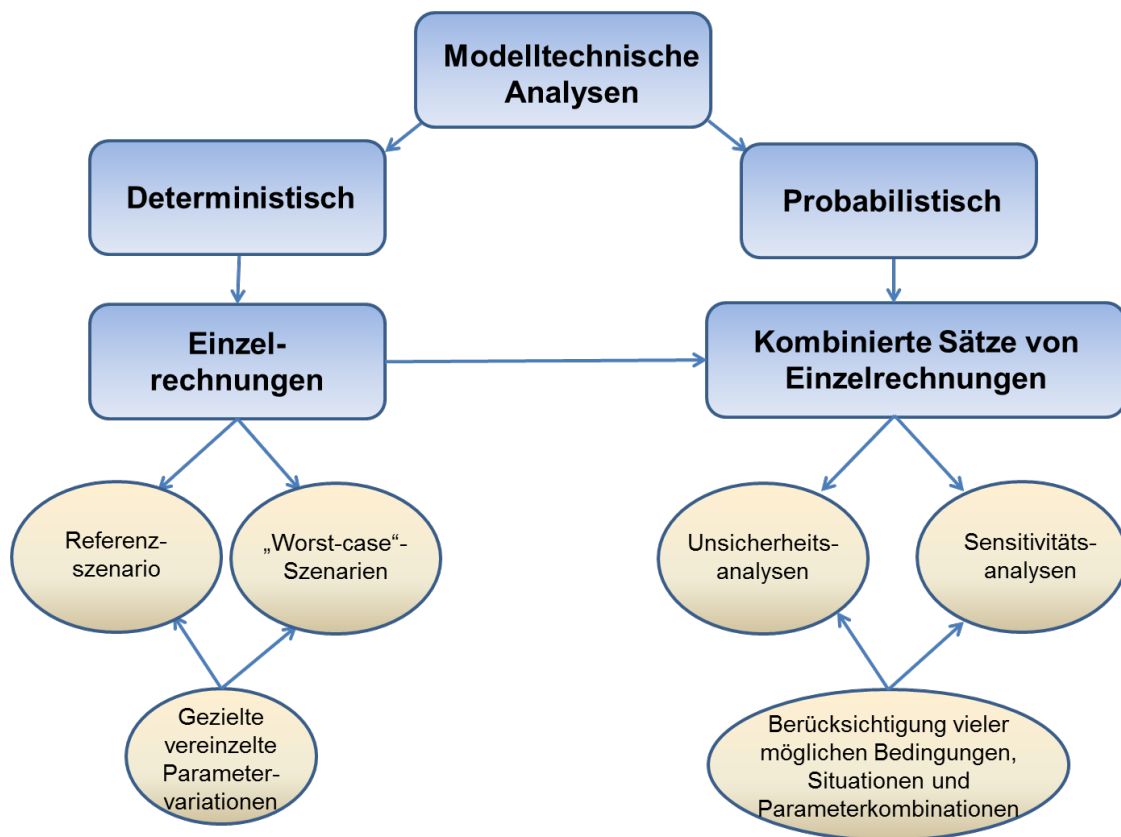


Abb. 8.1: Vergleich deterministischer und probabilistischer Vorgehensweisen

Grundlegendes Merkmal einer probabilistischen Analyse ist, dass die Ergebnisse mit teils großen Unsicherheiten behaftet sind. Bei der Bewertung des Ergebnisses einer probabilistischen Analyse sind daher auch vorab Vereinbarungen zu den tolerierbaren Unsicherheiten zu treffen. Gegenüber den deterministisch erzeugten Punktwerten einer Sicherheitsanalyse geben probabilistisch erzeugte Eintrittswahrscheinlichkeiten mit Unsicherheitsbereichen auch Hinweise auf notwendigen weiteren Untersuchungsbedarf um eben diese Unsicherheiten zu verringern.

Sowohl die Genehmigung als auch die periodische Sicherheitsüberprüfung, aber auch allgemeine Sicherheitskriterien technischer Anlagen haben den Stand der Technik (für kerntechnische Anlagen den Stand von Wissenschaft und Technik) zu berücksichtigen. In Ergänzung deterministischer Methoden ist die Zuverlässigkeit sicherheitstechnisch wichtiger Systeme und Anlagenteile mit Hilfe probabilistischer Methoden zu bestimmen. Zur Überprüfung von Sicherheitsanforderungen sowie der Auswirkung von sicherheitsrelevanten wesentlichen Änderungen sind probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA) durchzuführen, die es z. B. ermöglichen sollen, Schwachstellen zu

identifizieren und Entscheidungen zur Priorisierung von Sicherheitsverbesserungen zu ermöglichen. PSA können entscheidend dazu beitragen, das Potenzial für einen Störfall durch Herabsetzung von z. B. Brand- oder Gefahrstofflasten zu verringern, Hinweise zur Verhinderung an relevanten Ereignisstellen zu geben (Maßnahmen zur Verbesserung z. B. von Brandschutzmaßnahmen) sowie Hinweise für eine optimierte Detektion von Auswirkungen von Störfällen an geeigneten Orten aber auch besonders günstige Handhabungsvorgänge zu geben.

In Deutschland wird eine mehrstufige PSA im kerntechnischen Regelwerk vorgesehen: Ausgehend von einem auslösenden Ereignis werden Ereignisabläufe dahingehend untersucht, ob ein Schaden des Reaktorkerns zu besorgen ist. Die PSA der Stufe 1 endet mit Aussagen zur Wahrscheinlichkeit eines Kernschadens. PSA Stufe 2 beurteilt die unfallbedingte Freisetzung im Fall eines Kernschadens. Die PSA der Stufe 3 umfasst zusätzlich die Konsequenzen des Unfalls für die Umgebung der Anlage.

Eine Übersicht über die Bandbreite probabilistischer Analysen im kerntechnischen Einsatz gibt nachstehende Tab. 8.1:

Tab. 8.1 Anwendungsfelder der PSA zur Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen

| Anwendungsfelder | Detailbetrachtungen |
|---------------------------------------|--|
| Eintrittswahrscheinlichkeiten | <ul style="list-style-type: none"> Anlageninterne Komponentenausfälle Anlagenexterne schädigende Einwirkungen |
| Menschliche Handlungen | <ul style="list-style-type: none"> Wahrscheinlichkeit erfolgreicher Notfallmaßnahmen bei gestörten Anlagenzuständen |
| Varianten im Ereignisablauf | <ul style="list-style-type: none"> Abläufe bei unterschiedlicher Kombination von Ausfällen Einfluss ungenau bekannter oder zufälliger Phänomene |
| Ausmaß der probabilistischen Analysen | <ul style="list-style-type: none"> Dreistufig (PSA I-III) bis zur Wahrscheinlichkeit für bestimmte radiologische Folgen bei Personen außerhalb der Anlage |
| Auswertung | <ul style="list-style-type: none"> Häufigkeiten bestimmter gestörter Anlagenzustände Häufigkeit bestimmter Auswirkungen auf die Umgebung Identifizierung kritischer Komponenten Quantifizierung der Sicherheit |

Sowohl deterministische als auch probabilistische Methoden der Risikobewertung weisen Vor-, aber auch Nachteile auf.

Im Falle einer deterministischen Analyse ist bei wesentlichen Änderungen im Betriebsregime (Technische Modifikationen, geänderte Handlungsabläufe) eine Neubewertung erforderlich, da nicht Wertebereiche (Variabilitäten) sondern Punktwerte in Berechnungen des Schadensrisikos oder des Schadensausmaßes eingehen. Die deterministische Annahme von Fallunterscheidungen, Ausfällen oder Schäden führt zu einer ungeordneten und unübersichtlichen Szenarien-Sammlung.

Probabilistische Ansätze sehen vor, Unsicherheiten direkt zu benennen. Da alle Eingangsgrößen, wie physikalische Parameter, Eintrittswahrscheinlichkeiten oder Modelle selbst mit Unsicherheiten behaftet sind, bietet es sich an, die Informationen z. B. aus Untersuchungen zu Ausfall- oder Eintrittswahrscheinlichkeiten bereits zu nutzen.

Probabilistische Ansätze tragen dazu bei, Konservativitäten zu vermeiden und realistische, an den Ablauf von Handlungen angepasste Bewertungen durchzuführen, da feste Annahmen als Eingangsgrößen wie in der Deterministik nicht die Regel sein sollen.

Nur probabilistische Ansätze ermöglichen die Identifizierung von risikorelevanten Schwachstellen. Deterministische Anforderungen allein (z. B. Redundanz von Systemen, mehrere hintereinander gestaffelte Barrieren) ergeben kein Maß für die erreichte Sicherheit. Die probabilistische Analyse ist daher geeignet, über deterministische Betrachtungen hinausgehende Rückschlüsse zu ziehen.

Gleichzeitig muss erwähnt werden, dass die Kommunikation des Ergebnisses sehr anspruchsvoll bleibt, da der Bewertungsmaßstab (Risiko) wenig geläufig ist. Die Einordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten und Unsicherheiten fällt schwer, gleichzeitig ergibt sich aber die Möglichkeit des Vergleiches mit bekannten Risiken.

Vorbehalte gegen probabilistische Ansätze ergeben sich aus der Annahme, dass trotz eines scheinbaren Unwissens (zahlreiche Unsicherheiten) der Anschein von Wissenschaftlichkeit erweckt wird. Selbst bei fehlender Statistik oder mangelnder Kenntnis berücksichtigt die Probabilistik ausdrücklich diese Unsicherheiten und liefert die Ergebnisse stets mit entsprechenden Unsicherheitsbandbreiten.

In der GRS sind folgende probabilistische Methoden aus der Kerntechnik verfügbar und in der Praxis bewährt, die für die anstehenden Untersuchungen grundsätzlich in Frage kommen (siehe auch Tab. 8.2):

- Kleiner Ereignisbaum, verknüpft mit Fehlerbäumen
- Großer Ereignisbaum mit flexiblen Verknüpfungen
- Bayes'sches Netz

Tab. 8.2 Probabilistische Methoden der Kerntechnik

| Probabilistische Methode | Anwendung bei Kernkraftwerken | Mögliche Anwendung bei Geothermie |
|--|---|---|
| Kleiner Ereignisbaum, verknüpft mit Fehlerbäumen | Häufigkeit von Kernschadenszuständen und ihren Ursachen | Häufigkeit, mit der eine Anlage infolge verschiedener Gründe ausfällt |
| Großer Ereignisbaum mit flexiblen Verknüpfungen | Häufigkeit und Ausmaß verschiedener unfallbedingter Radionuklidfreisetzungen in die Umgebung | Häufigkeit und Ausmaß der Freisetzung von Schadstoffen in die Umgebung, oder der Verletzung von Schutzzielen |
| Bayes'sches Netz | System zur schnellen Diagnose des Anlagenzustandes und der Prognose von Radionuklidfreisetzungen in die Umgebung während eines Unfallablaufes | Abbildung des Gesamtsystems: Zusammenhang zwischen Umweltrisiko, Anlagenzuverlässigkeit und geothermischem Reservoir |

Ereignisbäume gehen, wie der Name besagt, von einem Ereignis aus (dies entspricht dem Stamm), und sie verzweigen sich bei jeder möglichen Variante des Ablaufs (dies entspricht den Astgabelungen). Somit ergeben sich sehr viele verschiedene Endzweige, die alle über die unterschiedlichen Äste und Verzweigungen bis zum Stamm zurückgeführt werden können. Man kann sich die Dicke der Zweige als Grad der Wahrscheinlichkeit für den jeweiligen Zweig vorstellen. Die Ergebnisdarstellung ist in der Regel nicht an den vielen Zweigen (=Ablaufvarianten) im Einzelnen interessiert, sondern man fasst die Zweige zusammen. So kann es z. B. von Interesse sein, alle Fruchttragenden Zweige in eine Gruppe einzusortieren. Eine kerntechnische Analogie wäre z. B. das Zusammenfassen aller Ereignisabläufe ohne Schaden am Reaktorsi-

cherheitsbehälter in eine eigene Gruppe und die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit für diese Gruppe.

Die Unterscheidung in „kleine“ und „große“ Ereignisbäume geschieht in der Kerntechnik aus historischen Gründen und hängt u. a. auch mit der Kapazität der verfügbaren Rechenprogramme zusammen. Ein „kleiner“ Ereignisbaum hat typischerweise bis zu 30 Verzweigungen, während „große“ Ereignisbäume um 100 Verzweigungen aufweisen. Wenn an jeder Verzweigung nur zwei Zweige ansetzen, dann ergäben sich theoretisch 2^{30} bzw. 2^{100} Endzweige. Derartige Zahlen können auch mit heutigen Rechenprogrammen noch nicht bewältigt werden. Deshalb sind Vereinfachungen erforderlich, deren Einfluss auf die Genauigkeit der Resultate jeweils zu prüfen ist.

Während die Größe der Ereignisbäume nur eine quantitative Unterscheidung beschreibt, ist die Art der möglichen Verknüpfungen ihrer Verzweigungen eine grundsätzliche, qualitative Unterscheidung. Dies bezieht sich auf die Art und Weise, wie die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Zweige an einer Verzweigung bestimmt und in das Rechenprogramm eingegeben werden.

Im einfachsten Fall wird die Wahrscheinlichkeit für einen Zweig separat vom Ereignisbaum ermittelt. Beispielsweise könnten statistische Auswertungen ergeben, dass die Wahrscheinlichkeit für den Ausfall eines Systems 0,001 beträgt. Dann könnte dieser Wert unmittelbar in eine entsprechende Verzweigung eingegeben werden. Für komplexere reale Anwendungen ist dieser Ansatz jedoch nicht ausreichend.

Diese Methode wird in PSA der Stufe 1 für Kernkraftwerke angewandt. PSA der Stufe 1 analysieren, mit welcher Wahrscheinlichkeit Fehlerkombinationen von technischen Komponenten zum Kernschmelzen führen.

Der kleine Ereignisbaum besteht typischerweise aus bis zu 10 Verzweigungen, z. B.

1. Entsteht ein Leck im Reaktorkühlkreislauf
99% nein, 1% ja
2. Funktioniert die Notkühlung
99,9% ja, 0,1 % nein

3. Dies ergibt 0,001 % für Leck UND fehlende Notkühlung und führt somit zu einer Kernschmelze.

Das üblicherweise genutzte Rechenprogramm heißt RiskSpectrum. Es ist kommerziell verfügbar und auf die Abbildung von Systemen zugeschnitten. In der GRS besteht vielfältige Erfahrung bei der Anwendung von RiskSpectrum.

Nachteilig für die vorliegenden Aufgabenstellungen sind die Beschränkung auf relativ wenige Verzweigungen, die ausschließliche Verwendung von Fehlerbäumen für Wahrscheinlichkeitsberechnungen und Schwierigkeiten bei der Modellierung von unsicheren oder besonders komplexen Abläufen mit mehr als zwei Zweigen pro Verzweigung.

Die Methode des großen Fehlerbaums mit flexiblen Verknüpfungen wird in der PSA Stufe 2 angewendet. PSA der Stufe 2 analysieren den Ereignisablauf nach dem Beginn des Kernschmelzens bis zur Radionuklidfreisetzung in die Umgebung.

Der große Ereignisbaum besteht typischerweise aus bis zu 100 Verzweigungen, z. B.

1. Geschieht eine starke Wasserstoffverbrennung im Sicherheitsbehälter?
99% nein, 1% ja
2. Versagt der Sicherheitsbehälter bei starker Wasserstoffverbrennung?
99,9% nein, 0,1 % ja
3. Dies ergibt 0,001 % für Versagen des Sicherheitsbehälters infolge Wasserstoffverbrennung.

Das Problem besteht darin, die Wahrscheinlichkeit für die Phänomene (z. B. starke Verbrennung) zu bestimmen. Diese pauschale Frage wird im großen Ereignisbaum in mehrere Teilfragen (z. B. Entstehung von Wasserstoff, Verteilung im Sicherheitsbehälter, Zündquellen) zerlegt. Die Quantifizierung der Einzelfragen geschieht in der Regel anhand von experimentellen Ergebnissen oder rechnerischen Analysen.

Das üblicherweise genutzte Rechenprogramm heißt EVNTRE. Es ist allgemein verfügbar. Es kann insbesondere mit beliebigen nutzerdefinierten Modulen verbunden werden, die einzelne Verzweigungswahrscheinlichkeiten berechnen können. Damit können z. B. komplexe Vorgänge, die voneinander abhängen, konsistent bearbeitet werden.

Diese Methode ist höchst flexibel, sie hat sich bei verschiedenartigen Fragestellungen bewährt. Ihr einziger Nachteil ist die nicht mehr zeitgemäße Benutzeroberfläche.

Das Baysian Belief Network wird als Methode in der Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen angewandt, um im Verlauf eines Unfalles Prognosen über die zu erwartende Radionuklidfreisetzung abzugeben.

Das Netzwerk besteht aus Knoten und Verbindungen. Knoten stellen Zustände dar (z. B. Dichtigkeit des Sicherheitsbehälters). Verbindungen geben die Wahrscheinlichkeit an, mit der sich ein bestimmter Knotenzustand (z. B. Leck im Sicherheitsbehälter) aus anderen Knoten (z. B. Druck, Wasserstoffverbrennung) ergibt.

Solche Netzwerke können nicht nur in kausaler Schlussrichtung „vorwärts“ analysieren (Wahrscheinlichkeit von Folgen bei Vorliegen möglicher Ursachen), sondern können auch diagnostische Schlüsse ziehen und die Wahrscheinlichkeitsverteilungen möglicher Ursachen bei Vorliegen bestimmter Folgen ermitteln. Aus bestehenden Beobachtungen kann also „rückwärts“ auf Ursachen oder auf nicht beobachtbare Gegebenheiten geschlossen werden. Eine typische Anwendung in der Kerntechnik ist die Ermittlung von möglichen Ursachen für eine beobachtete Radionuklidfreisetzung. Bei Erkennen einer hohen Radionuklidfreisetzung kann auf die Wahrscheinlichkeit verschiedener möglicher, aber noch unbekannter Ursachen geschlossen werden (z. B. Fehlbedienung, Filterversagen, Brennstabschäden). Das Problem besteht darin, die Wahrscheinlichkeiten zwischen den Knoten zu bestimmen, ähnlich wie beim großen Ereignisbaum. Für diese Art der Analyse wird bei der GRS das Rechenprogramm NETICA® verwendet. Es ist ebenfalls kommerziell verfügbar (www.norsys.com) und wird in verschiedensten Bereichen von Wissenschaft und Technik angewandt. Nachteile dieser Methode bestehen darin, dass die probabilistischen Beziehungen nur als Zahlenwerte, nicht als Funktionen eingegeben werden können. Ferner ist die Behandlung von Unsicherheiten mittels Monte Carlo Analyse – wie in den anderen vorher genannten Methoden - nicht möglich.

Als erste Wahl ergibt sich nach Bewertung der Eignung die Methode des großen Ereignisbaumes mit flexiblen Verknüpfungen. Die Ereignisbaumanalyse ist nicht nur in der Kerntechnik ein bewährtes und verbreitetes Verfahren. Auf der Website der DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, www.dke.de) ist hierzu ausgeführt: „Die grundlegenden Prinzipien dieser Methodik sind seit der Konzeption dieses Verfahrens in den 1960er-Jahren unverändert geblieben.

Die Ereignisbaumanalyse wurde erstmals 1975 in der Nuklearindustrie in einer Studie der amerikanischen kerntechnischen Genehmigungsbehörde erfolgreich angewendet. Im Laufe der folgenden Jahre gewann die Ereignisbaumanalyse weit verbreitete Akzeptanz als eine ausgereifte Methodik für Zuverlässigkeits- und Risikoanalysen und findet Anwendung in so verschiedenen Industriebranchen wie der Luftfahrtindustrie, Kernkraftanlagen, der Autoindustrie, der chemischen Industrie, der Hochseeproduktion von Öl und Gas sowie der Verteidigungsindustrie und der Verkehrstechnik.“

Diese Bewertung unterstützt die hier anhand der Erfahrungen der GRS getroffene Auswahl der Ereignisbaumanalyse. Im Juni 2011 ist eine neu überarbeitete Norm DIN EN 62502 (VDE 0050-3) "Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit - Ereignisbaumanalyse (ETA)" erschienen. Diese neue Norm definiert die grundlegenden Verfahrensprinzipien und -prozeduren der als Ereignisbaumanalyse (ETA) bezeichneten Zuverlässigkeitsanalyse.

Im Vorhaben GeoSys kam das im Rahmen der US-Studie NUREG-1150 entwickelte Rechenprogramm EVNTRE /GRI 89/ zum Einsatz. EVNTRE ist in der Lage, sehr komplexe Ereignisbäume zu bearbeiten. Leider ist die von EVNTRE erforderte Eingabedatenstruktur sehr benutzerunfreundlich, fehlerträchtig und unflexibel. Deshalb wurde ein Pre-Prozessor entwickelt, der die EVNTRE-Eingabe aus einer einfacheren, benutzerfreundlichen und flexiblen Benutzereingabe erstellt.

8.1 Beispielhafte PSA

Exemplarisch sollte im Vorhaben zunächst die Fragestellung „Verfügbarkeit der Anlage“, gekoppelt mit der „Wahrscheinlichkeit ein Schutzgut zu verletzen“ bearbeitet werden. Es ist unklar, ob und wie die Verfügbarkeit der Anlage mit der Frage der möglichen Schutzgutverletzung zusammenhängt (wenn z. B. ein Anlagenstillstand aus administrativen Gründen vorliegt, hat dies völlig andere Implikationen als ein Anlagenstillstand infolge Schäden / Abnutzung (Reparaturen, potenzielle Gefährdung). Für eine „klassische“ Zuverlässigkeitsanalyse fehlen daher zunächst die Mittel und die Grundlagen. Ein Zusammenhang zwischen Zuständen im Reservoir und Anlagenverfügbarkeit könnte möglicherweise hergestellt werden (z. B. häufiger Filterwechsel bei hoher Schadstofffracht, Stillstand infolge Durchsatzabfalls im Reservoir). Insgesamt wurde im Rahmen des Vorhabens keine Möglichkeit gesehen, die Anlagenverfügbarkeit in der probabilistischen Analyse quantitativ zu bewerten.

Alternativ wurde exemplarisch die Wahrscheinlichkeit der Schutzgutverletzung „Menschliche Gesundheit“ durch den beeinflussenden Wirkfaktor „Akkumulation von natürlichen radioaktiven Stoffen“ eingehend im Rahmen einer PSA untersucht. Der auslösende Prozess ist die Förderung hochmineralisierter Solen mit anschließender energetischer Nutzung, die Änderungen von p/T-Bedingungen hervorrufen.

Zusammenhänge zwischen Zuständen im Reservoir und radioaktiven Ablagerungen in der Anlage können im Rahmen dieses Vorhabens nicht ermittelt werden. Der Ausgangspunkt der probabilistischen Analyse ist daher nicht das Reservoir, sondern die beobachteten und dokumentierten Kontaminationen und Strahlungslevel an / in den oberirdischen Anlagenteilen.

Das Ziel einer Ereignisbaumanalyse besteht im Allgemeinen darin, die Wahrscheinlichkeit für bestimmte unerwünschte Ereignisse zu ermitteln und festzustellen, welche Phänomene besonders zu den unerwünschten Ereignissen beitragen. Für die Systemanalyse GeoSys ergeben sich folgende zentrale Fragestellungen:

- Mit welcher resultierenden Unsicherheit kann der Bearbeiter sagen, dass die Strahlenbelastung unterhalb (oberhalb) einer Klassengrenze liegt?
- Welche unsicheren Parameter tragen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtdosis infolge aller Arbeiten besonders bei?
- Können aus Untersuchungsergebnissen Maßnahmen zur Optimierung des Strahlenschutzes abgeleitet werden?

Der entscheidende Grund zur Nutzung eines Ereignisbaumes (anstatt z. B. einer herkömmlichen Berechnung oder Schätzung) besteht darin, dass sehr erhebliche Unsicherheiten bei der Analyse dieses Sachverhaltes bestehen. Unsicherheiten sind die Domäne probabilistischer Methoden, zu denen die Ereignisbaumanalyse gehört. Dabei werden die unsicheren Elemente in verschiedenster Form (z. B. Unsicherheit von Verzweigungswahrscheinlichkeiten, Unsicherheit physikalischer Parameter, Unsicherheit über anzuwendende Modelle) in die Analyse eingegeben. Wo erforderlich, können Sub-Programmgruppen zur Berechnung von weiter zu berücksichtigenden Teilergebnissen erstellt werden. Durch Anbindung an Unterprogramme wurden verschiedene Möglichkeiten zur Auswertung der von EVNTRE erzeugten Daten geschaffen. Die GRS-Eigenentwicklung SUSA (Software for Uncertainty and Sensitivity Analysis) wurde zur Analyse der Sensitivitäten (einflussnehmende Merkmale) verwendet. Bestehende

Kenntnisstandunsicherheiten über Eingabedaten für die Ereignisbaumanalyse konnten mittels Monte-Carlo-Simulation behandelt werden

Bewertung einer Expositionsabschätzung

Für die beschriebene Fragestellung sind neben der im Kapitel 1 von Teil 3 der StrlSchV beschriebenen Grundpflichten bezüglich Dosisbegrenzung (§ 93) und Dosisreduzierung (§ 94) das Kapitel 2 „Anforderungen bei terrestrischer Strahlung an Arbeitsplätzen“ (§§ 95 und 96) in Verbindung mit Anlage XI und Kapitel 3 „Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen“ (§§ 97 bis 102) in Verbindung mit Anlage XII hervorzuheben. § 95 der StrlSchV enthält Regelungen zu natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen an Arbeitsplätzen, wobei die entsprechenden Arbeitsplätze in Anlage XI („Arbeitsfelder, bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können“) aufgelistet sind. Arbeitsplätze, an denen eine erheblich erhöhte Exposition auftreten kann, bedeutet nach § 95 Abs. 2, dass die effektive Dosis 6 Millisievert im Kalenderjahr überschreiten kann. Nach § 95 Abs. 1 hat deshalb jeder, der in seiner Betriebsstätte eine Arbeit ausübt oder ausüben lässt, die einem der in Anlage XI genannten Arbeitsfeldern zuzuordnen ist eine auf den Arbeitsplatz bezogene Abschätzung der Radon-222-Exposition (Anlage XI, Teil A) oder der Körperdosis (Anlage XI Teil B) durchzuführen. Nach § 95 Abs. 3 dürfen anzeigebedürftige Arbeiten nur von Personen mit gültigem, von der zuständigen Behörde registriertem Strahlenpass ausgeführt werden. Für diese Personen, die anzeigebedürftige Arbeiten ausführen, beträgt nach § 95 Abs. 4 der Grenzwert der effektiven Dosis 20 Millisievert im Kalenderjahr. Diese Personen entsprechen somit hinsichtlich der maximal zulässigen Exposition beruflich strahlenexponierten Personen der Kategorie A gem. § 54 Abs. 1 und unterliegen denselben Bestimmungen des Strahlenschutzes und der medizinischen Kontrolle. Führt die Abschätzung der effektiven Dosis an einem in Anlage XI genannten Arbeitsfeld zu einer Exposition von weniger als 6 Millisievert im Kalenderjahr, kann nach § 95 Abs. 12 die Pflicht zur Dosisreduzierung gemäß § 94 auch dadurch erfüllt werden, dass Strahlenschutzmaßnahmen auf der Grundlage von Vorschriften des allgemeinen Arbeitsschutzes Anwendung finden.

Zum Schutz der Bevölkerung bei natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen werden in § 97 der StrlSchV solche Arbeiten geregelt, bei denen überwachungsbedürftige Rückstände mit erhöhter natürlicher Radioaktivität anfallen, durch deren Beseitigung oder Verwertung der Richtwert der effektiven Dosis von Personen der Bevölkerung von

1 Millisievert im Kalenderjahr überschritten werden kann. Dieser Dosisrichtwert gilt auch für Personen die berufsmäßig mit diesen Rückständen umgehen, aber nicht als beruflich strahlenexponierte Personen gelten, wie z. B. Deponiearbeiter. Nach § 97 Abs. 2 gelten als überwachungsbedürftig die in Anlage XII Teil A der StrlSchV aufgelisteten Rückstände. Diese nennt nicht explizit Rückstände der geothermalen Energiegewinnung, zumindest aber in ihrer Genese vergleichbare Rückstände wie die der Erdöl- / Erdgasgewinnung.

Für die Expositionsrechnung im Zusammenhang mit Dosisabschätzung am Arbeitsplatz oder der Entlassung von NORM-Rückständen der Tiefengeothermie aus der Überwachung gibt es gegenwärtig keine autorisierte Berechnungsgrundlage, diese befinden sich in Vorbereitung. Die gebräuchlichen Berechnungsmethoden orientieren sich gegenwärtig primär an der autorisierten Berechnungsgrundlage Bergbau (BGIB) /SSK 10/, die jedoch für Arbeiten an bergbaulichen Hinterlassenschaften entwickelt wurde und nicht ohne weiteres auf NORM-Rückstände übertragbar ist. Die Berechnungsgrundlagen Bergbau (BGIB) sind nur zum Teil für die NORM anwendbar, da sich die Szenarien der Beseitigung (Behandlung, Lagerung, Ablagerung) je nach Option beträchtlich unterscheiden. Die BGIB schließt zudem untertägige Anlagen und Einrichtungen ebenso wie die stoffliche Nutzung und Folgenutzung kontaminierter Materialien aus. Es liegt somit im Ermessen der zuständigen Strahlenschutzbehörde, ob die vom Antragsteller vorgelegte Expositionsrechnung anerkannt wird oder nicht.

Obgleich Teil 2 (Schutz von Mensch und Umwelt vor radioaktiven Stoffen oder ionisierende Strahlungen aus der zielgerichteten Nutzung bei Tätigkeiten) betreffend, können Hinweis aus der „Richtlinie für die physikalische Strahlenschutzkontrolle zur Ermittlung der Körperdosis, Teil 1 und 2“ (RiPhyKo I+II) entnommen werden, die geeignet sind, für einige Szenarien und Expositionspfade relevante Eingangsparameter (wie Inkorporationsraten) zu übernehmen.

Grundsätzlich gilt, das aufgrund abweichender Geometrien, abweichender Rückstandsparameter, abweichender bzw. eingeschränkter Expositionspfade und Expositionsszenarien viel Eigeninterpretation der Berechnungsgrundlagen möglich ist aber gleichzeitig auch umfassende Erfahrung bei der Bewertung der Arbeitsplatzsituation erforderlich ist.

Die Bewertung und rechtliche Einordnung der Expositionsabschätzung bzw. ihres Resultates erfolgt durch die zuständige Behörde auf der Grundlage der genannten Dosis-

grenzwerte (1 mSv / 6 mSv / 20 mSv). Erfolgt die Dosisabschätzungen für Anlagen der Tiefengeothermie deterministisch, d. h. für einzelne Pfade verschiedenster Szenarien, werden Dosen abgeschätzt und zu einer Gesamtdosis addiert. Die Annahmen werden konservativ gehalten und loten damit die oberen Grenzen eines Worst-Case Szenarios aus. Die probabilistische Dosisabschätzung liefert im Ergebnis die Strahlenbelastung samt Unsicherheitsbandbreite, sowie Informationen über die unsicheren Eingabedaten mit dem größten Einfluss auf die Ergebnisse. Diese Art von Ergebnissen geht qualitativ über die üblichen Dosisabschätzungen hinaus und vermittelt u. a. auch den Vertrauensgrad, mit dem z. B. bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden. Eine behördliche Akzeptanz dieser Vorgehensweise und Berücksichtigung auch der Bandbreite einer möglichen Exposition erscheint sinnvoll und kann dazu beitragen, die Anordnung nicht erforderlicher aber kostenintensiver Strahlenschutzmaßnahmen zu vermeiden.

Methodik einer Expositionsabschätzung

Die Expositionsermittlung kann in deterministischer Form für eine konkrete oder eine fiktive Person erfolgen oder aber, wie im beschriebenen Fall der probabilistischen Analyse als generische Betrachtung für eine Referenzperson:

Bezüglich der Referenzpersonen gelten nachfolgende Vereinbarungen:

a) Referenzpersonen sind Einzelpersonen der Bevölkerung und Beschäftigte, für die in den Anlagen oder im Zusammenhang mit einer Verwertung oder Beseitigung von Rückständen oder im Zusammenhang mit einer unfallbedingten Freisetzung von NORM spezifische Berechnungsparameter (Dosiskoeffizienten, Dosiskonversionskoeffizienten, Atemraten, Expositionsorte, Expositionszeiten sowie Verzehr- und Aufnahme-raten) festgelegt sind.

b) Einzelpersonen der Bevölkerung sind Mitglieder der allgemeinen Bevölkerung aller Altersgruppen, die nicht strahlenexponiert im Sinne des § 95 StrSchV sind. Personen, die berufliche Arbeiten im Zusammenhang mit der Errichtung, dem Betrieb, der Wartung, der Instandsetzung oder der Stilllegung von Anlagen der geothermalen Energienutzung durchführen, **ohne dass diese Tätigkeiten oder Arbeiten der Überwachung (Jahresdosen < 6 mSv/a) unterliegen**, sind der Referenzperson „Erwachsener“ („> 17 a“) zuzuordnen. Für diese Arbeiten wird unterstellt, dass sie maximal 2.000 Stunden pro Jahr ausfüllen.

c) „Beschäftigte“ sind Personen, die berufsbedingt in einer Anlage der geothermalen Energienutzung beschäftigt sind. Für die Berechnung der Strahlenexposition der Referenzperson „Beschäftigte“ sind die aufgrund der beruflichen Arbeit zu berücksichtigenden Expositionsszenarien, Expositionspfade, Radionuklide und Berechnungsparameter nach den Gegebenheiten des konkreten Einzelfalls festzulegen. Für diese beruflichen Tätigkeiten oder Arbeiten wird unterstellt, dass sie insgesamt maximal 2000 Stunden pro Jahr ausfüllen. Personen, die berufliche Arbeiten im Zusammenhang mit der Errichtung, dem Betrieb, der Wartung, der Instandsetzung oder der Stilllegung von Anlagen der geothermalen Energienutzung durchführen, sind der Gruppe „Erwachsener“ (> 17 a) zuzuordnen. Für die „Beschäftigten“ ist im Rahmen der Expositionsabschätzung für Arbeiten mit NORM zu **prüfen, ob die Abschätzung nach § 95 Abs. 1 ergeben hat, dass die effektive Dosis im Kalenderjahr 6 Millisievert überschreiten kann** und die „Beschäftigten“ somit als strahlenexponierte Personen geführt werden müssen.

Die Strahlenexposition, die ein „Beschäftigter“ außerhalb seiner beruflichen Tätigkeit oder Arbeit erfährt, wird bei der Berechnung der Strahlenexposition nicht berücksichtigt. Für die Referenzperson „Beschäftigter“ ist bei der Ermittlung der effektiven Dosis aus Messwerten der Anteil der natürlichen Umweltradioaktivität nicht abzuziehen.

Das Grundprinzip der deterministischen Dosisabschätzung beruht auf der Übernahme von Annahmen und Messwerten in eine Berechnungsgrundlage und Berechnung von Teilexpositionen / Dosen für verschiedenste relevante Szenarien und Expositionspfade (Abb. 8.2)

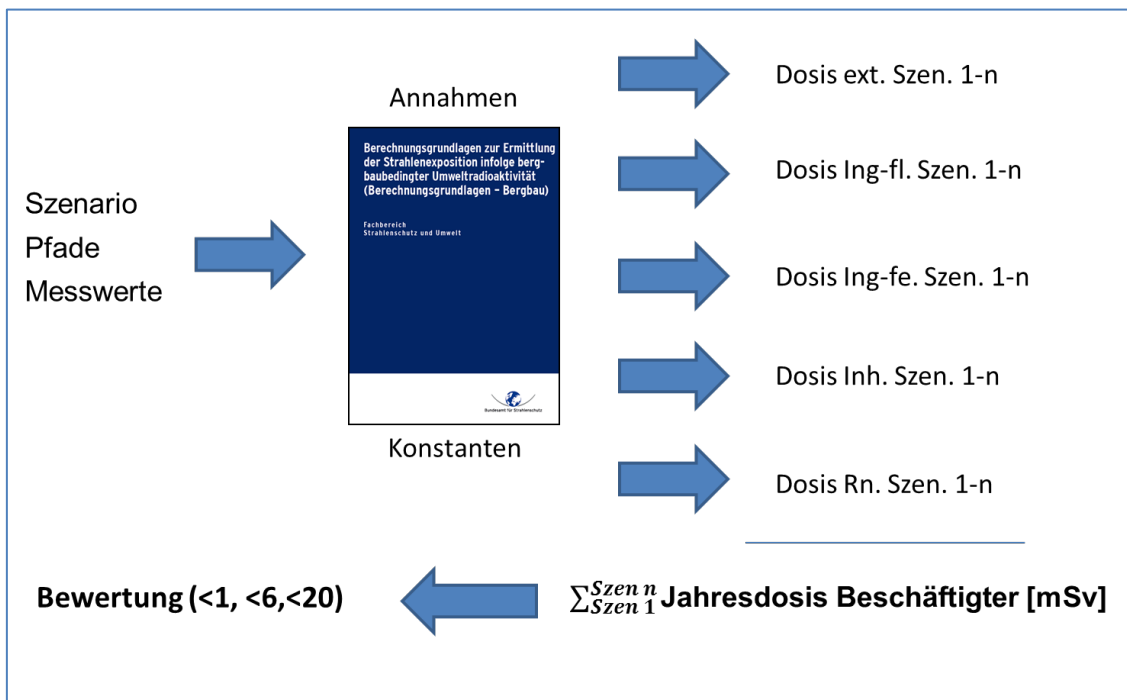


Abb. 8.2 Grundprinzip der Expositionsabschätzung

Im Einzelnen werden für die Abschätzung von Teilexpositionen sowohl Messwerte als auch biologische Parameter wie Atemrate, zeitliche Annahmen wie Aufenthaltszeiten und Konversionsfaktoren verwendet.

Entscheidend ist zunächst die Benennung und detaillierte Beschreibung von Expositionsszenarien. Diese beinhaltet allgemeine Modellparameter wie Aufenthaltszeiten, Zeitdauer von Einzelvorgängen oder die Frequenz des Auftretens.

Die Expositionsrechnungen auf Grundlage von Anlage XII Teil D der StrSchV weisen keine explizit zu berücksichtigenden Expositionsszenarien aus. In Anlehnung an die BGIB /SKK 10/, aus Betriebserfahrungen von Produktionsanlagen der Erdöl-/ Erdgasindustrie und in Kenntnis der Arbeiten in Anlagen der geothermalen Energieerzeugung werden folgende Szenarien und Detailszenarien berücksichtigt:

- Exposition von Referenzpersonen beim Umgang mit geschlossenen Anlagenteilen
 - Inspektionen der Anlage
 - Lagerung von verwahrten Rückständen am Standort

- Exposition von Referenzpersonen beim Umgang mit geöffneten Anlagenteilen oder separierten Rückständen
 - -Reinigung von Anlagenteilen (insb. des Wärmetauschers)
 - -Austausch von Filtereinsätzen
 - Allgemeine Wartungsarbeiten an geöffneten Anlagenteilen (Austausch Komponenten)
 - Aufenthalt der Referenzperson in der Wasserdampfwolke des Separators
- Aufenthalt in Betriebsgebäuden

Die Betrachtungen berücksichtigten nicht folgenden Szenarien:

- Aufenthalt von Referenzpersonen am Aufschlagpunkt bei Freisetzung von NORM infolge Unfall

Zahlreiche Untersuchungen an Arbeitsplätzen an denen natürliche Radionuklide mit erhöhten spezifischen Aktivitäten vorhanden sind, haben gezeigt, dass das Gesamtinventar an natürlichen Radionukliden zu gering ist und/oder die Freisetzungs- und Expositionsdauer zu kurz ist, um in der Umgebung außerhalb der Anlage erheblich erhöhte Expositionen über 6 mSv/a zu bewirken. Außerdem werden bei einer thermischen Freisetzung aus den meist mineralischen Materialien fast nur die volatilen Blei- und Polonium-Isotope freigesetzt, die fast ausschließlich eine Exposition durch Staubinhalation bewirken. Deshalb gelten für diese Isotope auch höhere Überwachungsgrenzen, wie bereits ausgeführt. Folglich ergibt sich selbst bei Industriebranchen mit erheblich erhöhten Konzentrationen natürlicher Radionuklide keine Notwendigkeit zur Einführung bzw. Übernahme von Störfallgrenzwerten der Strahlenexposition.

- Verzehr von Muttermilch und lokal erzeugter Lebensmittel (pflanzliche und tierische Produkte sowie Wasser)

Das Szenarium „Verzehr von Muttermilch und lokal erzeugter Lebensmittel (pflanzliche und tierische Produkte sowie Wasser)“ mit den entsprechenden Expositionspfaden wird nicht betrachtet, da kein Anbau von Pflanzen auf kontaminierten Flächen im Umkreis der Anlage angenommen wird (Transfer Boden zur Pflanze). Bei der Berechnung der Strahlenexposition sind die Kontaminationswege „Transfer vom Boden zur Pflanze“

und „Freisetzung mit der Luft“ nur zu berücksichtigen, wenn die durch Freisetzung mit der Luft kontaminierte Umgebung ausreichend groß und geeignet sind, um einen 50%igen Anteil an lokaler Produktion von Lebensmitteln für Referenzpersonen der allgemeinen Bevölkerung zu ermöglichen

- Transport von Rückständen und kontaminierten Anlagenteilen

Bezüglich des Transports kontaminierter Ausrüstungsgegenstände und von Rückständen sind die aktuellen Transportvorschriften des Europäischen Übereinkommen über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße /ADR 13/, / Absatz 2.2.7.1.1 (Abschnitt 2.2.7: Klasse 7 – radioaktive Stoffe) zu beachten. Eine detaillierte Betrachtung der Exposition infolge eines Transportes radioaktiver Materialien vom Betriebsgelände zum Ort der Beseitigung oder Verwertung ist nicht Gegenstand des Vorhabens gewesen. Eine verlässliche Abschätzung setzt zudem die Definition entsprechender Transportszenarien sowie eine ausreichende Datengrundlager voraus. Die GRS hat sich im Rahmen eines IAE0-Vorhabens intensiv mit aktuellen Fragestellungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe, speziell NORM-Stoffe beschäftigt. Für weitere Informationen wird auf den Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben CRP NORM (Exposure of Transport Workers from the Transport of Most Important NORM in Germany) verwiesen /GRS 10b/.

Folgende wesentliche Szenarien wurden berücksichtigt und orientieren sich an bereits durchgeführten Expositionsabschätzungen (Tab. 8.3). Die Modellparameter wurden im Gespräch mit einem Anlagenbetreiber erhoben bzw. Annahmen verifiziert. Somit werden realistische Frequenzen und Aufenthaltszeiten in das Modell eingeführt.

Tab. 8.3 Betrachtete Szenarien mit Frequenz und Ereignisdauer

| Szenario | Szenario – Frequenz [Anzahl/a] [FRQSZ] | Dauer Szenarien [h/Vorgang] [PAEXP] |
|---|---|--|
| #SZEN1 Szenario 1: Allgemeine Arbeiten Anlage (in-door) | 228,0 ... 256,0 | 0,5 |
| #SZEN2 Szenario 2: Inspektion Anlage Bereich WT/Generator | 228,0 ... 256,0 | 0,5 |
| #SZEN3 Szenario 3: Filterwechsel Grobfilterkolonne | 2,0 ... 3,0 | 1,0 |
| #SZEN4 Szenario 4: Filterwechsel Feinfilterkolonne | 98,0 ... 161,0 | 1,0 |
| #SZEN5 Szenario 5: Reinigung Filterkörbe, Siebe u. Gehäuse | 0,33 ... 1,0 | 1,0 |
| #SZEN6 Szenario 6: Arbeiten am offenen WT | 0,33 ... 1,0 | 20,0 |
| #SZEN7 Szenario 7: Arbeiten an offener Anlage, Revisionen | 15,0 | 0,0 |
| #SZEN8 Szenario 8: Dampf-Abblasen der Anlagen (z. B. Separator) | 50,0 | 0,5 |
| #SZEN9 Szenario 9: Arbeiten an Reinjektionspumpe | 1,0 ... 3,0 | 8,0 |
| #SZEN10 Szenario 10: Andere Arbeiten | 228,0 ... 256,0 | 6,86 |

Die Summe aller Arbeitsaufenthalte in Stunden ergibt eine um Urlaubstage und Feiertage korrigierte Jahresarbeitszeit von 2.000 h. Die jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson am Expositionsort in h kann im günstigsten Fall den Tätigkeitsberichten der Beschäftigten entnommen werden.

Es wurden grundsätzlich nur Arbeiten betrachtet, die durch die in der Anlage tätige Tagesmannschaft des Betreibers durchgeführt werden. Besondere Arbeiten wie die Reinigung eines Wärmetauschers werden durch Fremdfirmen durchgeführt, diese Tätigkeiten jedoch durch die Tagesmannschaft unterstützt oder begleitet.

Mit der Angabe eines Wertebereiches wurden Informationen über die Verteilung der Daten (unscharfer Variablen) übertragen. Für den Fall, dass keine weiteren Information zur Verteilung vorlagen wurde eine Gleichverteilung angenommen, die im geringstem Maße zusätzliche Unsicherheiten einführt oder aber Punktwerte gesetzt.

Für die Szenarien wurden die jeweilig relevanten Expositionspfade bestimmt (Tab. 8.4).

- Exposition durch Ingestion von fein dispergierten Stäuben und Aerosolen mit erhöhter Aktivität natürlicher Radionuklide,
- Exposition durch Inhalation von fein dispergierten Stäuben und Aerosolen mit erhöhter Aktivität natürlicher Radionuklide,
- Äußere Exposition durch Gammastrahlung in der Umgebung von Anlagenteilen oder abgegrenzten Quellen (kontaminierte Rohrleitungen oder Wärmetauscher aber auch Transportladungen mit Rückständen oder verpackte Rückstände in Tonnen),
- Exposition durch Inhalation von Radon und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten.

Tab. 8.4: Relevanz der Expositionspfade in einzelnen Szenarien

| Szenario | Direktingestion Feststoff | Direktingestion Flüssigkeit | Inhalation | Äußere Strahlenexposition (ODL) | Radon-Exposition |
|---|---------------------------|-----------------------------|------------|---------------------------------|------------------|
| #SZEN1 Szenario 1: Allgemeine Arbeiten Anlage (indoor) | | | | X | X |
| #SZEN2 Szenario 2: Inspektion Anlage Bereich WT/Generator | | | | X | X |
| #SZEN3 Szenario 3: Filterwechsel Grobfilterkolonne | X | | X | X | X |
| #SZEN4 Szenario 4: Filterwechsel Feinfilterkolonne | X | | X | X | X |
| #SZEN5 Szenario 5: Reinigung Filterkörbe, Siebe u. Gehäuse | X | | X | X | X |
| #SZEN6 Szenario 6: Arbeiten am offenen WT | | | | X | X |
| #SZEN7 Szenario 7: Arbeiten an offener Anlage, Revisionen | X | | X | X | X |
| #SZEN8 Szenario 8: Dampf-Abblasen der Anlagen (z. B. Separator) | | X | X | | X |
| #SZEN9 Szenario 9: Arbeiten an Reinjektionspumpe | X | | X | X | X |
| #SZEN10 Szenario 10: Andere Arbeiten | | | | X | X |

Annahmen

Eine Reihe von Annahmen ist erforderlich, um die Expositionspfade entsprechende zu berücksichtigen. Oft sind derartige Eingangsdaten Bestandteil gesetzlicher Regelungen (frühere MAK-Werte, jetzt AGW-(Arbeitsplatzgrenzwerte) Werte) oder Annahmen in Berechnungsgrundlagen.

Tab. 8.5 Annahmen für Eingangsparameter der Expositionsabschätzung

| Name | Beschreibung | Wert | Min | Max | Typ Verteilung | Bemerkung |
|--------|---|----------|----------|----------|----------------|----------------------|
| AKDANS | Aufnahmerate Direktingestion Feststoff in (g/h) | 4,00E-03 | 0,004 | 0,010 | GVT | 0,006 nach BGIB |
| AKDANL | Aufnahmerate Direktingestion Flüssigkeit in (l/h) | 8,30E-05 | 8,00E-05 | 5,00E-04 | GVT | |
| AKIATR | Atemrate Inhalation Staub in (m³/h) | 1,20E+00 | | | | BGIB Tab. II.1 |
| AKISTB | Staubkonzentration. (g/m³) | 3,00E-03 | 1,50E-04 | 1,00E-02 | GVT | MAK/MIK nach TRGS900 |
| AKIFAS | Faktor Staubkonz. Luft/Gebäude (als 1.0 gesetzt) | 1,00 | | | | |

Im Sinne einer Gleichverteilung wurden für Annahmen zwischen begründeten Minimal und Maximalwerten im Zuge der Monte-Carlo-Simulation Eingangswerte erzeugt.

Im Verlaufe des Vorhabens wurden geänderte zulässige Staubkonzentrationen an Arbeitsplätzen in Kraft gesetzt. Die Abschätzungen berücksichtigen noch die weniger konservativen bisherigen Werte.

Aufnahmerate Direktingestion Feststoff / Flüssigkeit

Die Direktingestion resultiert aus einer Aufnahme radioaktiver Stoffe über Mund / Nase und Transport durch den Magen / Darm-Trakt. Im vorliegenden Fall führt die versehentliche Aufnahme von Aktivität (Verschlucken von Staub, Aufnahme wasserdampfgetragener Partikel (z. B. Sprühnebel)) zur Exposition. Nach BGIB berechnet sich die Strahlenexposition durch Direktingestion von Boden wie folgt:

$$E_{\text{Ing,Bo},j} = U_{\text{Bo},j} \sum_s t_{\text{Exp},j,s} \sum_r (C_{\text{Bo}(0,5),r,s} - C_{\text{Bo}(0,5),r}^U) g_{\text{Ing},r,j}$$

mit

$E_{\text{Ing,Bo},j}$: Effektive Dosis für die Referenzperson j durch direkte Aufnahme von Boden in Sv

$C_{\text{Bo}(0,5),r,s}$: Spezifische Aktivität des Radionuklids r in der Feinkornfraktion (Teilchen mit einem Durchmesser < 0,5 mm) der oberen Bodenschicht (0 – 30 cm) am Expositionsort s in Bq kg⁻¹ (TM)

$C_{Bo(0,5),r}^U$: Spezifische natürliche Untergrund - Aktivität des Radionuklids r in der Feinkornfraktion der oberen Bodenschicht (0 – 30 cm) in $Bq\ kg^{-1}$ (TM) (entfällt)

$U_{Bo,j}$: Boden-Aufnahmerate der Referenzperson j in $kg\ h^{-1}$

$t_{Exp,j,s}$: Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h

$g_{Ing,r,j}$: Ingestionsdosiskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j in $Sv\ Bq^{-1}$

Die Terme $C_{Bo(0,5),r,s}$ und $C_{Bo(0,5),r}^U$ reduzieren sich im vorliegenden Fall auf die spezifische Aktivität des Radionuklids r im ingestierten Material.

Als Aufnahmerate $U_{Bo,j}$ wird $6,0\ E-06\ kg\ h^{-1}$ für Beschäftigte gemäß Anlage IV, Tab. IV.5 in /SSK 10/ verwendet. Grundsätzlich kann auch eine einmalige Ingestion von Material (als Feststoff in g oder Flüssigkeit in l angesetzt werden).

Ein konstantes, zeitlich nicht eingrenzbare Inkorporationsrisiko kann auch durch einen Anteil a beschrieben werden, der den Anteil an der gehandhabten Aktivität, der beim Umgang unbemerkt inkorporiert wird, beschreibt. Der Wert der im Kalenderjahr maximal (zeitlich nicht eingrenzbaren) inkorporierbaren Aktivität $A_{u,k}$ des Nuklids k wird dann berechnet nach:

$$A_{u,k} = a \cdot N \cdot A_k$$

mit

N Anzahl der Tage im Kalenderjahr, an dem mit der mittleren arbeitstäglich gehandhabten Aktivität A_k des Nuklids k tatsächlich umgegangen wird.

A_k mittlere arbeitstäglich gehandhabte Aktivität des Nuklids k.

Annahmen zur Ingestion von Feststoffen und Flüssigkeiten sind als konservativ zu bewerten, da die Aktivitätsaufnahme in der Regel durch Anwendung von Mindeststandards des Arbeitsschutzes (Mundschutz) wirkungsvoll unterbunden werden kann. Auch nach § 95 Abs. 12 der StrlSchV wird darauf hingewiesen, dass bei Arbeiten in Arbeits-

feldern nach Anlage XI, die zu einer effektiven Dosis unterhalb von 6 mSv/a führen, zur Erfüllung der Pflicht der Dosisreduzierung nach § 94 StrlSchV Maßnahmen des allgemeinen Arbeitsschutzes vorzusehen sind.

Schwebstaubkonzentrationen am Arbeitsplatz

Die effektive Jahresdosis $E_{\text{Inh},j}$ der Referenzperson j durch Inhalation von Staub ist nach BGIB /SSK 10/ wie folgt zu berechnen:

$$E_{\text{Inh},j} = \dot{V}_j \cdot \sum_s \sum_r (C_{\text{Luft},r,s} - C_{\text{Luft},r}^U) \cdot g_{\text{Inh},r,j} \cdot t_{\text{Exp},j,s} \cdot a_{\text{Luft},s}$$

mit

$E_{\text{Inh},j}$ Effektive Jahresdosis durch Inhalation von Staub für die Referenzperson j in Sv

$C_{\text{Luft},r,s}$ Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids r in der Atemluft für den Expositionsort s in Bq m^{-3}

$C_{\text{Luft},r}^U$ Natürliche Untergrund-Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids r in der Außenluft in Bq m^{-3} ,

V_j Atemrate für die Referenzperson j in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$

$g_{\text{Inh},r,j}$ Inhalationsdosiskoeffizient für das Radionuklid r und die Referenzperson j in Sv Bq^{-1}

$t_{\text{Exp},j,s}$ Jährliche Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h

$a_{\text{Luft},s}$ Faktor zur Ermittlung der Staubkonzentration am Expositionsort s aus der Staubkonzentration im Freien, dimensionslos ($a_{\text{Luft},s} = 1$ für Aufenthalt im Freien und $a_{\text{Luft},s} = 0,5$ für Aufenthalt in Gebäuden, im Falle der Dosisabschätzung durch Inhalation von NORM bei Arbeiten in Anlagen der geothermischen Energieerzeugung wird $a_{\text{Luft},s} = 1$ gesetzt)

Die natürliche Untergrund-Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids r in der Außenluft kann bei der Betrachtung der Dosisabschätzung in Anlagen der Geothermie vernachlässigt werden.

Für die Atemrate V_j für die Referenzperson j in $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ wird gemäß Anlage II, Tab. II.1 in /SSK 10/ $1,2 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$ für Beschäftigte verwendet.

Für den Fall, dass die Aktivitätskonzentration des an Staub gebundenen Radionuklids r in der Atemluft für den Expositionsort s nicht bekannt ist, kann nach BGIB über einen Aufkonzentrationsfaktor $AF = 0,02 \cdot r$ die Resuspension von Staub mit Teilchendurchmessern $< 0,02 \text{ mm}$ mittels eines Referenzwertes der Schwebstaubkonzentration aus der spezifischen Aktivität des Bodens für den Expositionsort s abgeschätzt werden. Nach BGIB wird empfohlen, für AF den Wert 4 einzusetzen. Der Aufkonzentrationsfaktor AF berücksichtigt definitionsgemäß nicht den prozentualen Masseanteil der Staubfraktion an der Gesamtprobe und ist deshalb wahrscheinlich nur bei Nebengesteinen nach Nummer 3.a) der Anlage XII Teil A der StrlSchV in erster Näherung anwendbar, d. h. bei Materialien mit entsprechend breitem Kornbandspektrum. Bei Rückständen aus chemischen Prozessen (dazu zählen die Scale in Anlagen der Geothermie) ist die Radioaktivität gleichförmig verteilt und somit nimmt hier der Aufkonzentrationsfaktor AF den Wert von 1 an. Für freigesetzte Stäube beim Umgang mit geöffneten Anlagenteilen wird eine homogene Aktivitätsverteilung vorausgesetzt.

Für Arbeitsplätze im Freien (berufliche Tätigkeit oder Arbeit auf bergbaulichen Anlagen oder Einrichtungen) wird nach /SSK 10/ konservativ ein technischer Referenzwert der Schwebstaubkonzentration (TA-Luft) der Atemluft von $S_{\text{Staub}} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ kg m}^{-3}$ angenommen. Die Tätigkeiten oder Arbeiten auf der Fläche rechtfertigen einen um eine Größenordnung höheren S_{Staub} -Wert im Vergleich zum allgemeinen Referenzwert für Außenluft ($5 \cdot 10^{-8} \text{ kg m}^{-3}$).

Nach TRGS 900 galt für die einatembare Fraktion ein Arbeitsplatzgrenzwert in Innenräumen von 10 mg/m^3 , für die alveolengängige Fraktion von 3 mg/m^3 . Dies wäre eine Staubkonzentration um deutlich eine Größenordnung höher als die Annahme in /SSK 10/. Die MAK-Werte werden durch die maximalen Immissions-Konzentrationen – MIK – als Empfehlungen für Grenzwerte, für die Luftverunreinigungen bodennah im Freien außerhalb der Emissionsquelle für Mensch und Tier oder Pflanze bei dauernder Einwirkung als unbedenklich erachtet werden, ergänzt. Meist wird MIK als $1/20$ des MAK-Wertes angesetzt.

Durch die Benässung von aktivitätstragenden Oberflächen oder Rückständen wird die Aufwirbelung von luftgetragener Aktivität unterbunden. Reinigungsarbeiten unter Einsatz von Hochdruck-Wasserdampfreinigern sollten daher nicht zu relevanten Expositi-

onen über den Inhalationspfad führen, können aber Detailuntersuchungen hinsichtlich eines erhöhten Ingestionsanteils (Aufnahme des Wasserdampfnebels) rechtfertigen.

Dosiskoeffizienten

Bei der Berechnung der Strahlenexposition infolge von Arbeiten in Anlagen der geothermalen Energieerzeugung sind die Nuklide der Uran-Radium- und Thorium-Reihe zu berücksichtigen. Die NORM-Ablagerungen in Anlagen der Tiefengeothermie weisen jedoch starke radioaktive Ungleichgewichte innerhalb der U-238 und Th-232 Zerfallsreihen auf. Bezüglich der Inhalations- und Ingestionsdosiskoeffizienten für die Radionuklide r [Sv Bq^{-1}] wird daher sinnvollerweise eine Reduktion auf Ra-226 und Ra-228 im jeweiligen säkularen Gleichgewicht mit seinen Tochternukliden vorgenommen. Der Bezug auf das Nuklid mit der höchsten Aktivität bei Nichtgleichgewicht gilt ohne Einschränkung für alle dementsprechenden Rückstände in Anlage XII Teil A der StrISchV. Einen Spezialfall stellen die selektiv gebildeten Pb-210 / Po-210-Scale dar, die eine Einzelfallprüfung erfordern.

In der Berechnungsgrundlage Bergbau /SSK 10/ werden die Ingestionsdosiskoeffizienten g_{ing} [Sv/Bq] für Einzelnuklide bei der Ingestion von Nahrungsmitteln und Trinkwasser aus Gründen der Konservativität auch für die Direktingestion von Boden verwendet (Anlage IV, Tab. IV.1) . Lediglich für das in anorganischer Form vorliegende Po-210 wird zusätzlich der Dosiskoeffizient für die Direktingestion von Boden je Altersgruppe genannt, der etwa 1/5 des Wertes für Ingestion von Lebensmitteln beträgt. Für Beschäftigte wird grundsätzlich davon ausgegangen, dass Po-210 in anorganischer Form vorliegt. Für ein Nuklidgemisch im radioaktiven Gleichgewicht ergibt sich in /SSK 10/ folglich ein etwa um den Faktor 2 niedrigerer Ingestionsdosiskoeffizient (je nach Altersgruppe) im Falle der Direktingestion. Diese Inkonsistenz ist insofern nachvollziehbar, dass die Rechenmodelle in /SSK 10/ primär für aufgehaldetes bzw. flächenhaft geschüttetes Bergematerial gelten; d. h. hier kann vom radioaktivem Gleichgewicht ausgegangen werden.

Im vorliegenden Fall weisen die entsprechenden Rückstände jedoch überwiegend Nichtgleichgewicht innerhalb der natürlichen Zerfallsreihen auf, so dass mit Ausnahme des Po-210 auch bei der Direktingestion stets die nuklidspezifischen Dosiskoeffizienten verwendet werden müssen. Da diese Rückstände meist aus mineralischen Rohstoffen hervorgehen, liegen die Nuklide aller betreffenden Elemente deshalb auch in anorganischer Form vor. Somit dürfte die biologische Verfügbarkeit im Körper (f_1 -Werte) ähnlich

wie beim Polonium geringer sein als dies bei der Aufnahme der Radionuklide mit der Nahrung der Fall ist.

Für den Ingestionsdosiskoeffizient ($g_{\text{ing},r,i}$) für das Radionuklid r werden gemäß /SSK 10/ folgende Werte verwendet (Anlage IV, Tab. IV.1 in /SSK 10/):

Tab. 8.6 Nuklidspezifische Ingestionsdosiskoeffizienten

| Radionuklid | g_{ing} in Sv Bq ⁻¹ für „Beschäftigter“ |
|-------------|---|
| Ra 226 | 2,8 E-07 |
| Pb 210 | 6,8 E-07 |
| Po 210 | 2,4 E-07 |
| Ra 228 | 6,7 E-07 |
| Th 228 | 7,0 E-08 |

Folgende Inhalationsdosiskoeffizienten g_{inh} für die Referenzperson „Beschäftigter“ werden verwendet (Anlage II, Tab. II.2 in /SSK 10/):

Tab. 8.7 Nuklidspezifische Inhalationsdosiskoeffizienten

| Radionuklid | g_{inh} in Sv Bq ⁻¹ für „Beschäftigter“ |
|-------------|---|
| Ra 226 | 2,2 E-06 |
| Pb 210 | 1,1 E-06 |
| Po 210 | 2,2 E-06 |
| Ra 228 | 1,7 E-06 |
| Th 228 | 3,2 E-05 |

Der nach /SSK 10/ angesetzt Aktivitätsgrößenwert des inhalierten Staubes berücksichtigt Partikel einer Größe $<20 \mu\text{m}$ ($0,02 \text{ mm}$), was im Vergleich zur Aerosolkennggröße AMAD (aerodynamischer Durchmesser des Aktivitätsmedianwertes) mit einem Wert von $5 \mu\text{m}$, wie sie den Inhalationskoeffizienten der ICRP (und dem basierendem Lungenmodell) zugrunde liegen, aufgrund der geringeren Lungengängigkeit der Partikel $> 5 \mu\text{m}$ eher zu einer Überschätzung der Dosis führt. Partikel mit einem Durchmesser $>10 \mu\text{m}$ (Grobstaub) werden durch Nasenhärchen und Schleimhautcilien des Rachenraumes ausgefiltert und überwiegend ausgeschieden (können aber über die Ingestion in den Magen-Darm-Trakt befördert werden). Partikel mit Durchmessern $< 10 \mu\text{m}$ (inhalierbarer Feinstaub), $< 2,5 \mu\text{m}$ (lungengängiger Feinstaub) sowie ultrafeine Partikel $< 1 \mu\text{m}$ zeigen demgegenüber eine abweichende Abscheidecharakteristik.

Radonexpositionsabschätzung

Die Strahlenexposition durch Radon und seine kurzlebigen Zerfallsprodukte beruht im Wesentlichen auf der Inhalation einer Alphaaktivität der Folgeprodukte mit einem unbekanntem Nuklidvektor. Dosisbestimmend bezüglich der Inhalation von Radongas und seinen Folgeprodukten sind die kurzlebigen Folgeprodukte (Po-218, Pb-214, Bi-214 und Po-214). Diese befinden sich aufgrund verschiedener Prozesse der Abscheidung in einem unbekanntem Verhältnis (radioaktives Ungleichgewicht) im Atemluftvolumen. Das Luftvolumen kann jedoch über die messbare potentielle Alphaenergiekonzentration (PAEC) (die Energie die maximal bei Abscheidung der enthaltenen Radon-FP an das Lungenepithel übertragen und strahlenbiologisch wirksam werden kann) charakterisiert werden (.

Tab. 8.8 Charakteristische Verhältnisse der PAE (nach /SSK 02/)

| Nuklid | Halbwertszeit | Anzahl Atome / Bq ($1/\ln 2/T_{1/2}$) | Verhältnis | Potentielle Alphaenergie PAE | | | |
|-------------------|---------------|--|-----------------------|------------------------------|--------------|----------------------|-------------------------------|
| | | | | Pro Atom | | Pro Zerfall | |
| | | | | MeV | 10^{-12} J | MeV Bq ⁻¹ | 10^{-10} J Bq ⁻¹ |
| ²²² Rn | 3,82 d | 476 000 | - | - | - | - | - |
| ²¹⁸ Po | 3,05 min | 264 | 1 | 13,69 | 2,19 | 3 615 | 5,79 |
| ²¹⁴ Pb | 26,8 min | 2320 | 8,79 | 7,69 | 1,23 | 17 840 | 28,6 |
| ²¹⁴ Bi | 19,9 min | 1723 | 6,53 | 7,69 | 1,23 | 13 250 | 21,2 |
| ²¹⁴ Po | 164 μ s | $2,37 \times 10^4$ | $8,98 \times 10^{-7}$ | 7,69 | 1,23 | 2×10^{-3} | 3×10^{-6} |
| Total | | | | | | 34 710 | 55,6 |

Die PAEC entspricht mit ihrem Wert einer Radon-Gas-Konzentration im GW mit allen FP. Durch Normierung der PAEC auf diese Konzentration erhält man die gleichgewichtsäquivalente Radonkonzentration (EEC) einer diskreten PAEC.

$$PAEC [MeV m^{-3}] = C(Rn) [Bq m^{-3}] * 3.5 \cdot 10^4 MeV Bq^{-1}$$

Der Gleichgewichtsfaktor F verbindet die physikalische Messung von Radon-Gas mit der Messung der PAEC:

$$F = \frac{EEC}{C_A(Radon)}$$

mit einem Wertebereich zwischen 0...1. Ein $F = 1$ entspricht einem radioaktiven Gleichgewicht in der Zerfallsreihe zwischen Rn-222 und Po-214 in einem Luftvolumen.

Für vorliegende Berechnungen wird ein Gleichgewichtsfaktor von $F = 0.4$ angesetzt. Nach Ausführungen im Entwurf der IAEA Safety Standards DS 453 (Occupational Radiation Protection) /IAE 13/ liegt der überwiegende Teil der ermittelten F-Werte an Arbeitsplätzen im Bereich von $\pm 30\%$ dieses Wertes, so dass in begründeter Weise eine Variabilität im Bereich von 0,28 ... 0,52 angenommen und über eine MC-Simulation mit Gleichverteilung modelliert wird.

Die Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten erfolgt auf der Grundlage der in der Richtlinie 96/29/Euratom vom 13. Mai 1996 genannten Dosiskonvention der ICRP 65, die es gestattet, aus der potentiellen Alphaenergie-Exposition PAEE die effektive Dosis zu ermitteln. Die potentielle Alpha-Energie-Exposition kann, wie oben erläutert, aus Messwerten der Radon-222-Konzentration (bei Kenntnis des Gleichgewichtsfaktors F und der Aufenthaltszeit) oder (verlässlicher) direkt über die gemessene PAEC (bei Kenntnis der Aufenthaltszeit) bestimmt werden.

Die effektive Dosis $HR_{n,j}$ der Referenzperson j wird aus Werten der Radon-222-Konzentration $CR_{n,s}$ nach folgender Formel berechnet:

$$HR_{n,j} = gEE_{C,j} \times \sum (CR_{n,s} - CR_{n,U}) \times FR_{n,s} \times t_{Exp,j,s}$$

mit

| | |
|-------------|--|
| $HR_{n,j}$ | Effektive Dosis durch Inhalation von Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten für die Referenzperson j in Sv |
| $CR_{n,s}$ | Mittlere Radon-222-Konzentration in der Freiluft für den Expositionsort s in $Bq\ m^{-3}$ |
| $CR_{n,U}$ | Radon-222-Konzentration des natürlichen Untergrundes in der Freiluft in $Bq\ m^{-3}$, |
| $gEE_{C,j}$ | Dosiskonversionskoeffizient der Referenzperson j für das Produkt aus Radon-222-Exposition und Gleichgewichtsfaktor in $Sv\ m^3\ Bq^{-1}\ h^{-1}$ |
| $FR_{n,s}$ | Faktor zur Beschreibung des radioaktiven Gleichgewichtes zwischen dem „Radon-222 und seinen kurzlebigen Zerfallsprodukten“ am Expositionsort s (Gleichgewichtsfaktor, dimensionslos) |

t Exp, j,s Aufenthaltszeit der Referenzperson j am Expositionsort s in h

Der Terme CR_{n,s} und CR_{n, U} werden im vorliegenden Fall (Abschätzung der Strahlenexposition in Anlagen der Geothermie) auf die Radonkonzentration der Raumluft in der Anlage (CR_n) reduziert.

Für den Dosiskonversionsfaktor wird auf /SSK 10/ verwiesen (Tab. 8.9):

Tab. 8.9 Dosiskonversionsfaktoren Radon

| | Effektive Dosis [mSv] | Anwendungsbereich | Quelle | Kommentar |
|------------------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|---|
| Gegenwärtig in Anwendung | | | | |
| 1 J h m ⁻³ | 1,40E+03 | Arbeitsplatz | ICRP 65 | für die potentielle Alpha-Energie-Exposition kurzlebiger Radon-222-Zerfallsprodukte |
| 1 J h m ⁻³ | 1,10E+03 | häuslicher Bereich | ICRP 65 | für die potentielle Alpha-Energie-Exposition kurzlebiger Radon-222-Zerfallsprodukte |
| 1 Bq h m ⁻³ (EEC) | 7,84E-06 | Arbeitsplatz | BerGrBergBau 2010 | für das Produkt aus Radon-222-Exposition und Gleichgewichtsfaktor |
| 1 Bq h m ⁻³ (EEC) | 6,10E-09 | häuslicher Bereich | BerGrBergBau 2010 | für das Produkt aus Radon-222-Exposition und Gleichgewichtsfaktor |

Die Durchführung von Abschätzungen der Strahlenexposition durch Inhalation von Radon und Radonfolgeprodukten wird zukünftig auf der Grundlage neuer, aktualisierter Dosiskonversionsfaktoren erfolgen. Mit ihrer Anpassung wird den neusten epidemiologischen Erkenntnissen, aber auch der Forderung der ICRP /ICR 10/ nach einer vergleichbaren Vorgehensweise der Bewertung der Aufnahme von Radionukliden auf Grundlage biokinetisch-dosimetrischer Modelle Rechnung getragen. Entsprechende Dosiskonversionsfaktoren liegen seit dem 20. September 2012 zur Kommentierung vor (/HAR 12/, /ICR 12/. Im Vergleich zu den in ICRP 65 genannten Dosiskonversionsfaktoren berücksichtigt die Diskussionsgrundlage das erhöhte Lungenkrebsrisiko durch deutlich angehobene Werte. Die gegenwärtig gültigen Werte der ICRP 65 werden bis zur Veröffentlichung neuer Werte Fortbestand haben. Schon jetzt weist aber die Kommission darauf hin, dass die Novellierung eine Erhöhung des Faktors [Dosis pro Exposition] um einen Faktor 2 und höher nach sich ziehen wird.

Die Revision der EU-BSS berücksichtigt vorsehend bereits die Empfehlungen der ICRP und die "neuen" Dosiskonversionsfaktoren: Statt wie bisher 1000 Bq/m³ an Arbeitsplätzen bzw. in öffentlichen Gebäuden mit geringen Aufenthaltszeiten zu gestatten

(Stand 30.05.2013) wird nunmehr ein einheitliches Referenzlevel von 300 Bq/m³ für die jahresgemittelte Radonkonzentration in Innenräumen eingeführt. Mit dieser Absenkung des Referenzlevels ist Handlungsbedarf in etlichen (auch bereits sanierten) Arbeitsfeldern abzusehen.

Messwerte

Wichtige Eingangsparameter sind (so vorhanden) Messwerte. Berechnungen sind insbesondere dann erforderlich, wenn Messergebnisse schwer interpretierbar sind. Dies kann zum Beispiel bei nur wenigen erhobenen Messdaten der Fall sein. Der probabilistische Ansatz gestattet es, durchaus auch unbegründet oder begründet Annahmen zu setzen, um eine weitere Berechnung zu ermöglichen. Darüber hinaus kann eine „künstliche“ Variabilität von Messwerten durch Monte-Carlo-Simulation erzeugt werden, wobei jegliche Informationen zur statistischen Verteilung von Messwerten genutzt werden sollten. Die Ermittlung der repräsentativen Werte hat jedoch vorrangig auf der Grundlage von Messungen zu erfolgen.

Im Rahmen der probabilistischen Ereignisbaumanalyse wurden Messwerte zur Fluidaktivitätskonzentration, Scale-Aktivitätskonzentration, Oberflächen- bzw. Ortsdosisleistung und Radonaktivitätskonzentration aus verfügbaren Literaturquellen zusammengestellt.

Zunächst wurden aus allen drei bekannten Geothermalprovinzen „Norddeutsches Becken“, „Oberrheingraben“ und „Süddeutsches Molassebecken“ Messwerte aus der Literatur zusammengestellt. Da die probabilistische Analyse insbesondere Unsicherheiten adressiert, kann grundsätzlich eine Betrachtung für alle drei Provinzen unter Verwendung der Varianz aller Messwerte erfolgen. Diese zunächst versuchsweise angewendete Vorgehensweise wurde aus folgenden Gründen nicht weiter verfolgt:

- 1) Die Geologie des jeweiligen Reservoirs einer Anlage als Quelle der natürlichen Radioaktivität im Fluid und nachfolgend in den Ablagerungen und Rückständen ist auch innerhalb einer Geothermieprovinz charakteristisch für einen Standort. Die Vergleichbarkeit zwischen den Standorten ist eingeschränkt.
- 2) Die Prozesse der Bildung von NORM im oberirdischen Anlagenteil werden durch die jeweilige Fahrweise einer Anlage kontrolliert.

- 3) Seitens der Betreiber besteht Bedarf an einer Expositionsabschätzung der eigenen Anlage.

Das zunächst verfolgte Anlagen-Pooling gibt bereits Hinweise auf die zu erwartenden beruflichen Strahlendosen, beinhaltet aber inakzeptable Unschärfen. Über Zweigwahrscheinlichkeiten und Unschärfen kann ein Ereignisbaum zwar immer Standorteigenschaften in geeigneter Weise berücksichtigen. Die anlagenspezifische Betrachtung gestattet es jedoch, konkrete Fragen des Betreibers und „seiner“ Behörde zu berücksichtigen. Eine begründete Einschränkung der Unsicherheit eines Parameters kann auch die Bandbreite des Ergebnisses und damit die Regelungsnotwendigkeit effizient einschränken.

Messwerte zur Fluidaktivitätskonzentration

Aus zahlreichen Messungen der Aktivitätskonzentration natürlicher Radionuklide im Thermalwasserfluid der Anlage Neustadt-Glewe in einem Förderzeitraum von 4 Jahren ist bekannt, dass die Aktivitätskonzentrationen recht konstant mit einer Normalverteilung um einen Mittelwert streuen /DEG 09/ (Abb. 8.3).

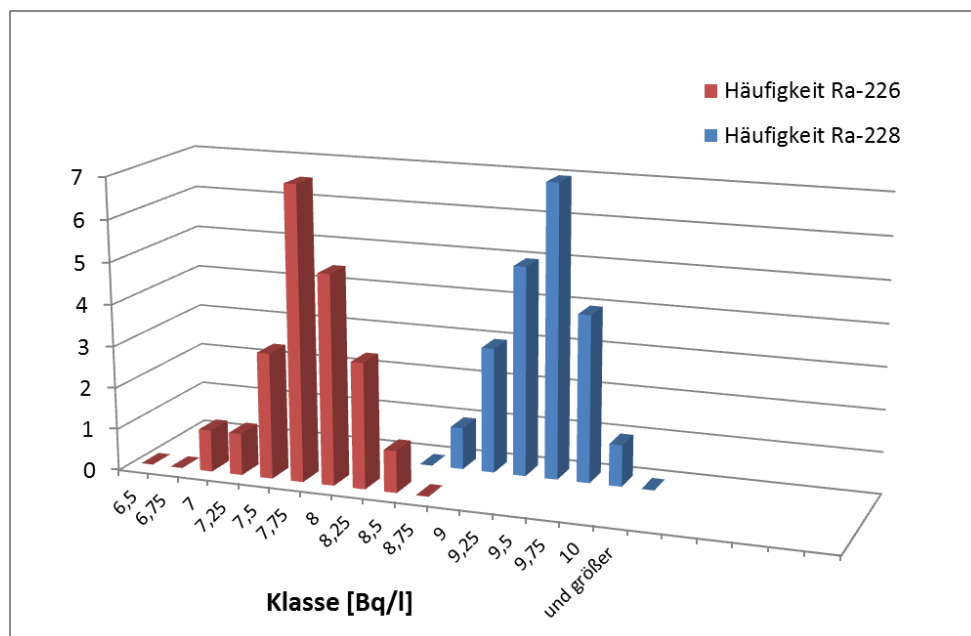


Abb. 8.3 Häufigkeitsverteilung der Aktivitätskonzentration von Ra-226 und Ra-228 im geförderten Thermalwasser der Anlage Neustadt-Glewe im Zeitraum 06/2004 – 06/2008 (nach /DEG 09/)

Diese Vermutung wird auch durch Reihenuntersuchungen in der Anlage Bruchsal im Oberrheingraben gestützt /EGG 13/, die über den Zeitraum 08/1986 bis 10/2011 im Rahmen des Fehlers der Messung konstante Aktivitätskonzentrationen der Radium-Isotope 226, 224 und 228 nachwiesen.

Für die Eingangsdaten der probabilistischen Ereignisbaumanalyse kann daher eine Normalverteilung angenommen werden, deren Messwerte mittels MC-Simulation um den Mittelwert zwischen den bekannten Minimum- und Maximumwerten erzeugt werden.

Informationen zu den Spannweiten der Aktivitätskonzentrationen der geförderten Fluide sind der Literatur zu entnehmen und konnten im Verlauf der Arbeiten durch seitens der Betreiber bereitgestellte Daten verifiziert werden (Tab. 8.10).

Tab. 8.10 Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide im Tiefenfluid (Zusammengestellt aus /DEG 09/, /DEG 10/, /DEG 11/)

| Region | Ra-226, Ra-228 | Pb-210 | Ra-224 | K-40 | Rn-220 |
|----------------------------|----------------|--------|--------|-----------|--------|
| | Bq/l | | | | |
| Oberrheingraben | 30 ... 50 | 13 | 19 | 130 | |
| Norddeutsches Becken | 2 ... 30 | 0,31 | 8,1 | 5 ... 130 | 2000 |
| Süddeutsches Molassebecken | 0,01 ... 0,7 | < 0,16 | 0,019 | 0,7 ... 1 | |

Eine Übertragung der beschriebenen Werte und Verallgemeinerung für konkrete Anlagen in der Region ist ohne Detailuntersuchungen der Anlage nicht möglich. Diese wurden insbesondere in Anlagen, die in hohem Maße Forschung und Erprobung von Technologien der wirtschaftlichen Nutzung des Thermalwassers verfolgen, durchgeführt und publiziert (Tab. 8.11)

Tab. 8.11 Aktivitätskonzentration [Bq/l] natürlicher Radionuklide im Thermalwasser einzelner Standorte

| Anlage | Ra-226 | Ra-228 | Ra-224 | Pb-210 | Quelle |
|--------------------|------------|------------|------------|-----------|----------|
| Soultz-sous-Forest | 29,1 ± 1,3 | 20,5 ± 0,9 | 19,9 ± 1,1 | 6,0 ± 1,7 | /DEG 11/ |
| Bruchsal | 23,5 ± 1,8 | 12,4 ± 1,1 | 9,3 ± 1,6 | | /EGG 13/ |

Messwerte zu Scale-Aktivitätskonzentrationen

Vielfach schwieriger ist die Modellierung der Eingangsdaten der Aktivitätskonzentrationen für feste Ablagerungen (Scale) in verschiedenen Anlagenteilen. Sowohl die Gesamtaktivität als auch der Nuklidvektor unterscheidet sich innerhalb der Anlage und zeigt eine deutliche Abhängigkeit von physiko-chemischen Bedingungen am Ablagerungsort aber auch den Materialeigenschaften der eingesetzten Komponenten. Hinzu kommt unter Umständen ein Einfluss eingesetzter Inhibitoren sowie mögliche Technologiewechsel in der Fahrweise oder der Reinigungsstrategie (Umstellung von HD-Wasserdampfreinigung auf Sandstrahlreinigung).

Kenntnisse über Mechanismen der Ablagerung, Häufigkeit und Effizienz von Reinigungen, Geschwindigkeit der Ablagerung, Verteilung der Aktivität innerhalb der Anlage sind nach wie vor limitiert, so dass eine seriöse Ereignisbaumaufstellung diesbezüglich erschwert ist. Benötigt werden Angaben über:

- Umgangsaktivitäten (Filterinhalte, Rückstände je WT-Reinigung oder Rohrreinigung)
- Angaben zur Aufwachsgeschwindigkeit der Scale in versch. Bauteilen (Eingangsdaten für eine Berechnung der Wahrscheinlichkeit für eine ortsspezifische ODL zu einem Zeitpunkt t für das jeweilige Bauteil)
- Dosisentwicklung innerhalb der Reinigungsintervalle (zur Validierung obiger Berechnungen bzw. Ableitung von Funktionen)
- Effizienz von Reinigungsmaßnahmen
- Bilanzierung von Rückständen (bauteilspezifisch)

Während die beobachteten Aktivitätskonzentrationen im Thermalwasser normalverteilt vorliegen, zeigen Aktivitätskonzentrationen von Rückständen im Allgemeinen eine Log-Normalverteilung, u. U. mit einer Störung durch konstanten Untergrund (Abb. 8.4).

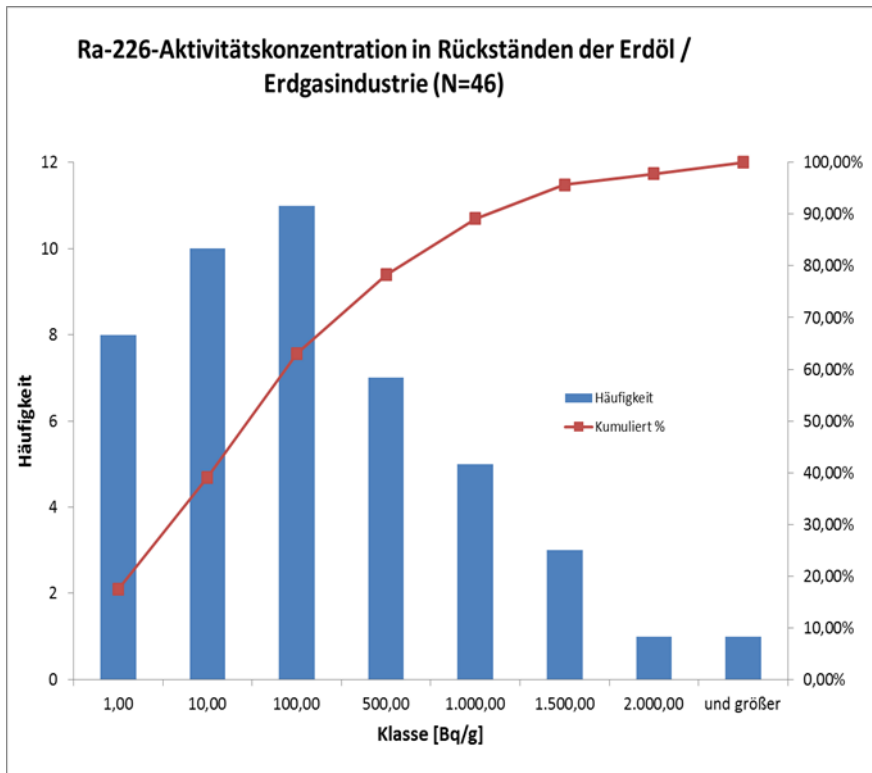


Abb. 8.4 Histogramm der Ra-226 Aktivitätskonzentration in Rückständen der Erdöl- / Erdgasindustrie (gepoolte Analysen europäischer Felder) /GRS 10a/

In bestimmten Fällen ist eine Modellierung durch Normalverteilung möglich, so bei relativ homogenen Rückständen aus industriellen Prozessen oder Mischproben aus einer großer Anzahl von Einzelproben /SSK 05/.

Da die Datenlage für die Anlage Landau vergleichsweise umfangreich ist, konzentrieren sich die Arbeiten auf diesen Standort. Basierend auf zahlreichen Analysen verschiedenster metallischer Bauteile und ausgelöster Rückstände der Anlage Landau konnte der Nuklidvektor für Ablagerungen an verschiedenen Bauteilen bestimmt werden.

Tab. 8.12 Nuklidvektoren verschiedenster Bausteile

| | Förderstrang | Oberirdische Verrohrung (Heiss) | Vorfilter | Wärmetauscher | Hauptfilter | Reinjektionspumpe (kalte Seite) |
|-------------------------|--------------|---------------------------------|-----------|---------------|-------------|---------------------------------|
| Ra-226 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Pb-210 (Pb210/Ra226) | 1 - 2578 | 1125 | 143 | 3,27 | 2,5 | 0,21 |
| Ra-288 (Ra228/Ra226) | 0,43 - 0,56 | 0,46 | 0,65 | 0,56 | 0,62 | 0,61 |
| Th-228 (Th228/Ra226) | 0,3 - 0,98 | 0,31 | 1 | 0,17 | 0,05 | 0,06 |

Neben in der Literatur veröffentlichten Einzelanalysen und Angaben über beobachtete Maximalkonzentrationen (Tab. 8.13) wurden seitens des Betreibers detaillierte Informationen über Aktivitätskonzentrationen von Rückständen zur Verfügung gestellt.

Tab. 8.13 Maximalkonzentrationen in Rückständen aus publizierter Literatur

| Geothermieprovinz / Anlage | Ra-226 | Pb-210 | Ra-228 | Ra-224 | Th-228 | Quelle |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|
| Norddeutsches Becken | 270 | 800 | 210 | | 190 | /KÖL 10/ |
| Soultz-sous-Forêts | 1.347 | 1.100 | 442 | 384 | 459 | /CUE 12/ |

Messwerte zur Radon-Aktivitätskonzentration

Eine Quelle von Radon bzw. Radon-Folgeprodukten ist das geförderte Thermalwasser, das mit Aktivitätskonzentrationen im Bereich zwischen einigen 10er Bq/l und mehreren 10.000 Bq/l gleichfalls transportiert wird /EGG 13/, /MER 05/, /KÖH 02/).

Im Fall einer Öffnung der Anlage kann Radon als Edelgas aus dem Wasser entweichen und in ein Atemluftvolumen (Außen- oder Innenräume) übertreten. Die messtechnischen Voraussetzungen für ein kontinuierliches Radon-Monitoring der Lösungen und

Gasphasen des Thermalwassers sind derzeit noch nicht vorhanden und werden durch die GRS im Rahmen des durch das BMWi geförderte Verbundvorhaben ANEMONA (FKZ 0325684A) entwickelt. Veröffentlichte Angaben zur Aktivitätskonzentration des Thermalwassers bzw. der Aktivitätskonzentration in austretenden Wasserdampfwolken sind aufgrund der anspruchsvollen Probennahme für Radon mit Unsicherheiten behaftet.

Weitere Quellen möglicherweise erhöhter Innenraumkonzentrationen sind eintretende Bodenluft oder die Freisetzung von Radon aus Radium-reichen Rückständen. Aufgrund der unzureichenden Datenlage konnten diesbezüglich keine vertiefenden Untersuchungen erfolgen.

Messungen der Radon-Aktivitätskonzentration wurden seitens einer Anlage im Oberreingraben im Zuge einer Expositionsabschätzung für Innenräume durchgeführt. Die ermittelten Aktivitätskonzentrationen liegen unterhalb des in den neuen Europäischen Grundnormen des Strahlenschutzes (EU-BSS) vorgeschlagenen Referenzwertes für Arbeitsplätze von 300 Bq/m^3 .

Im Zuge einer Emissionsbetrachtung der Anlage Landau wurde die Freisetzung natürlicher Radionuklide mit dem Wasserdampf beim Separatorbetrieb untersucht und für verschiedene Betriebszustände mit unterschiedlichen Volumenströmen die Radon-Emission auf der Grundlage der Aktivitätskonzentration von mittels Gasbeuteln gesammelten Proben bestimmt /TÜV 11/. Die Aktivitätskonzentrationen liegen zwischen 8.740 Bq/m^3 und 15.700 Bq/m^3 im Wasserdampf des Separators. Nur für ein spezielles Szenario (Aufenthalt unmittelbar in der Wasserdampfwolke) wurden diese Angaben als Grundlage der Radon-Expositionsabschätzung verwendet. Für Beurteilungspunkte in Abstand zur Emissionsquelle wurden keine signifikanten Dosisbeträge durch die Emission natürlicher Radionuklide mit dem Separatordampf ermittelt /TÜV 11/.

Da keinerlei Informationen zur Messgröße „Potentielle Alphaenergiekonzentration (PAEC)“ oder der Konzentration der kurzlebigen Radon-Zerfallsprodukte vorliegen, beruht die Expositionsabschätzung auf den verfügbaren Informationen zur Radon-Gas-Aktivitätskonzentration und der Verwendung obig beschriebener Annahmen über einen Gleichgewichtsfaktor.

Probabilistische Ereignisbaumanalyse

Die grundsätzliche Vorgehensweise der probabilistischen Analyse ist in Abb. 8.5 dargestellt:

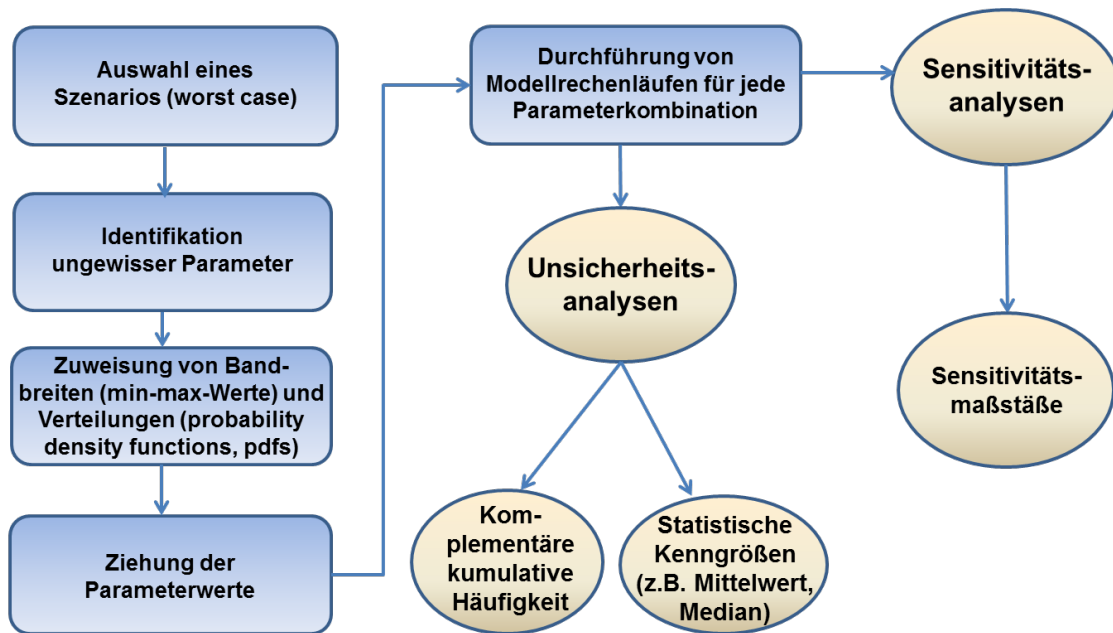


Abb. 8.5 Ablaufschema der probabilistischen Analyse

Der in einer ersten vorläufigen Form aufgesetzte Ereignisbaum führte bei Einsetzen von Punktdaten (keine Annahme von Wertebereichen), die als Grundlage einer realen deterministischen Dosisabschätzung bekannt waren, zu mit der deterministischen Dosisabschätzung vergleichbaren Ergebnissen (vergl. /KÖL 10/).

Der Ereignisbaum ist somit geeignet, das System „geothermale Energieerzeugung“ im Sinne einer Expositionsabschätzung zuverlässig abzubilden.

Werden statt der Punktwerte die Wertebereiche mit ihren Unsicherheiten in Verbindung mit einer Monte-Carlo-Simulation eingesetzt, ergibt sich als zusätzliche Information zunächst eine Häufigkeitsverteilung der zu erwartenden Jahresdosen (Abb. 8.6)

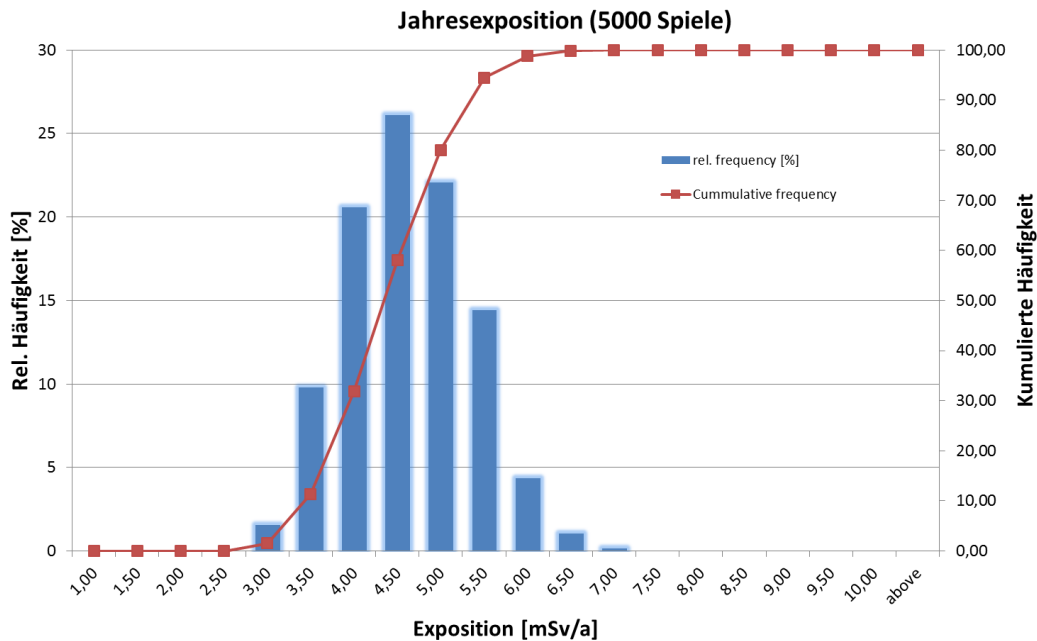


Abb. 8.6 Häufigkeitsverteilung der berechneten Jahresdosen unter Berücksichtigung aller Szenarien

Mit einer Sicherheit von 0,988 (99 %) kann davon ausgegangen werden dass die Jahresdosis des Beschäftigten unter 6 mSv / a bleibt.

Im persönlichen Gespräch mit Betreibern wurde deutlich, dass die beobachteten Jahresdosen tatsächlich unter 1 mSv/a bleiben. Daher ist davon auszugehen dass die verwendeten Modelle der Dosisabschätzung nach wie vor hohe Konservativitäten beinhalten aber auch unzutreffenden Annahmen das Ergebnis beeinflussen werden.

Die Einzelbeiträge der Szenarien zeigen, dass verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Spannweiten zum Gesamtergebnis beitragen (Abb. 8.7).

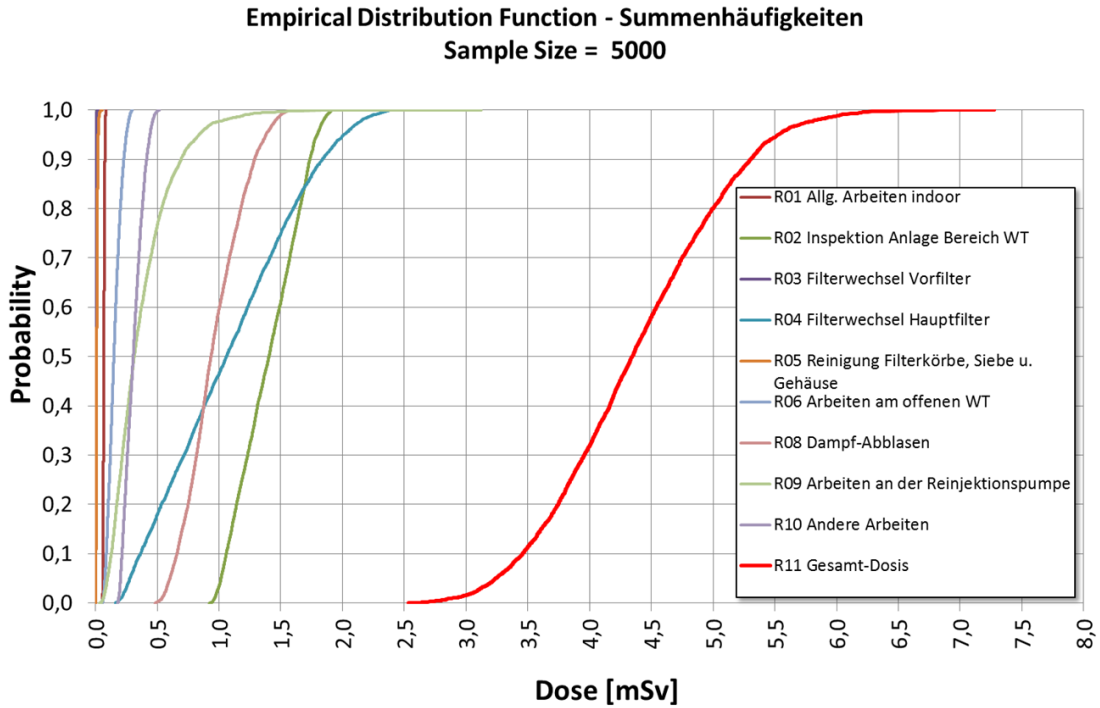


Abb. 8.7 Summenhäufigkeiten der resultierenden Einzeldosen der Szenarien

Mittels einer Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welche der variierten unsicheren Parameter in besonderem Maße zur Bandbreite der Wahrscheinlichkeit für die gesamte Dosisbelastung beitragen (Abb. 8.8).

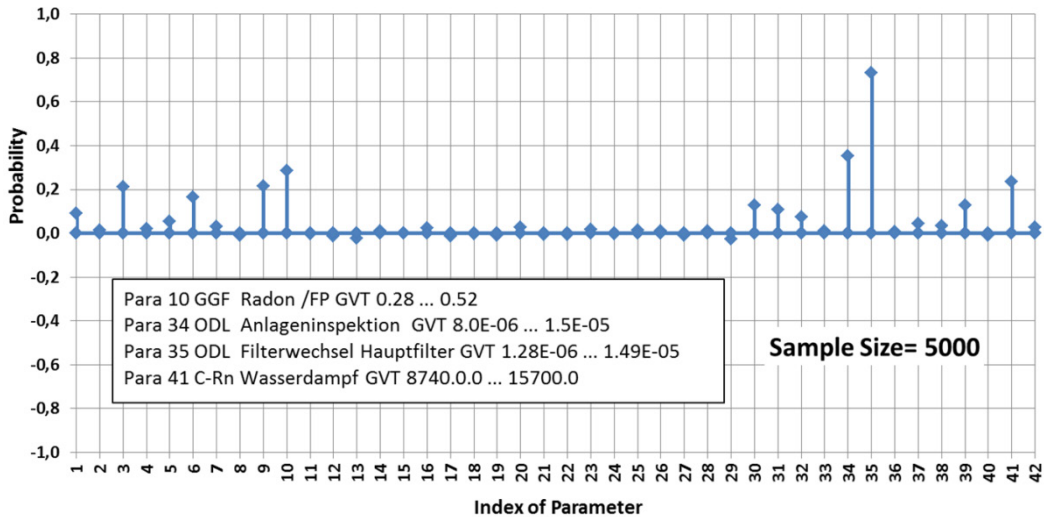


Abb. 8.8: Ergebnisse der SUSA- Sensitivitätsanalyse der probabilistischen Dosisabschätzung

Mit der auf der Y-Achse des Diagramms in Abb. 8.3 wird gewissermaßen die Sensitivität eines variierten Parameters dargestellt. Folgende Lesarten ermöglichen den Zugang zu dieser möglicherweise ungewohnten Darstellungsform:

- Große Unsicherheiten eines Parameters mit hoher Sensitivität bewirkt große Unsicherheiten des Gesamtergebnisses → Für diese Parameter muss ein Untersuchungsbedarf unterstellt werden, um rasch die Unsicherheiten zu beseitigen und die Unsicherheit des Gesamtergebnisses zu verbessern.
- Große Unsicherheiten eines Parameters kleiner Sensitivität haben wenig Einfluss auf die Unsicherheit des Gesamtergebnisses → Für diese Parameter bleiben Unsicherheiten tolerierbar
- Ein geringer Ausschlag der Sensitivität ist nicht gleichzusetzen mit einem geringem Beitrag zum Gesamtergebnis → Durch Veränderungen z. B. des Parameters „Dosiskoeffizient“, der stets punktscharf gesetzt wird kann das Gesamtergebnis entscheidend beeinflusst werden. So ist durch Anwendung der neuen Radon-Dosiskonversionsfaktoren z. B. mit verdoppelten Beiträgen durch Radon- und Radon-Folgeprodukte zu rechnen.

Die nach Angaben der Betreiber angesetzte Aufenthaltszeit von Beschäftigten im Bereich von inwandig kontaminierten Anlagenteilen weicht voraussichtlich beträchtlich von der tatsächlichen Aufenthaltszeit ab. Da der Expositionszeitraum wesentlich die resultierende externe Dosis bestimmt, ist hier von erheblichen Konservativitäten auszugehen, die auch die tatsächlich bestimmten deutlich niedrigeren Personendosen begründen.

Weitere „kritische“ Bestandteile des Ereignisbaumes sind unscharfe Parameter, die nicht über den gesamten Bereich variiert werden dürfen, da sie

- untereinander in Beziehung stehen → wie Nuklidvektoren,
- in bislang unbekannter Beziehung zueinander stehen → wie die Ablagerungsgeschwindigkeit mit der Förderrate oder
- deren Unschärfe aus einem nicht erlaubten Pooling resultiert → wie die Generalisierung über mehrere Lagerstätten bei abweichender Geologie der Lagerstätte.

Eine Bereinigung des Ereignisbaumes von übermäßigen Konservativitäten erscheint nach gegenwärtigem Kenntnisstand möglich zu sein, indem zunächst die Ergebnisse

der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Eine Bewertung der Großbeiträge impliziert umgehend den Bedarf an einer Verbesserung der Datenlage, insbesondere um auch die zeitliche Entwicklung der Dosis am Anlagenteil zu berücksichtigen. Nachstehend werden für ausgewählte Szenarien offene Fragen adressiert:

Radon-Exposition

Die Radon-Exposition resultiert aus dem Umgang mit Rückständen sowie der Freisetzung von Radon aus dem Thermalwasser. Die Rückstände selbst weisen geringe Emanationsraten (Ba(Ra)SO₄-Scale) auf, zudem sichert die Zwischenlagerung von Rückständen nach Sonderbetriebsplan in separatem Gebäude (Fertigarage) den Zutritt des Edelgases zu den Aufenthalts- und Arbeitsbereichen im Maschinenhaus. Die Exposition durch Radon aus dem Thermalwasser ist auf den zeitlich befristeten Betrieb des Separators mit wenigen 100 h/a im Außenbereich beschränkt. Eine unfallbedingte Freisetzung von Radon aus dem Thermalwasser im Gebäude ist denkbar, führt jedoch zu vergleichsweise geringen Expositionszeiten. Bei Arbeiten an geöffneten Anlagenteilen (Filtern) wird lediglich mit geringen Wasservolumina umgegangen, sodass hohe Innenraumaktivitätskonzentrationen nicht zu erwarten sind. Der Beitrag durch Radon ist gering. Bislang wurden jedoch keine Bestimmung von Radon-Folgeprodukten bzw. des Gleichgewichts-Faktors F bekannt, sodass hier mit Annahmen operiert werden muss. Spezialfälle wie Expositionen während des Separatorbetriebes erfordern Kurzzeitmessungen.

Zukünftig ist grundsätzlich der Referenzwert von 300 Bq/m³ als Bewertungsmaßstab für Arbeitsplätze heranzuziehen. Der mögliche Zutritt von Radon aus dem Baugrund und die Ausbildung möglicher erhöhter Innenraumaktivitätskonzentrationen in oberflächlichen Anlagen- und Gebäudeteilen von Geothermieranlagen wird durch die bekannten Prozesse kontrolliert. Die eher offene Bauweise der als Wetterschutz gedachten Maschinehallen fördert die Belüftung der Gebäude, ein die Radonmigration initiierender Druckgradient bleibt wenig ausgeprägt. Die baulichen Anforderungen an das Betriebsgelände sehen eine Versiegelung von Oberflächen zum Zwecke der Rückhaltung von Flüssigkeiten vor. Fundamentdurchbrüche wie die Bohrkeller der Förder- und Reinjektsbohrung befinden sich außerhalb der Maschinehallen. Eine Überschreitung des Referenzwertes wird nur in besonderen Fällen erwartet.

Expositionspfad externe Exposition

Die auslösenden Prozesse der Bildung von NORM in der Geothermie sind bekannt. Unsicherheiten existieren bezüglich des Ablagerungsvolumens, das in unbekannter Weise mit Gesamt-Fördervolumen korreliert ist. Insbesondere mit Blick auf ein zu erwartendes Abfallvolumen einer Anlage ist hier ein vertieftes Verständnis erforderlich. Die zeitliche Entwicklung der Dosisleistung am Anlagenteil kann noch nicht abgebildet werden, zumindest ist sie aber nicht abrupt ansteigend und stellt kein unmittelbares Strahlenrisiko dar (plötzliche erhöhte Dosisbeiträge). Der Einsatz von Inhibitoren verhindert bzw. verlagert Ablagerungen, führt aber auch zu einer Verschiebung der Nuklidvektoren (Dominanz von Pb-210) mit nach wie vor anspruchsvollen Beseitigungsanforderungen. Eine kontinuierliche Überwachung der Dosisleistung am Anlagenteil ist gegenwärtig nicht Bestandteil des Betriebsmonitorings, kann aber

- Reinigungsmaßnahmen oder den Austausch von Komponenten frühzeitig rechtfertigen, auch um Strahlenschutzanforderungen oder Transportrichtlinien zu entsprechen,
- Technologiewechsel oder Arbeitsabläufe implizieren, die eine günstigere Entwicklung der Dosisleistung ermöglichen,
- eine beständige und unmittelbare Verfügbarkeit von Informationen zur Dosisleistung für den Betreiber wie auch die Aufsichtsbehörde sicherstellen und
- eine durchgehende Beweissicherung über eine Einhaltung von Strahlenschutzanforderungen ermöglichen.

Die operative Messgröße des Monitoring der Umgebungs-Äquivalentdosis ist $H^*(10)$. Dies setzt uniforme Strahlungsfelder voraus. Tatsächlich treten aber Punktquellen oder Linienquellen auf. Die Beeinflussung der Messung durch benachbarte Quellen (Vorwärmer zu Wärmetauscher) ist gegenwärtig wenig untersucht.

Informationen zu den personenbezogenen Dosen $H_p(10)$ und $H_p(0,07)$ unterliegen dem Datenschutz und sind im Rahmen des Vorhabens nicht verfügbar gemacht worden. Bezüglich der Oberflächen-Personendosis $H_p(0,07)$ sind keine systematischen Erhebungen bekannt, obgleich das Handling kontaminierter Teile wie Filterkörbe zu den Routinearbeiten in den Anlagen gehört.

Bestimmung der Inhalationsdosis

Die Szenarien, die einen möglichen Beitrag der Inhalation beinhalten, sind durch häufige Technologiewechsel gekennzeichnet. So wird zum Beispiel die Reinigung des Wärmetauschers statt mit Hoch-Druckwasserdampf nunmehr auch mittels Sandstrahlung realisiert was der Einhausung und des Arbeitens von Vollschutz bedarf. Filterbauart ebenso wie Frequenz der Reinigung von Filtern wurden als veränderlich bestimmt und tragen zur Unsicherheit der Bestimmung der Inhalationsdosis bei.

Die Annahme einer generellen Staubkonzentration [mg/m^3] am Arbeitsplatz ist problematisch und wird nicht durch Messung gestützt. Grundsätzlich steht eine Ermittlung der Staubkonzentration aus. Abhilfe könnte eine Bewertung nach RiPhyCo schaffen, nach der die Umgangsaktivität ermittelt wird und die unbemerkt inhalierbare / inkorporierbare Aktivität als Faktor berücksichtigt wird. Die gegenwärtige Annahme dass die Aktivitätskonzentration Staub \cong Aktivitätskonzentration Rückstand entspricht, könnte durch Analyse Staub verifiziert werden.

Ein kontinuierliches Air-Sampling mit on-line-Monitoring ist weder stationär noch mobil etabliert obwohl die Kalibrierung entsprechender Air-Sampler zum Zwecke der Erfassung der Gesamt-Alpha / Gesamt-Beta Filteraktivität vergleichsweise einfach ist und eine direkte Proportionalität zwischen Filteraktivität und erfolgter Exposition bzw. Volumenstrom besteht. Nach Korrektur der Filteraktivität um den Beitrag von Radon-FP zum α - und β -Messsignal kann eine direkte Dosisberechnung ggf. mit gemittelt-gewichtetem Dosisfaktor erfolgen.

Die Inhalation kann einen relevanten Pfad beim Umgang mit oder beim Arbeiten in der Nähe von trockenen Rückständen darstellen. Für benässte Rückstände ist dieser vernachlässigbar. Der Einsatz persönlicher Schutzausrüstung (Mundschutz) sichert einen hinreichenden Schutz wobei auch hier die probabilistische Analyse das Versagen des Schutzmechanismus (Nicht-Tragen der Maske) mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit berücksichtigen kann.

8.2 Fazit

Diese Abschätzung der resultierenden Jahresdosen beinhaltet wesentliche Konservativitäten, weisen jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit die Einhaltung der geforderten

6 mSv/a Grenze nach. Dennoch ergibt sich ein eher pessimistisches Bild, wenn man die zu erwartende Umsetzung der neuen EU- Basic Safety Standards zum Strahlenschutz berücksichtigt. Nach diesen werden Arbeiten in Anlagen der Tiefengeothermie als geplante Expositionssituationen klassifiziert was entsprechenden Strahlenschutzmaßnahmen erfordert. Während bislang der Dosisbereich zwischen 1 – 6 mSv/a anzeigefrei blieb (und damit 6 mSv/a die Obergrenze für die Beschäftigten in NORM-Industrien darstellte), muss zukünftig bereits ab dem Überschreiten von 1 mSv/a für Beschäftigte der Strahlenschutz berücksichtigt werden: Für den Fall dass die Expositionen infolge des von Tätigkeiten mit NORM im Bereich 1 mSv a-1 bis \leq 6 mSv a-1 liegen, fordern die EU-BSS zumindest die Expositionen fortlaufend zu überwachen, den Strahlenschutz zu optimieren und die Möglichkeit, dass sich die Dosen aufgrund veränderter Prozesse oder einer veränderten Arbeitsgestaltung erhöhen, zu berücksichtigen.

Die Arbeiten im Vorhaben GeoSys haben untersucht, ob für die relevante Kombination aus Anlagenzustand, Reservoirbeschaffenheit und Rechtsaspekten das Schutzgut „Menschliche Gesundheit“ ausreichend geschützt ist. Davon kann gegenwärtig mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgegangen werden. Die Untersuchungen zeigen aber andererseits, dass das Problem eine genauere Betrachtung erfordert, bevor es als unbedeutend oder relevant einzustufen ist. Insbesondere die Veränderungen im Strahlenschutz gegenüber natürlichen Strahlenquellen auf europäischer Ebene machen in Zukunft eine Neubewertung der Situation erforderlich.

9 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Nachfolgend sind Kurzfassungen der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Vorhabens sowie die wesentlichen Erfahrungen aus den Kompartimenten „Recht“, „Geothermales Reservoir“, „Technische Anlage“ und „Umwelt“ zusammengestellt.

9.1 Kompartiment „Recht“

Im rechtswissenschaftlichen Teil des Forschungsvorhabens wurde untersucht, welche Regelungen es *de lege lata* (nach geltendem Recht) gibt, um Risiken für Mensch und Umwelt auszuschließen bzw. zu minimieren, welche aktuellen parlamentarischen Vorgänge mit Bezug zur Geothermie es gibt und welche rechtlichen Ansätze *de lege ferenda* (nach einer fortzuentwickelnden zukünftigen Rechtslage) erfolgsversprechend erscheinen, um den Ausbau der Tiefengeothermie nachhaltig, umweltfreundlich und ökonomisch zu gestalten.

Auch wenn im Rahmen der durchgeführten Analyse an manchen Stellen Verbesserungsbedarf aufgezeigt wird, stellen die vorhandenen rechtlichen Strukturen, welche die Genehmigung, den Betrieb und die zukünftige Stilllegungs- und Rückbauphase regeln, alles in allem einen ausreichend gefüllten „Werkzeugkasten“ zur Verfügung, um die sich in der Praxis ergebenden Problemsituationen sachgerecht lösen zu können. Dieses Ergebnis bestätigen insbesondere auch die im Rahmen des Vorhabens geführten Gespräche mit Betreibern und Behörden sowie die zur Verfügung stehenden Daten. Es sind keine praktischen Fälle identifiziert worden, in denen sich die ermittelten und untersuchten Prozesse und Wirkfaktoren in erheblicher Weise auf die benannten Schutzgüter ausgewirkt haben und deren Schutz durch die Rechtsordnung als unzureichend bezeichnet werden müsste.

Die Entscheidung, mit welchen Energieträgern und in welcher Energieträgerkombination eine zuverlässige Energieversorgung sichergestellt werden soll, obliegt zuallererst dem Bund und den Ländern. Dies hat jüngst das BVerfG in seiner Entscheidung vom 17.12.2013 (Aktenzeichen 1 BvR 3139/08 und 1 BvR 3386/08) zum Braunkohletagebau Garzweiler II bekräftigt. Allerdings sind (insbesondere bei Großvorhaben) auch die Interessen Betroffener künftig früher und stärker zu berücksichtigen. Das BVerfG unterstrich, dass eine noch stärkere Gesamtabwägung öffentlicher und privater Interessen erfolgen muss.

Die immer wieder geäußerte Erwartung, dass Anlagen der Tiefengeothermie in naher Zukunft, d. h. in den nächsten 10 bis 15 Jahren, einen erheblichen Beitrag zur Stromversorgung aus erneuerbaren Energien beitragen können, ist aus heutiger Sicht nicht absehbar. Dies liegt zum einen an der Leistungsfähigkeit der aktuell in Betrieb befindlicher Anlagen im Vergleich zu konventionellen Großkraftwerken. Anlagen der Tiefengeothermie haben zudem höhere Errichtungskosten und Investitionsrisiken im Vergleich zu anderen Anlagen der Erneuerbaren Energien. Der planerische und regulatorische Aufwand zur Errichtung einer Anlage ist hoch.

Die Planungs- und Bauzeiten von Anlagen der Tiefengeothermie liegen momentan bei bis zu sieben Jahren. Die Gründe hierfür sind vielfältig.

Eine entscheidende Rolle dürfte hierbei die Beschaffung der für eine erfolgreiche Projektplanung und Realisierung notwendigen Informationen spielen. Mit einem Geothermie-Projekt ist eine Vielzahl von Informationsbedürfnissen verknüpft. Zum einen benötigt der Projektträger für eine Wirtschaftlichkeitsprognose und zur Prüfung der Rentabilität bestimmte Daten. Zum anderen benötigen die zuständigen Behörden Daten über konkrete Vorgänge, wie z. B. Bohrungen. Ebenso erwartet zunehmend auch die Öffentlichkeit in den verschiedenen Projektstadien verständlich abgefasste Informationen (Transparenz/Akzeptanz). Der Zugang zu solchen Umwelt- und Geoinformationen erweist sich in der Praxis aber nicht selten als kompliziert. Zwar gewährt beispielsweise das Umweltinformationsgesetz (UIG) einen Anspruch auf Zugang zu Umweltinformationen, ohne ein rechtliches Interesse darlegen zu müssen, allerdings können dem Bekanntgeben Betriebs- oder Geschäftsgeheimnisse entgegenstehen. Informationen über vorangegangene Bergbauaktivitäten können kommerzielle Interessen beinhalten, die nicht ohne weiteres an Dritte weitergegeben werden dürfen. Wenn man jedoch die Investitionen in ein Geothermie-Projekt und insgesamt den Ausbau erneuerbarer Energien fördern möchte, ist es wirtschaftlich geboten, den privaten Unternehmen wie auch der Öffentlichkeit einen größeren Zugang zu den schon existierenden Daten zu ermöglichen.

Die Wahrnehmung und Akzeptanz der Tiefengeothermie in der Bevölkerung ist sehr unterschiedlich. Daher sind auch Fragen der Öffentlichkeitsbeteiligung und des Rechtsschutzes in Umweltangelegenheiten aktuelle Themen, die sich auf die Praxis, sei es aufgrund aktueller Entscheidungen nationaler Gerichte und des EuGH einerseits, sei es anhand bereits vollzogener (UmwRG, VwVfG) oder erwogener Gesetzesänderungen (z. B. zur Änderung der UVP-V Bergbau mit entsprechenden Folgen für

die Pflicht zur Aufstellung eines bergrechtlichen Rahmenbetriebsplans) andererseits, auswirken werden.

Auf der Ebene des Planungsrechts lässt sich der Ausbau der erneuerbaren Energien koordinieren und steuern. So enthalten die verschiedenen Planungsstufen von den Verfahren der Raumordnung, den Landesplanungsgesetzen und Landesentwicklungsprogrammen bis hin zu den Verfahren der Bauleitplanung auf kommunaler Ebene verschiedene Möglichkeiten, den erneuerbaren Energien entsprechende Ansiedlungsfläche zu verschaffen. Doch auch diese Instrumente sind nicht ohne Konfliktpotenzial. So können bei den unterschiedlichen Akteuren auf den Planungsebenen – nicht zuletzt wegen unterschiedlicher politischer Ausrichtungen oder lokaler Befindlichkeiten konkurrierender wirtschaftlicher Bereiche – sehr divergierende Vorstellungen darüber vorhanden sein, wie ein solcher koordinierter Ausbau der erneuerbaren Energien erfolgen soll. Auch lassen sich an vielen Stellen unterschiedliche Einschätzungen bezogen auf die Notwendigkeit einer Ergänzung gesetzlicher Privilegierungstatbestände zugunsten der Anlagen der Tiefengeothermie, z. B. des im Bereich des Bauens im Außenbereich (§ 35 BauGB), erkennen. An den vorgenannten vielfältigen Möglichkeiten des Planungsrechts kann man erkennen, dass das Zusammenspiel der verschiedenen Planungsstufen bedeutsam ist. Fehlen entsprechende Planungselemente auf den vorangegangenen Stufen, bleibt die Standortfrage sehr stark dem Vorhabensträger und der Belegenheitsgemeinde überlassen. Auch wenn man dies vielleicht begrüßt und für sinnvoll erachtet, kann es dann möglicherweise zu gewissen Widersprüchen zwischen (Raum-) Planungsrecht und Bergrecht sowie ggf. wasserwirtschaftlichen Zielen kommen, mit der Folge, dass potentielle Nutzungskonflikte erst (zu) spät thematisiert werden.

Im Bereich der Genehmigungen nach Berg- und Wasserrecht existieren verschiedene (potenzielle) Konfliktfelder. Ausgelöst u. a. durch gerichtliche Entscheidungen zum Braunkohletagebau Garzweiler, aber auch in jüngerer Zeit durch die in Politik und Gesellschaft geführte Diskussion um die Auswirkungen von Anlagen und Verfahren zur Erkundung und Förderung von Erdgas aus nichtkonventionellen Lagerstätten, ist das BBergG in die Kritik geraten. Aus verfahrensrechtlicher Hinsicht werden vielfach mangelnde Transparenz und Defizite bei den Beteiligungsrechten Dritter beklagt. In materiell-rechtlicher Hinsicht wird vor allem das Verhältnis des BBergG zu den Umweltbelangen (insbesondere anhand der Regelungen der §§ 48 Abs. 2, 55 Abs. 1 BBergG) als reformbedürftig angesehen. So haben die damaligen Oppositionsfraktionen im 17. Deutschen Bundestag (Bündnis90/Die Grünen, Die LINKE sowie die SPD), aber

auch bspw. der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), eine Reform des Bergrechts gefordert. Vorbild könnte hierbei u. a. die Reform des Industrieanlagenzulassungsrechts in den 70er Jahren sein, bei der das vormals in der GewO verortete Zulassungsregime in das damals neu erlassene Bundes-Immissionsschutzgesetz überführt wurde, wo es bis heute zu einem modernen Anlagenzulassungs- und Überwachungsrecht ausgeformt wurde. Auch wenn es bisher – von den Auswirkungen der UVP-Richtlinie einmal abgesehen – nur wenige europäische Einflüsse auf das deutsche Bergrecht gegeben hat, könnten sich dennoch auch hier mittelfristig (potenzielle) Konfliktfelder ergeben.

Neben grundsätzlichen Untersuchungen zu den vorgenannten Themenfeldern wurde mit Blick auf die Tiefengeothermie beleuchtet, inwiefern das Bergrecht und das entsprechende technische Regelwerk spezifische Regelungen für den Bereich des Bohrlochbergbaus bieten. Neben den bundesrechtlichen Regelungen wurden auch die Bergbauverordnungen der Bundesländer, insbesondere die Tiefbohrverordnungen (BVOT) untersucht. Dabei wurde anhand konkreter Beispiele auf das Verhältnis von unbestimmten Rechtsbegriffen (z. B. „allgemein anerkannte Regeln der (Sicherheits-) Technik“, „Stand der Technik“) und untergesetzlichen Regelwerken eingegangen. Im Bereich des Wasserrechts wurde unter den verschiedenen wasserrechtlichen Gesichtspunkten ferner der Frage nach dem Schutzbedarf des hochmineralisierten Tiefengrundwassers nachgegangen. Nach Darstellung und Abwägung der verschiedenen vorgetragenen Aspekte wird festgestellt, dass der Grundwasserbegriff des WHG zwar Wasser unabhängig davon erfasst, in welcher Tiefe es sich befindet, dass aber die Frage, ob ein einheitliches Schutzniveau für alle Grundwasserhorizonte zu Grunde gelegt werden muss bzw. ob eine Differenzierung erforderlich oder zulässig ist, dennoch dahingehend beantwortet werden kann, dass es durchaus unterschiedliche wasserrechtliche Anforderungen an den Grundwasserzustand je nach Grundwasserhorizont bzw. -tiefe und mithin Unterschiede bei der Zulässigkeit einer Veränderung der Grundwasserbeschaffenheit gibt. Festzuhalten ist ferner, dass es für den Vorhabens-träger / Betreiber durch mitunter landesgesetzlich unterschiedlich ausgestaltete (wenn auch im Ergebnis häufig ähnliche) Regelungen im Berg- und Wasserrecht und die darin enthaltenen spezifischen Anforderungen komplizierter ist, das gesetzliche Regelwerk zu überblicken.

Im Bereich des Anlagensicherheitsrechts bedeutet die zunehmende Modifizierung nationaler Regelungen durch europäische (Richtlinien-)Vorgaben im Rahmen des sog. „*New Approach*“ u. a., dass das Zusammenspiel von Anlagenbeschaffenheit und -

betrieb (also technische und organisatorische Lösungen) zur Erreichung des gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsniveaus stärker der Eigenverantwortung der Betreiber zugewiesen ist. Generalklauseln ersetzen zunehmend Detailregelungen. Dies bringt dem Betreiber zwar mehr Flexibilität zur Anpassung an seine spezifischen betrieblichen Anforderungen, erfordert aber auch mehr eigenes Know-how zur Beurteilung der Gefahren und der Ableitung von notwendigen Maßnahmen. Dieses Know-how müssen sich insbesondere kleinere Unternehmen häufig durch externe Experten einholen.

Anlagen der Tiefengeothermie werden in Deutschland i. d. R. von kleineren regionalen oder kommunalen Unternehmen betrieben, die selbst selten mehr als eine oder zwei Anlagen dieser Art haben. Damit stellt sich die Frage nach dem systematischen Austausch von Betriebserfahrungen sowie deren Auswertung. Der Know-how-Transfer könnte signifikant dazu beitragen, die Verfügbarkeit der Anlagen durch die Reduzierung von Revisions- bzw. Stillstandszeiten zu verbessern. Ebenso kann durch ein systematisches Vorgehen bei Austausch und Auswertung das Sicherheitsniveau der Anlage ggf. signifikant gesteigert werden. Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse könnten allerdings dazu führen, dass über bestimmte Vorgänge und Probleme sowie deren Lösung nur sehr zurückhaltend kommuniziert wird. In diesem Zusammenhang wurde mit Blick auf die Regelungen in § 74 Abs. 3 BBergG, § 4 Abs. 1 Nr. 6 AtSMV und § 40 KSpG untersucht, inwieweit ein verbindlicher Wissensaustausch über (sicherheits-technisch) bedeutsame Betriebserfahrungen zielführend erscheint, und auf welcher Ebene (legislative oder sonstige Ebene) dieser verortet werden könnte.

Mit Blick auf die naturwissenschaftlich-technische Schwerpunktsetzung lag gerade im Bereich des Strahlenschutzes ein besonderes Augenmerk. Durch die am 06.02.2014 in Kraft getretene neue Richtlinie zu den Strahlenschutzgrundnormen („*Euratom Basic Safety Standards Directive*“) wird eine Fortentwicklung und Neustrukturierung strahlenschutzrechtlicher Regelungen zu natürlichen Strahlenquellen (NORM) stattfinden. So führt die Richtlinie die „*Gewinnung geothermischer Energie*“ in der Liste von Industriezweigen, einschließlich Forschung und relevanter Sekundärprozesse, auf, in denen natürlich vorkommende radioaktive Materialien eingesetzt werden und die bei der Anwendung des Art. 24 der Richtlinie hinsichtlich der abgestuften Vorgehensweise bei der regulatorischen Kontrolle zu berücksichtigen sind. Die Struktur der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), insbesondere die §§ 93 ff. und die Anlagen XI und XII werden dementsprechend angepasst werden müssen. Insgesamt legen die Vorgaben der Grundnormenrichtlinie ein stufenweises regulatorisches Vorgehen nahe, bei dem auf den ersten Stufen vorrangig die Regelungsgedanken der Richtlinie 2013/59/Euratom

übernommen werden und das in den höheren Stufen sehr eng an Teil 3 Kapitel 2 der StrlSchV angelehnt ist. Die Frist zur Umsetzung der Richtlinie zu den Strahlenschutzgrundnormen beträgt vier Jahre. Der Koalitionsvertrag von CDU, CSU und SPD für die 18. Legislaturperiode enthält korrespondierend dazu den Auftrag, den Strahlenschutz zu modernisieren. Es ist hierbei allerdings fraglich, ob die durch die Richtlinie vorgegebene Neustrukturierung lediglich durch Novellen u. a. der StrlSchV erfolgen wird, oder ob für wesentliche Bestimmungen des Strahlenschutzrechts eine neue formell-gesetzliche Grundlage geschaffen wird.

Bei der Errichtung und dem Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie fallen Abfälle unterschiedlicher Art an. Diese lassen sich insbesondere in die folgenden „Abfallgruppen“ aufteilen: Abwässer (Flowback), Ablagerungen (Scale), Reinigungsabfälle, Anlagenteile und Betriebsabfälle (z.B. persönliche Schutzausrüstung und andere Hilfsmittel). Bei der Entsorgung dieser Abfälle sind Aspekte unterschiedlicher Rechtsgebiete, insbesondere des Abfall-, Strahlenschutz-, Berg-, Wasser- und Transport- und Gefahrgutrechts zu berücksichtigen. Diese sind voneinander abzugrenzen, was in der Praxis nicht immer einfach ist. Besonders die strahlenschutzrechtliche Überwachungsbedürftigkeit bei Rückständen und sonstigen Materialien, die Nachweisführung zur Einhaltung des 1 mSv-Kriteriums über alle Expositionspfade (StrlSchV Anl. XII Teil C und D) sowie rechtliche Unklarheiten aufgrund der Tatsache, dass dem Begriff „radioaktiver Stoff“ im Strahlenschutzrecht (StrlSchV) sowie im Transport- und Gefahrgutrecht (GGVSEB und ADR) unterschiedliche Bedeutung zukommt, können in der Praxis mitunter zu Schwierigkeiten (bspw. fehlende Annahmefähigkeit bei Entsorgern) und erhöhtem Zeitaufwand führen.

Auch wenn im Bereich der Tiefengeothermie bislang kein konkretes Schadensereignis bekannt ist, welches Rechtsgüter nachweislich mehr als nur leicht beeinträchtigt hat, stellt sich die Frage, welche Haftungs- und Sanierungsvorschriften es im Falle eines theoretischen Schadensereignisses gibt. Grundsätzlich ist festzustellen, dass die verschiedenen zivilrechtlichen und öffentlich-rechtlichen Anspruchsgrundlagen, deren Tatbestandsvoraussetzungen und die Rechtsfolgen in solchen Fällen komplex und unter anderem aufgrund unterschiedlicher Beweislastverteilungen und mitunter verschiedener Tatbestandsalternativen durch den Gesetzgeber nicht immer klar geregelt sind. Während bspw. für Bergschäden durch die untertägige Aufsuchung und Gewinnung von Bodenschätzen die Bergschadensvermutung nach § 120 BBergG zu Lasten der Bergwerksbetreiber gilt, ist diese Regelung auf Tätigkeiten zur Aufsuchung und Gewinnung von Bodenschätzen mittels Bohrungen bisher jedenfalls nicht explizit an-

wendbar. Auch unterliegen Tiefbohrungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Bodenschätzen (Erdöl, Erdgas und Erdwärme) nicht der auf Grundlage von § 67 Abs. 7 BBergG erlassenen EinwirkungsBergV, welche die Art und Weise der Festlegung des Bereichs bestimmt, in dem durch einen Gewinnungsbetrieb auf die Oberfläche eingewirkt werden kann. Durch die von einigen geforderte Ausdehnung der Bergschadensvermutung auf diese Tätigkeiten würde bei Schäden, die z. B. mit seismischen Ereignissen in Verbindung gebracht werden, eine Beweislastumkehr bewirkt: Der Betreiber müsste zukünftig nachweisen, dass Schäden seinen Aktivitäten nicht zuzurechnen sind.

9.2 Kompartiment „Geothermales Reservoir“

Ökonomisch gesehen geht ein großer Teil der Unsicherheit beim Bau und Betrieb von Anlagen der Tiefengeothermie vom geologischen System aus. Insbesondere in der Erkundungs- und Errichtungsphase einer Geothermieanlage kommt der Beurteilung des Reservoirs eine hohe Bedeutung zu. Unsicherheiten werden durch eine der Bohrung vorangehende seismische Erkundung sowie die Auswertung vorliegender Bohrdaten (z. B. aus der Kohlenwasserstoffindustrie) vermindert. Der Prozess der Erkundung setzt sich während der Bohrung fort und reicht bis zu dem Augenblick, an dem das erste Thermalwasser die oberirdische Anlage erreicht. Bis dahin bilden geologische, geophysikalische und geochemische Analysen (z. B. Bohrkern-Untersuchungen, Bohrloch-Untersuchungen, Ergiebigkeitstests oder Monitoring) ein Grundgerüst an Daten, anhand derer stufenweise über den Fortgang der Arbeiten entschieden wird.

Mit Blick auf die Sicherung und den Erhalt des Leistungsvolumens der Anlage kommt dem anschließenden Reservoir-Management besondere Bedeutung zu. Hieraus erwachsen Anforderungen an die Exploration des Standortes und die technische Auslegung der Anlage. Ziel der Arbeiten im Kompartiment ‚Geothermales Reservoir‘ war die Beurteilung des Standes des Prozessverständnisses wesentlicher physikalischer und chemischer Prozesse im Reservoir selbst, aber auch in den Bohrungen und in der oberirdischen Anlage unter relevanten Temperatur- und Druckbedingungen.

Jedes geothermale Reservoir ist in Bezug auf die geologisch-mineralogische Beschaffenheit, die Permeabilität seiner Gesteine, die Zusammensetzung der Thermalwässer und ihre Gasgehalte sowie die herrschenden Temperaturen und Drucke einmalig. Darum sind allumfassende und allgemeingültige Modelle, die alle diese Eigenschaften

und ihre Änderungen während des Betriebes einer Geothermieanlage in den verschiedenen Geothermieregionen Deutschlands beschreiben könnten, nicht verfügbar und auch nicht einfach zu realisieren.

Die Geothermie-relevanten chemischen, physikalischen, hydraulischen und mechanischen Einzelprozesse und ihre mathematischen Formulierungen werden im Kapitel 4 vorgestellt. Dort wird auch eine Übersicht über gängige Simulationsprogramme gegeben, die diese Prozesse beschreiben. In tabellarischer Form wird dargestellt, welche Programme welche Prozesse besonders gut, weniger gut oder gar nicht beschreiben können. Damit werden die Möglichkeiten und Grenzen der gebräuchlichsten Simulationsprogramme vorgestellt und ihre Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt. Zur Beschreibung aller relevanten Prozesse im komplexen System einer Geothermieanlage müssen heute noch mehrere unterschiedliche Rechenprogramme herangezogen werden. Die Implementierung der besten Modellbeschreibungen und ihre Kopplung in einem allumfassenden Rechencode wäre ein erstrebenswertes Ziel, das auch erreichbar ist, wenn Personal- und Finanzressourcen gezielt gebündelt würden.

Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt auf den besonders relevanten physikalischen und chemisch-hydraulischen Prozessen. Die Ergebnisse der Untersuchungen zu diesen Prozessen werden nachfolgend dargestellt.

9.2.1 Physikalische Prozesse – seismische Ereignisse

Durch die Erschließung geothermaler Lagerstätten und auch durch den Betrieb geothermischer Energiegewinnungsanlagen können seismische Ereignisse in der Lagerstätte ausgelöst werden, die sich bis an die Erdoberfläche fortsetzen. Derartige Mikrobeben werden in den meisten Fällen nicht gespürt und stellen keine unmittelbare, signifikante Gefahr für die Bevölkerung dar. Im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten treten aber auch immer wieder spürbare Beben auf, die in besonderem Maße zu einer deutlichen Abnahme der öffentlichen Akzeptanz derartiger Projekte führen.

Die im Rahmen von Geothermie-Projekten auftretende induzierte Seismizität ist grundsätzlich auf dieselben physikalischen Ursachen wie bei anderen Fluidinjektionen zurückzuführen. Der Hauptmechanismus besteht darin, dass ein zusätzlich aufgebracht Porendruck die Normalspannung und somit die Reibungskräfte auf einer Störung zwischen zwei Gesteinsblöcken reduziert; in deren Folge kann eine plötzliche Scherbewegung entlang dieser Störung auftreten. Beim Betrieb geothermischer Anlagen können

darüber hinaus auch thermo-mechanische Effekte eine Rolle spielen. Induzierte Seismizität ist allerdings nicht auf geothermische Projekte beschränkt, sondern auf vielerlei weitere mögliche Ursachen zurückzuführen, wie z. B.:

- Anlage von Stauseen
- Bergbauarbeiten
- Bau von Verkehrstunneln
- Ausgrabungen
- Öl- / Gasförderung
- Bau von Unterspeichern (Gas, Druckluft)
- Flüssigkeitsverpressungen
- Niederbringung von Mineralwasserbrunnen
- Hydraulische Stimulation von Öl- / Gaslagerstätten

Bei Geothermie-Projekten wird grundsätzlich zwischen zwei unterschiedlichen Phasen differenziert, a) der hydraulisch / chemischen Stimulationsphase und b) der Zirkulations-Phase (dem Dauerbetrieb eines geothermischen Kraftwerkes). Wenn die Durchlässigkeit des Untergrundes nicht ausreicht, um ein geothermisches Kraftwerk wirtschaftlich zu betreiben, wird ein Fluid (i. W. Wasser) unter hohem Druck über ein Bohrloch in den Untergrund verpresst. Durch dieses Verfahren, die „hydraulische Stimulation“, werden neue Risse im Untergrund erzeugt oder bestehende aufgeweitet. Auch während der Zirkulation, also der Entnahme von heißem Wasser aus dem Untergrund über eine Bohrung und der Verbringung des abgekühlten Wassers über eine zweite Bohrung wieder zurück in den Untergrund, kann eine Druckerhöhung im Reservoir auftreten und Erdbeben verursachen. Die Wechselwirkung zwischen Injektion bzw. Druckaufbau und resultierenden seismischen Ereignissen ist aber nicht immer spontan und unmittelbar zuzuordnen. Unter Umständen breitet sich im Rahmen von Injektionsmaßnahmen in den Untergrund verpresstes Wasser dort nur langsam entlang von existierenden Porenräumen und Klüftzonen aus. In einem solchen Fall stellen sich neue Spannungsverhältnisse im Untergrund auch erst langsam ein und seismische Ereignisse können folglich auch mit einer Verzögerung gegenüber der Stimulations- oder Zirkulationsmaßnahme auftreten. Dieser Effekt lässt sich aber numerisch simulieren und muss bei der Festlegung von Abbruchkriterien unbedingt berücksichtigt werden.

Von Betreiberseite wird induzierte Seismizität im Rahmen von Reservoir-Erkundungen gezielt als Indikator dafür verwendet, wie weit im Rahmen einer hydraulischen Stimulation der Prozess einer „Durchlässigkeitsverbesserung“ im tiefen Untergrund reicht. Mit

Hilfe einer räumlichen Darstellung der induzierten Bebenherde ist also eine räumliche Kartierung des künstlich geschaffenen Wärmetauschers möglich.

Injektionsmaßnahmen im Rahmen geothermischer Projekte sind allerdings nicht in der Lage, selbst tektonischen Spannungen im Untergrund aufzubauen, sondern nur vorhandene natürliche Spannungen lokal abzubauen. Das führt zu induzierter Seismizität, die folglich keine größeren Magnituden am betreffenden Standort erreichen kann, als ein natürliches, tektonisches Erdbeben. Allerdings können anthropogen bedingte Maßnahmen zu einer zeitlichen Vorverlagerung eines seismischen Ereignisses führen. Im Einzelfall ist die Vielzahl mikroseismischer Ereignisse im Zuge einer Injektionsmaßnahme auch geeignet, größere natürliche Beben an einem Standort zu verhindern oder zu verringern.

Obwohl die Risiken im Zusammenhang mit induzierter Seismizität bei Geothermie-Projekten relativ niedrig sind, wird im Hinblick auf eine Verbesserung der öffentlichen Akzeptanz empfohlen, bereits im Vorfeld einen Risikominderungsplan zu entwickeln, der die geplanten Operationen selbst sowie potenziell resultierende Belästigungen oder Schäden, die sich aus dem Projekt ergeben könnten, umfasst. In diesem Zusammenhang hat sich das sogenannte "Ampel"-System etabliert.

Das Ampelsystem und die Schwellenwerte, die bestimmte Tätigkeiten beim Betreiber der Geothermieanlage und der überwachenden Behörde auslösen, müssen immer im Voraus und für alle möglichen Vorgänge definiert werden. Maximale Bodengeschwindigkeiten eignen sich gut zur Kontrolle induzierter Seismizität. Die Werte liegen unmittelbar nach dem Ereignis vor und ermöglichen sofortige Maßnahmen, wie z. B. Reduktion oder Unterbrechung von Injektionen. Sie eignen sich hingegen nicht zur Kommunikation in der Öffentlichkeit, da sie keinen direkt sichtbaren Bezug zu feststellbaren Auswirkungen haben. Hierfür eignet sich beispielsweise die Europäische Makroseismische Skala (EMS) mit ihren deskriptiven Definitionen wesentlich besser. Neben einer an EMS-98 orientierten Ampelregelungen sind aber auch andere Grenzwerte für die einzelnen Ampelphasen möglich, z. B. die größte erfasste (vorstellbare) Magnitude an einem Standort als Grenzwert für einen Wechsel von „gelb“ nach „rot“, und eine Magnituden-Größe darunter für den Wechsel von „grün“ zu „gelb“ (weitere Details siehe Schlussbericht).

Zusammenfassend ergibt sich bzgl. induzierter Seismizität (IS) im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten folgender Sachstand:

- IS stellt seitens der Anlagenbetreiber ein essentielles Hilfsmittel zur Identifizierung und Charakterisierung eines geothermalen Reservoirs dar
- Die bislang im Zusammenhang mit Geothermie-Projekten aufgetretene IS hat in der Öffentlichkeit zur Befürchtung unvorhergesehener Schäden an der Erdoberfläche geführt
- IS kann allerdings keine größeren Magnituden an einem Standort bewirken, als sie durch ein natürliches, tektonisches Erdbeben auftreten könnten
- IS kann eine anthropogen bedingte zeitliche Vorverlagerung eines (sonst zu einem späteren Zeitpunkt natürlich auftretenden) seismischen Ereignisses bewirken
- Durch die Vielzahl induzierter (mikroseismischer) Ereignisse und den damit verbundenen Spannungsabbau im Untergrund ist die Verhinderung oder Verringerung größerer natürlicher Beben an einem Standort möglich
- Eine exakte Vorausberechnung der Stärke möglicher seismischer Ereignisse ist nicht möglich, eine Abschätzung des seismischen Risikos kann allerdings mit Hilfe des „Gutenberg-Richter Gesetzes“ vorgenommen werden
- Das Auftreten induzierter seismischer Ereignisse an einem Geothermie-Standort kann durch Vorfestlegung akzeptabler und / oder vorgeschriebener Magnituden-Grenzwerte („Ampelsystem“) räumlich, zeitlich und von der Intensität her eingegrenzt werden.

9.2.2 Chemische Prozesse und reaktiver Stofftransport

Chemische sowie gekoppelte chemisch-hydraulische Prozesse führen zur Verlagerung von Stoffen (reaktiver Stofftransport) in den porösen und geklüfteten Gesteinen eines geothermalen Reservoirs und beeinflussen damit dessen hydraulische Eigenschaften. Weiterhin führen diese Prozesse, die alle mit der Lösungszusammensetzung der Thermalwässer im Reservoir und deren Änderungen im weiten Temperatur- und Druckbereich des geothermalen Systems (bestehend aus Reservoir, Bohrungen und der oberirdischer Anlage) zusammenhängen, zu bedeutenden Veränderungen des Anlagenzustandes (z. B. durch die Bildung von Ablagerungen in den Rohrleitungen

und Korrosion metallischer Komponenten), welche die Wirtschaftlichkeit der Anlage und die Arbeitssicherheit negativ beeinflussen.

Das Verständnis dieser Prozesse sowie die Möglichkeiten und Grenzen ihrer Modellierung waren im GeoSys-Vorhaben Gegenstand vertiefter Untersuchungen. Der Stand des Wissens zu diesem Thema ist im Schlussbericht zusammengefasst und weiter unten in Kurzform wiedergegeben. Belegt werden diese Ausführungen durch Modellrechnungen (s. Anhang des Schlussberichtes), die im Rahmen des Vorhabens durchgeführt wurden. Die zu Beginn des GeoSys-Vorhabens begrenzten Möglichkeiten der Modellierung geochemischer Prozesse wurden durch das zeitgleich durchgeführte, ebenfalls BMWi-finanzierte Forschungsvorhaben GeoDat deutlich verbessert. Diesbezüglich wird daher auch auf den Schlussbericht zum GeoDat-Vorhaben (/GRS 14/) verwiesen.

Die Eigenschaften von Thermalwässern und deren Änderungen durch veränderliche Temperaturen und Drücke können vornehmlich im oberirdischen Anlagenteil analysiert werden. Direkte Messungen im Reservoir und in den Bohrungen sind wesentlich schwieriger und teilweise noch nicht möglich. Sie werden nicht nur durch die schlechtere Zugänglichkeit erschwert, sondern vor allem auch durch fehlende, adäquate Probenahme- und Messtechniken. Unverfälschte Daten aus allen interessierenden Lokationen eines komplexen Geothermiesystems mit seinen sehr unterschiedlichen Temperatur- und Druckbedingungen stellen eine wichtige Basis für ein umfassendes Prozessverständnis dar, sind aber heute noch nicht im erforderlichen Umfang verfügbar.

Abhilfe könnte eine gezielte Verbesserung der Probenahmetechnik und des Betriebsmonitorings schaffen. Unverfälschte Proben könnten dann beispielsweise im Labor zur Aufklärung von Temperatur- und Druckabhängigkeiten der Lösungszusammensetzung analysiert werden. Erste Schritte in diese Richtung stellt das im Januar 2014 angelaufenen Verbund-Forschungsvorhaben ANEMONA mit Zuwendungen des BMWi dar.

Durch eine belastbare Modellierung der im Reservoir ablaufenden chemischen und chemisch-hydraulischen Prozesse können diese verstanden und quantifiziert werden. Das wiederum sind entscheidende Voraussetzungen für eine gezielte Beeinflussung dieser Prozesse hinsichtlich einer Optimierung des Anlagenmanagements. Zurzeit bestehen hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit dieses wichtigen theoretischen

Werkzeugs Einschränkungen, die in den Schlussberichten zu den Vorhaben GeoSys und GeoDat ausführlich dargelegt werden. Die bestehenden Grenzen der Modellierung müssen beachtet werden, um aus Modellrechnungen keine ungerechtfertigten Schlüsse zu ziehen.

Ähnlich stellt sich die Problematik im Bereich der Bohrungen dar. Dort steht das Fluid mit dem Material der Verrohrung in Kontakt. Das metallische Material steht prinzipiell zur chemischen Reduktion von im Fluid gelösten Stoffen zur Verfügung (zum Beispiel Kupfer, Blei, Sulfate) und wird dabei selbst oxidiert (Korrosion). Die Korrosion selbst ist ein in höchstem Maße kinetisch kontrollierter Prozess, dessen Zeitabhängigkeit mit den Mitteln der thermodynamischen Gleichgewichtsmodellierung nicht abgebildet werden kann. Die Gleichgewichtsmodellierung geht vom Prinzip des lokalen Gleichgewichts aus, d. h., dass zu jeder Zeit an jedem Ort ein Zustand thermodynamischen Gleichgewichts herrscht. Dies ist jedoch in den Bohrungen mit hohen Fließgeschwindigkeiten des Thermalwassers nicht der Fall. Es kommt lokal zu starken Übersättigungen, die an anderen, noch nicht ausreichend gut prognostizierbaren Stellen des Systems teilweise oder ganz wieder abgebaut werden.

Zur Kinetik solcher Reaktionen und ihrer Modellierung existieren Publikationen zahlreicher Forschungsinstitutionen. Die Reaktionen sind in der Regel abhängig von den metallischen Stoffen, der Lösungszusammensetzung, der Temperatur und der effektiven Oberfläche. Vor allem die (lokale!) Lösungszusammensetzung und die effektive Oberfläche sind aber a priori nicht für jeden Punkt innerhalb des modellierten Systems bekannt. Verwendbare kinetische Daten sind also, vor allem auch in Abhängigkeit von Temperatur und Druck, heute praktisch nicht verfügbar. Sie müssten durch gezielte experimentelle Arbeiten generiert werden.

Die Situation wird weiterhin dadurch komplizierter, dass eine beobachtete Zeitabhängigkeit von Auflösungs- und Ausfällungsprozessen nicht nur eine Folge der Reaktionskinetik sein muss, sondern auch dadurch entstehen kann, dass es innerhalb des betrachteten Systems Zonen unterschiedlicher hydrodynamischer Durchlässigkeit geben kann. Im einfachsten Fall könnte so ein System als aus zwei unterschiedlichen Poren-Domänen zusammengesetzt angenähert werden (dual porosity). Solch ein Fall könnte zum Beispiel auftreten, wenn es auf der Oberfläche der Verrohrung durch Korrosion zur Ausbildung von Poren kommt. Es ist denkbar, dass die Lösung, die in diesen Poren steht, nur verzögert durch Lösung, die an der Pore vorbei strömt, ausgetauscht wird. Dadurch kann sich lokal, also innerhalb der Pore, ein anderes Milieu (zum Beispiel ein

anderer pH-Wert) einstellen, als in der Lösung innerhalb des durchströmten Rohres. Dies wiederum kann zur Bildung von Korrosionsphasen führen, die, wenn man den pH-Wert über das gesamte Innenvolumen des Rohres "mittelt", eigentlich gar nicht stabil sein dürften. Ein anderer Effekt kann darin bestehen, dass gelöste Stoffe zwischen den beiden Porendomänen durch Diffusion wechseln und dadurch in der Summe ein Transportverhalten zeigen, das fälschlicherweise auf eine etwaige Reaktionskinetik zurückgeführt werden kann. In diesem Fall könnte man also bei der Modellierung des reaktiven Stofftransports das Prinzip des lokalen Gleichgewichts anwenden, müsste aber für das Strömungsregime innerhalb des Rohres ein detaillierteres Modell aufstellen.

Die Vielschichtigkeit dieser Prozesse und die Heterogenität des durchströmten Volumens stehen im Kontrast zu den eingeschränkten Kenntnissen, die man von dem System hat. Diese Kenntnisse stammen letztlich vorrangig aus früher gezogenen Bohrkernen und der zeitabhängigen Zusammensetzung des an die Oberfläche geförderten Fluids. Fügt man bei der Modellierung Zug um Zug einen theoretisch denkbaren Einflussfaktor nach dem anderen hinzu, so gelingt die "Modellierung" des geothermalen Systems eigentlich immer irgendwann. Da die oben diskutierten Einflussfaktoren aber mathematisch nicht klar voneinander zu trennen sind, bedeutet die Modellierbarkeit eines geothermalen Reservoir nicht notwendigerweise, dass man dieses auch "verstanden" hat. Daraus ergibt sich, dass heute verlässliche Prognosen noch nicht möglich sind. Dies ist ein prinzipielles Problem, das mit unserer unvermeidlich eingeschränkten Kenntnis des Systems und mit Messunsicherheiten zusammenhängt.

Dennoch gilt: Wenn man sich dieser Einschränkungen bewusst bleibt, kann der reaktive Stofftransport als Methode zum vertieften Prozessverständnis eines geothermalen Reservoirs inklusive der Bohrungen und der Oberflächenanlage wichtige, praxisrelevante Beiträge liefern. Zum einen kann die Reaktionskinetik die Prinzipien der chemischen Thermodynamik nicht "betrügen": Die Kinetik einer Reaktion hat Einfluss auf das Zeitverhalten eines Systems, aber nicht auf seine Gleichgewichtslage. Reaktionen, die thermodynamisch erlaubt sind, bleiben möglich, auch wenn sie möglicherweise langsamer oder nicht vollständig ablaufen. Darum erlauben Kenntnisse über das Vorhandensein (oder das Nicht-Vorhandensein!) einer festen Phase in einem bestimmten geochemischen Milieu Rückschlüsse auf Zusammensetzung und Porenraum eines durchströmten Mediums.

Zum anderen erlaubt die systematische Variation der Randbedingungen einer Modellrechnung Rückschlüsse auf den wahrscheinlichen Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung eines Reservoirs. Das Vorgehen sollte daher nicht darin bestehen, an den Randbedingungen einer einzelnen Rechnung so lange "zu drehen, bis es passt", sondern anhand einer größeren Anzahl von Modellrechnungen mit stochastisch verteilten Randbedingungen zu einem "wahrscheinlich richtigen" Reservoirmodell zu kommen, das konsistent mit allen bekannten Messdaten ist. Gegenstände solcher Variationsrechnungen sollten neben hydrodynamischen Eigenschaften auch stoffliche Zusammensetzung, Messunsicherheiten und Unsicherheiten in der verwendeten Datenbasis umfassen.

Je mehr Messdaten also vorliegen und je besser die thermodynamische Datenbasis abgesichert ist (durch die fortschreitende Kenntnis des Systemverhaltens des Reservoirs, gewonnen aus mehrjähriger Betriebserfahrung), desto mehr kann ein standortspezifisches Reservoirmodell verfeinert werden.

Zuverlässige Fluiddaten als Voraussetzung für das vertiefte Verständnis der möglichen mineralogischen und hydraulischen Veränderungen im geothermalen Reservoir sowie der Scale-Bildung in geothermischen Anlagen sind durch nichts zu ersetzen. Solche Daten können durch belastbare Fluidmessdaten unter In-situ-Bedingungen und durch korrekte geochemische Modellierung gewonnen werden. Die Analyse vorhandener Daten im Rahmen des GeoSys-Vorhabens haben jedoch gezeigt, dass beide Voraussetzungen heute nicht, oder nur sehr unvollständig, erfüllt sind.

Für die Gewinnung belastbarer Fluiddaten ist die genaue Kenntnis der Zusammenhänge zwischen der chemischen Zusammensetzung der Lösungen (Gasgehalte, Haupt- und Spurenelemente und Radionuklide) und den Temperatur- und Druckbedingungen erforderlich. Neben solchen Wissenslücken ist ein weiterer gravierender Grund für fehlende belastbare Fluiddaten die fehlende Technik zur Gewinnung von Fluidproben und die Messung deren relevanter Parameter (insb. Eh und pH) unter In-situ-Bedingungen. Diese Defizite haben sich im Laufe der Arbeiten im GeoSys-Vorhaben schon früh offenbart, nachdem vorhandene Daten gesichtet wurden und der Stand der geochemischen Modellierung festgestellt worden war. Diese Erkenntnisse haben dazu geführt, dass notwendige technische und wissenschaftliche Arbeiten definiert wurden, die zur Verbesserung dieser Sachlage beitragen können. Die Erkenntnis der Notwendigkeit, solche Arbeiten durchzuführen, hat sich sowohl bei Geothermiebetreibern, Forschungseinrichtungen und den involvierten Bundesministerien gefestigt.

9.3 Kompartiment „Technische Anlage“

Geothermische Kraftwerke zur Stromerzeugung basieren derzeit in Deutschland auf der Kalina- und ORC-Bauart; sie sind zum Teil mit einem Fernwärmekreislauf gekoppelt und aufgrund der unterschiedlichen Standortgegebenheiten sehr unterschiedlich aufgebaut.

Basierend auf den Eigenschaften des geothermalen Reservoirs hinsichtlich Temperatur und Salinität, ebenso wie der geplanten Verwendung (Stromerzeugung und / oder Fernwärmebereitstellung) resultieren unterschiedliche Anforderungen an die Auslegung der Anlagen. Bei hochkorrosivem Thermalwasser ergeben sich hohe Werkstoffanforderungen an die Materialien des Primärkreislaufs, bei Kalina-Anlagen ebenso im Sekundärkreislauf aufgrund der Verwendung von Ammoniak. Aufgrund dieser Anforderungen an die Werkstoffe resultiert dann u. U. die Verwendung von hochlegierten Edelstählen oder Titanlegierungen.

Über die bestehenden Anforderungen hinsichtlich Korrosionsbeständigkeit der eingesetzten Werkstoffe hinaus ergeben sich spezielle Anforderungen hinsichtlich der Abrasionsbeständigkeit im Primärkreislauf. Dies betrifft insbesondere die Förderpumpen (Laufräder und Lager). Bei Tauchpumpen gibt es darüber hinaus auch noch Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit der Kabelisolierungen. Allgemein ergeben sich durch die Kombination aus hohen Temperaturen und korrosiven Medien auch Anforderungen an nichtmetallische Werkstoffe, wie z. B. Dichtungen in den Pumpen oder Wärmeüberträgern. Die verwendeten Dichtungswerkstoffe müssen auf die thermischen und chemischen Belastungen hin angepasst sein.

Geothermische Anlagen wirken im Normalbetrieb und bei Störfällen in verschiedener Weise auf ihre Umgebung ein. Wesentliche Wirkfaktoren, die sich aus dem Betrieb der Anlage ergeben können (aber nicht zwangsläufig müssen), sind:

- Potenzielle stoffliche Emissionen in verschiedene Bereiche der Umwelt (Reservoir, Boden, Grundwasser, Luft): Betriebliche Freisetzungen von Schmier- und sonstigen Betriebsmitteln (z. B. Inhibitoren); betriebliche Freisetzungen des Arbeitsmediums (Organische Verbindungen bei ORC-Anlagen oder Ammoniak bei Kalina-Anlagen); Abgabe radioaktiver Stoffe: Betriebliche Freisetzungen von NORM-Stoffen (Radon, NORM mit Thermalwasser); Betriebliche Freisetzungen von Dampf

- Akkumulation von NORM: Scale-Bildung in Anlagenteilen, verbunden mit erhöhter Strahlenexposition
- Schallemissionen
- Anfall von Rest- und Abfallstoffen: Schwermetalle und NORM-Stoffe in den Filtern (Entsorgung?)
- Verlust von Wasserfunktionen: Entnahme von Grund- oder Oberflächenwasser zur Kühlung

Die Wirkfaktoren bei Störfällen sind prinzipiell die Gleichen wie beim Normalbetrieb, das Ausmaß kann jedoch größer sein. Lärmemissionen und die Entnahme von Wasser aus der Umgebung spielen im Störfall keine übergeordnete Rolle. Dem Wirkfaktor „Stoffliche Emission in die Luft“ kommt im Störfall mit Brand, eventuell auftretenden Brandgasen und Ruß besondere Bedeutung zu.

Die möglichen Auswirkungen der Wirkfaktoren aus Normalbetrieb und Störfällen auf die Umgebung sind abhängig von der Menge der freigesetzten Stoffe und deren Gefährlichkeit. Betriebliche Freisetzungen von Betriebsmitteln oder Arbeitsmedien lassen sich nicht vollständig vermeiden. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen müssen im Einzelfall betrachtet werden. Die vorhandenen bzw. eingesetzten Stoffe, ihre Gefährlichkeit, die Stoffmenge und die Umsetzung konkreter Maßnahmen zur Einhaltung gesetzlicher Grenzwerte bei der Freisetzung sind entscheidend für die Genehmigungsbedürftigkeit, Genehmigungsfähigkeit und Überwachungsbedürftigkeit (z. B. gemäß der Betriebssicherheitsverordnung) der Anlage. Im Normalbetrieb sind die Mengen somit reglementiert. Für Störfälle (z. B. Bersten einer Leitung mit Arbeitsmedium), bei denen es zu (unkontrollierten) größeren Freisetzungen kommen kann, ist der Betreiber ebenfalls zur Schadensvorsorge durch technische wie auch organisatorische Maßnahmen verpflichtet. Insgesamt unterliegt der Anlagenbetrieb der behördlichen Aufsicht.

Maßnahmen zur Verhinderung größerer Freisetzungen in die Umwelt (z. B. Gaswarngeräte, Versiegelung der Anlagenfläche, Druckabsicherung mit Abblasen in Auffangbehälter etc.) oder zur Begrenzung der Auswirkungen auf die Umgebung sind von Anlage zu Anlage unterschiedlich und können in ihrer Wirksamkeit nur anlagenspezifisch bewertet werden. Die Versiegelung des Anlagengeländes und die Ableitung anfallender Thermalwassermengen beim Öffnen der Anlage in die Auffangbecken dienen der Vermeidung des Eintrags gefährlicher Stoffe in die Umgebung.

9.4 Kompartiment „Umwelt 1“ (oberirdischer Anlagenbereich)

Das Kompartiment Umwelt ist zur besseren Differenzierung der betrachteten Auswirkungen in zwei Teile untergliedert. Der Untersuchungsraum des Kompartimentes Umwelt 1 berücksichtigt den oberirdischen Anlagenteil. Als Betrachtungsraum ist der Umweltbereich oberhalb der Geländeoberkante definiert, der die Tier- und Pflanzenwelt beinhaltet und als Aufenthaltsraum des Menschen fungiert. Die unterirdischen Auswirkungen des Anlagenbetriebes werden in Kapitel 9.5 behandelt.

9.4.1 Konkrete Fragestellungen NORM & Geothermie

Die Errichtung und nachfolgend der Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie kann in Einzelfällen über den Wirkfaktor „Akkumulation natürlicher Radionuklide“ und „Freisetzung natürlicher Radionuklide“ zu einer aus Sicht des Strahlenschutzes zu bewertenden Auswirkung auf das Schutzgut „Menschliche Gesundheit“ führen. Es war zu prüfen, ob durch Arbeiten mit beim Betrieb der Anlage anfallenden Scale-Ablagerungen oder durch Ausübung von Arbeiten, bei denen diese Materialien anfallen, die Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung erheblich erhöht wird und Strahlenschutzmassnahmen angezeigt sind. Gleichzeitig ist für eine geordnete Beseitigung oder Wiederverwertung von Rückständen, die aus dem Betrieb der Anlage resultieren, zu sorgen; diese dürfen auch bei Entfernung der Stoffe vom Anlagengelände nicht zu einer unzulässigen Erhöhung der Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung führen.

In einem ersten Schritt der Arbeiten wurde der Einfluss der Lagerstättegeologie des geothermalen **Reservoirs** auf die Bildung radioaktiver Kontaminationen in oberirdischen Anlagenteilen bewertet. Grundsätzliche Prozesse der Anreicherung wurden beschrieben und Sachverhalte wie Messdaten und technische Randbedingungen im GeoSys-Infopool erfasst. Aus diesem Schritt resultierte eine Konzentration auf die Gebiete „Oberrheingraben“ und „Norddeutsches Becken“, da dort die Radionuklidkonzentrationen in tiefen Wässern deutlich erhöht sind.

Für die **Technische Anlage** selbst konnten Informationen zum Einfluss der Förder-technik auf die Bildung radioaktiver Kontaminationen im oberirdischen Anlagenteil zusammengestellt werden. Von Betreibern gelieferte Daten haben es gestattet, in typischen Betriebsabläufen Expositionspfade zu identifizieren und anlagenspezifisch Expositionsszenarien abzuleiten.

Für Beschäftigte und Einzelpersonen der Bevölkerung stellt die Anlage selbst einen Bestandteil der **Umwelt** dar: Über die Akkumulation von NORM kann es zu einer Strahlenexposition von Beschäftigten am Arbeitsplatz kommen, während Ableitungen natürlicher radioaktiver Stoffe oder die Beseitigung / Verwertung von Rückständen in einer Strahlenexposition der Bevölkerung resultieren. Diesbezüglich wurden die Bildungsprozesse radioaktiver Kontaminationen (Fällungsprozesse / Chemismus der Ablagerungen) betrachtet und wesentliche Eingangsdaten einer Dosisabschätzung wie Nuklidvektoren der Kontaminationen, Aktivitätskonzentrationen von Kontaminationen, Ortsdosisleistungen, Oberflächenkontaminationen sowie Radon in Betriebsstätten und Freisetzung in die Umgebung zusammengetragen und geprüft.

Neben einer möglichst umfangreichen Erfassung und Sichtung der aktuell verfügbaren Daten waren nachstehende zentrale Fragen im Vorhaben zu beantworten:

- Mit welcher resultierenden Unsicherheit kann ein Bearbeiter sagen, dass die Strahlenbelastung unterhalb (oberhalb) eines Dosisricht- oder Grenzwertes liegt?
- Welche unsicheren Parameter tragen zur Wahrscheinlichkeitsverteilung der Gesamtdosis infolge aller Arbeiten besonders bei?

Dosisabschätzungen erfolgen für Anlagen der Tiefengeothermie deterministisch, d. h. für einzelne Pfade verschiedenster Szenarien werden Dosen abgeschätzt und zu einer Gesamtdosis addiert. Die Annahmen werden konservativ gehalten und müssen damit nicht unbedingt realistische Expositionspfade und Expositionsannahmen darstellen. Nachteilig ist, dass bei wesentlichen Änderungen im Betriebsregime (Technische Modifikationen, geänderte Handlungsabläufe) eine Neubewertung erforderlich ist. Die deterministische Annahme von Fallunterscheidungen, Ausfällen oder Schäden führt gleichzeitig zu einer ungeordneten und unübersichtlichen Szenariensammlung. Gleichzeitig muss klar sein, dass eine deterministische Abschätzung unter Verwendung typischer gemittelter Parameterwerte nur unwahrscheinlich zu einer mittleren Dosis als Ergebnis führt.

Im GeoSys-Vorhaben wurde exemplarisch ein probabilistischer Ansatz zu Beantwortung obiger Fragen verfolgt. Es ergeben sich nachstehende Vorteile:

- Unsicherheiten, z. B. zu ermittelnde Aktivitätskonzentrationen oder Dosisleistungen in der Anlage, können direkt benannt ODER in separaten Unterprogrammen berechnet werden
- Die Behandlung von Unsicherheiten ist bzgl. einzelner Parameter (nachfolgend „unscharfe Parameter“ genannt) mittels Monte-Carlo-Simulation möglich, wobei das Verteilungsmuster einer Datenmenge (normal, gleich, log-verteilt) berücksichtigt werden kann und Konservativitäten beschränkt werden
- Erfahrungen aus statistischen Reihenuntersuchungen können „verarbeitet“ werden

Es wurde eine probabilistische Ereignisablaufanalyse mit Hilfe der Ereignisbaum-Technik durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde das im Rahmen der US-Studie NUREG-1150 entwickelte Rechenprogramm EVNTRE eingesetzt. Das Ziel einer Ereignisbaumanalyse besteht im Allgemeinen darin, die Wahrscheinlichkeit für bestimmte unerwünschte Ereignisse zu ermitteln und festzustellen, welche Phänomene besonders zu den unerwünschten Ereignissen beitragen. Die hier verwendete Ereignisbaumtechnik ist besonders flexibel. Der Nutzer hat vielfältige Möglichkeiten zum Aufbau des Baumes, zur Berechnung der Zweigwahrscheinlichkeiten, sowie zur Auswertung. Von besonderem Nutzen ist die Möglichkeit, beliebige frei programmierbare Unterprogramme zu erstellen, mit denen im vorliegenden Fall pfadspezifische Expositionen berechnet werden konnten.

Der in einer ersten vorläufigen Form aufgesetzte Ereignisbaum führte bei Einsetzen von Punktdaten, die als Grundlage einer realen deterministischen Dosisabschätzung bekannt waren, zu vergleichbaren Ergebnissen. Der Ereignisbaum ist somit geeignet, das System „geothermale Energieerzeugung“ im Sinne einer Expositionsabschätzung zuverlässig abzubilden. Gleichzeitig zeigte sich, dass sowohl durch die Angabe von Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Überschreiten von Dosissschwellen als auch aus der Sensitivitätsanalyse der unscharfen Parameter über deterministische Betrachtungen hinausgehende Rückschlüsse gezogen werden konnten.

In einem zweiten Bearbeitungsschritt konzentrierten sich die Arbeiten auf unscharfe Parameter, die nicht über den gesamten Bereich variiert werden dürfen, da sie

- untereinander in Beziehung stehen,
- in bislang unbekannter Beziehung zueinander stehen, beziehungsweise

- deren Unschärfe aus einem nicht erlaubten Pooling, wie der Summierung von Daten verschiedener Anlagen aus verschiedenen Geothermie-Provinzen resultiert.

Die Version 2 des Ereignisbaumes berücksichtigt stärker das Verteilungsmuster von Datenmengen und trägt den Nuklidvektoren anlagenteilspezifischer Rückstände Rechnung. Mit Punkt-Eingangsdaten einer deterministischen Abschätzung wurden wiederum vergleichbare Ergebnisse erzielt. Darüber hinaus konnte die in der Gesamtmenge an Daten enthaltene Varianz von Messwerten genutzt werden, die Überschreitungswahrscheinlichkeit für eine Jahresdosis $> 6 \text{ mSv a}^{-1}$ zu bestimmen. Einzelne unscharfe Parameter wurden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse als besonders wirksam in Bezug auf die Unsicherheit des Gesamtergebnisses identifiziert.

9.4.1.1 Umsetzung rechtlicher Vorgaben

Teil 3 der deutschen Strahlenschutzverordnung berücksichtigt eine erheblich erhöhte Exposition durch natürliche Strahlenquellen und regelt das Ergreifen von Strahlenschutzmaßnahmen für den Fall, dass die Exposition von Arbeitskräften oder Einzelpersonen der Bevölkerung nicht außer Acht gelassen werden kann.

Die Regelungen besitzen allerdings nicht die gleiche Regelungsbreite und -tiefe wie die Bestimmungen in den anderen Teilen der Verordnung, da vor allem die Einwirkungsmöglichkeiten auf natürlicherweise vorhandene radioaktive Quellen zwangsläufig erheblich geringer als die auf künstliche radioaktive Quellen sind. In Abgrenzung zu „Tätigkeiten“, bei denen Materialien aufgrund ihrer radioaktiven Eigenschaften (radioaktive Quellen, Kernbrennstoff) genutzt werden, werden Handlungen, die - ohne Tätigkeit zu sein - bei natürlich vorkommender Radioaktivität die Strahlenexposition oder Kontamination erhöhen können, als „Arbeiten“ bezeichnet.

In Form von „Positivlisten“ werden in den Anlagen XI und XII der StrSchV Arbeitsfelder, bei denen erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können, sowie überwachungsbedürftige **Rückstände** ausgewiesen. Die Überwachungsgrenzen und die Verwertungs- oder Beseitigungsoptionen sind für Rückstände je nach Höhe der Aktivitätskonzentration geregelt und sichern die Einhaltung des in § 97 festgeschriebenen Dosisgrenzwertes von 1 mSv a^{-1} für Einzelpersonen der Bevölkerung. Werden die Werte der spezifischen Aktivität für den jeweiligen

Entsorgungs- oder Verwertungsweg überschritten, sind entweder andere Optionen der Entsorgung bzw. Verwertung mit höheren Überwachungsgrenzen zu wählen oder es ist über eine Expositionsrechnung der Nachweis zu erbringen, dass das Dosislimit von 1 mSv a^{-1} sowohl für den nicht beruflich strahlenexponierten Arbeiter als auch für eine Person der lokalen Bevölkerung sicher eingehalten wird. Eine Verdünnung zum Erreichen bzw. Unterschreiten von Überwachungsgrenzen ist jedoch ausdrücklich nicht gestattet (§ 102 in entsprechender Anwendung von § 97 Abs. 2 StrlSchV). Zum Erreichen bestimmter für die Beseitigung erforderlicher Eigenschaften wie z. B. das Eluatverhalten kann eine Vorbehandlung des Materials wie Immobilisierung erforderlich sein.

Die Strahlenschutzverordnung berücksichtigt die Tiefengeothermie nicht explizit als **Arbeitsfeld**, bei dem erheblich erhöhte Expositionen durch natürliche terrestrische Strahlungsquellen auftreten können, und die bei der Erdwärmegewinnung anfallenden Rückstände (Anlagen XI und XII der StrlSchV). Infolgedessen finden die §§ 93 ff. StrlSchV vom Wortlaut her keine unmittelbare Anwendung. Es ist aber gängige Praxis der zuständigen Behörden, die Regelungen der StrlSchV durch Nutzung der Auffangtatbestände in §§ 96 Abs. 5 und § 102 StrlSchV auch auf die Tiefengeothermie anzuwenden. Für den Verdachtsfall beträchtlicher Strahlenexpositionen in nicht explizit genannten Arbeitsfeldern oder bei Arbeiten mit nicht genannten Rückständen können entsprechende Anordnungen getroffen werden.

9.4.1.2 Dosisabschätzungen

Um aus der Pflicht einer dauerhaften Dosisüberwachung und Anzeigepflicht entlassen zu werden, muss der Nachweis der Einhaltung des arbeitsplatzbezogenen Dosisgrenzwertes von 6 mSv a^{-1} geführt werden. Für gewählte Beseitigungs- und Verwertungsoptionen zur Abgabe von Rückständen kann eine Entlassung aus der Überwachung bei Unterschreiten einer effektiven Jahresdosis von Einzelpersonen der Bevölkerung von 1 mSv a^{-1} erreicht werden. Sowohl die Abschätzung der arbeitsplatzbezogenen Dosis als auch der Nachweis des erforderlichen Schutzes der Bevölkerung vor Strahlenexpositionen bei Beseitigung bzw. Verwertung von Rückständen erfordern die Annahme realistischer Expositionspfade und Expositionsannahmen.

Für die Expositionsrechnung im Zusammenhang mit Dosisabschätzung am Arbeitsplatz oder der Entlassung von NORM-Rückständen aus der Überwachung gibt es ge-

gegenwärtig keine autorisierten Berechnungsgrundlagen, diese befinden sich in Vorbereitung. Die gebräuchlichen Berechnungsmethoden orientieren sich gegenwärtig primär an der autorisierten Berechnungsgrundlage Bergbau (BGIB). Es liegt im Ermessen der zuständigen Strahlenschutzbehörde, ob die vom Antragsteller vorgelegte Expositions-berechnung anerkannt wird oder nicht.

Basierend auf Empfehlungen des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) und umfassenden Praxiserfahrungen zahlreicher Bearbeiter kann eine vereinfachte Expositionsabschätzung vorgenommen werden, welche die relevanten Pfade, abweichende Expositionsszenarien und expositionsrelevante Randbedingungen hinreichend berücksichtigt. Die praktischen Erfahrungen zeigen eindeutig die Tendenz, dass die angewandten Methoden (Anlehnung an die BGIB) behördlich akzeptiert werden.

Aufgrund der Bedeutung standort- und anlagenspezifischer Eigenschaften jeder einzelnen ober- und untertägigen Installation kann eine radiologische Bewertung über gesamte Geothermie-Provinzen nicht empfohlen werden. Vielmehr sind Einzelfallbetrachtungen erforderlich, die den jeweiligen Expositionsszenarien und den Quellen ionisierender Strahlung Rechnung tragen. Seitens eines Betreibers zur Verfügung gestellte Informationen über Betriebsabläufe zeigen, dass sehr komplexe und kleinräumige Szenarien (Filterwechsel, Reinigung WT, Öffnen von Anlagenteilen) betrachtet werden müssen und wesentliche Änderungen im Betriebsregime (technische Modifikationen, geänderte Handlungsabläufe) nicht ungewöhnlich sind.

Die probabilistische Abschätzung resultierender Jahresdosen für Beschäftigte in Anlagen der Tiefengeothermie (gepoolte Daten) zeigt, dass die Dosis mit hoher Wahrscheinlichkeit unter 6 mSv a^{-1} bleibt. Detailliertere Betrachtungen einer einzelnen Anlage legen den Schluss nahe, dass die Wahrscheinlichkeit für ein Überschreiten dieses Dosiskriteriums bei nur etwa 2 % liegt. Dosisabschätzungen für Einzelpersonen der Bevölkerung infolge der Beseitigung oder Verwertung von Rückständen aus dem Betrieb von Geothermieranlagen waren nicht Gegenstand der probabilistischen Analysen. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand werden verschiedene Beseitigungs- und Verwertungsoptionen wahrgenommen. Probleme existieren bezüglich der Beseitigung brennbarer Rückstände wie Filtermaterialien, für die der Nachweis der Einhaltung des 1-mSv -Kriteriums bei Verbrennung aufwändig ist und noch nicht geführt wurde. Die Beseitigung von Rückständen zur Deponierung bedarf aufgrund des Überschreitens von Eluatwerten der Immobilisierung, die in Einzelfällen auch dann nicht die geforderten Eluatwerte für nicht-radioaktive Elemente erbringt. Grundsätzlich besteht vermehrt das

Problem der Annahme der nach Klasse 7 ADR als radioaktive Stoffe angelieferten Rückstände aus NORM-Industrien bei Ankunft an der Deponie, was nach Planfeststellungsbeschluss i. d. R. nicht gestattet ist.

Die Sensitivitätsanalysen für unscharfe Parameter der probabilistischen Untersuchungen geben Hinweise auf Parameter, die aufgrund großer Unsicherheiten große Unsicherheiten des Gesamtergebnisses auslösen. Untersuchungsbedarf wird gegenwärtig mit Blick auf die Radon-Exposition von Beschäftigten bei Aufenthalt in Dampfwolken bei Separatorbetrieb gesehen, da die Datenlage zur Aktivitätskonzentration unzureichend ist und Eingabedaten zum Gleichgewichtsfaktor (Verhältnis von Radon-Folgeprodukten) nur auf Annahmen beruhen. Gegenwärtig liegen keine Angaben zur zeitlichen Entwicklung der Dosisleistung an Anlagenteilen und zur Entwicklung der Dosisleistung nach erfolgter Reinigung vor, so dass auch hier der Bedarf für weitergehende Untersuchungen festgestellt werden muss.

Für die Expositionsermittlung sind die stofflichen, insbesondere die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Rückstände von prioritärer Bedeutung. Diese wiederum werden entscheidend durch die Bildungsprozesse der Rückstände kontrolliert. Sowohl die Sensitivitätsanalysen unscharfer Parameter der probabilistischen Untersuchung als auch die grundsätzlichen Erfahrungen der GRS bezüglich charakteristischer Rückstandsparameter von NORM, abweichender Szenarien des Umgangs mit NORM und divergierender Freisetzungsprozesse der Radionuklide lassen anraten, folgende Parameter im Zusammenhang mit einer Bewertung der Arbeiten mit NORM in Anlagen der geothermalen Energieerzeugung vertiefender zu untersuchen:

- Nuklidvektoren (Bauteil-spezifisch)
- Tätigkeitsspezifische Staubkonzentrationen
- Aktivitätskonzentration der Staubfraktionen
- Radon-Emanationsrate, Diffusionskoeffizient für Radon im Material
- Gleichgewichtsfaktor Radon / Radon-Folgeprodukte

Darüber hinaus sind für eine Reduzierung der Unsicherheit einer probabilistischen Dosisabschätzung die Kenntnisse bzgl. Scale-Bildung als Funktion von Zeit und Fördervolumen zu verbessern:

9.4.1.3 Vergleich zu anderen Industriezweigen

In weiteren der Energieerzeugung zuzuordnenden Industriezweigen kommt es im Zusammenhang mit der Förderung mineralisierter, Radium-reicher Solen zu einer Akkumulation von NORM in Betriebsanlagen und der Umwelt:

Im Mittel fallen in der deutschen Erdöl- bzw. Erdgasindustrie jährlich 130 Tonnen radioaktiv kontaminierte Produktionsrückstände (Schlämme und Scale) sowie 218 Tonnen radioaktiv kontaminierter Stahlschrott an. Nach Trennung vom Stahl verbleiben durchschnittlich 150 Tonnen pro Jahr, die als schwach radioaktive Stoffe zu entsorgen sind. Dies entspricht 0,3 % der in Deutschland anfallenden NORM-Rückstände von insgesamt 100.000 t mit erhöhten Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide. Die spezifische Aktivität von Produktionsrückstände der Erdöl- / Erdgasindustrie beträgt durchschnittlich ca. 20 Bq g^{-1} , wobei ein Wertebereich zwischen weniger als 5 Bq g^{-1} und in seltenen Einzelfällen bis zu 1.000 Bq g^{-1} abgedeckt wird. (Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V.)

Im Rahmen der Wasserhaltung einiger Steinkohlebergwerke bzw. -provinzen werden Grubenwässer gefördert, die sowohl innerhalb der Prozessleitungen als auch bei Mischung mit Oberflächenwässern zu Radium-reichen Ablagerungen führen. Eine Abschätzung der bislang angefallenen Rückstandsmengen, wie der Menge an Flusssedimenten mit erhöhter natürlicher Radioaktivität, deren Kontamination auf Ableitungen ungereinigter bzw. teilgereinigter Abwässer des Steinkohlebergbaus zurückzuführen ist, gestaltet sich aufgrund der diffusen Ableitung in die Umwelt schwierig. Unter Berücksichtigung der abgegebenen Menge allein höher mineralisierter Grubenwässer muss mit Gesamtaktivitäten von einigen 100 GBq a^{-1} gerechnet werden. Während in der Vergangenheit die Ableitung der Wässer über die Vorflut erfolgte, werden heute untertägige effektive Wasserbehandlungsanlagen mit einer technisch gesteuerten Fällung des Radiums unter Zugabe von Bariumchlorid und Sulfat installiert. Die resultierenden NORM-Rückstände verbleiben nach Bergrecht im Bereich des Bergwerkes.

Für beide Industriezweige ist charakteristisch, dass die Förderung von mineralisierten Wässern als offene Systeme realisiert ist und damit Aktivitäten im Rahmen der gestatteten Ableitungen an die Umwelt abgegeben werden. Im Vergleich dazu beruht das technische Konzept einer Geothermieranlage auf einem geschlossenen System, was

zumindest keinen wesentlichen Umgang oder eine Abgabe von gefördertem Wasser vorsieht.

Die derzeit geschätzten Mengen anfallender radioaktiver Rückstände aus Anlagen der Tiefengeothermie liegen bei 5 – 6 Tonnen pro Jahr. Unter Berücksichtigung einer Steigerung der Energieerzeugung durch Nutzung geothermaler Energie und einen Ausbau des Sektors auf eine Stromerzeugungsmenge von etwa 1.500 GWh im Jahr 2020 werden Jahresmengen von einigen 100 Tonnen an NORM-Rückständen abgeschätzt. Diese Abschätzung berücksichtigt allerdings weder die Erschließung petrothermaler Systeme noch den zunehmenden Einsatz von Inhibitoren zur Vermeidung von Ablagerungen in der Anlage.

9.4.1.4 Umsetzung der neuen EU-Richtlinie 2013/59/EURATOM

Neben einer expliziten Nennung der geothermalen Energieerzeugung als Industriezweig, in dem mit NORM umgegangen wird, ist nach der EU-Richtlinie zur Festlegung grundlegender Sicherheitsnormen für den Schutz vor den Gefahren einer Exposition gegenüber ionisierender Strahlung (RL 2013/59/EURATOM) ein grundsätzlicher Handlungs- und Prüfungsbedarf absehbar.

Ebenso wie die Basic Safety Standards der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) übernehmen die neuen BSS der EU die ausgeführten Grundprinzipien des Strahlenschutzes sowie das System der situationsbedingten Anforderungen an den Strahlenschutz mit geplanten, existierenden und Notfall-Situationen. Der Schutz von Beschäftigten und Personen der Bevölkerung vor ionisierender Strahlung infolge eines Umgangs mit NORM wird nicht mehr wie bislang in einem separaten Teil (Teil 3 BSS 96/29 EURATOM) (EU-BSS 1996) geregelt, sondern vollständig in das Gesamtsystem des Strahlenschutzes integriert.

Tätigkeiten und Arbeiten in Anlagen der geothermalen Energiegewinnung werden im internationalen Kontext als „Geplante Situationen“ eingeordnet. Als Folge greifen Dosisgrenzwerte für Beschäftigte und Dosisrichtwerte für die Bevölkerung.

Aufgrund der Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen mit deutlich über 1 Bq g^{-1} bedarf der Umgang mit NORM Rückständen der Geothermie besonderer Beachtung. Wie in Artikel 25b (1) und Artikel 25c der neuen EU-BSS ausgeführt, bedarf der Umgang mit Materialien mit Aktivitätskonzentra-

tionen oberhalb der Grenzen von 1 Bq g^{-1} (Radionuklide der U-238- und Th-232-Zerfallsreihe beziehungsweise oberhalb von 10 Bq g^{-1} (K-40) der behördlichen Anmeldung.

Für den Fall, dass die Expositionen infolge des von Tätigkeiten mit NORM im Bereich 1 mSv a^{-1} bis $\leq 6 \text{ mSv a}^{-1}$ liegen, fordern die EU-BSS zumindest, die Expositionen fortlaufend zu überwachen (Artikel 33.,2). Für Jahresdosen $> 1 \text{ mSv a}^{-1}$ sind entsprechend der Art der Einrichtung und der Strahlenquellen angepasste Strahlenschutzvorkehrungen zu treffen. Eine Genehmigungspflicht gegenüber der Behörde besteht nach Auffassung der neuen EU-BSS bei Überschreitung eines möglichen jährlichen Dosisbetrages von $> 6 \text{ mSv a}^{-1}$. Arbeitsplätze mit effektiven Jahresdosen $> 1 \text{ mSv a}^{-1}$ werden zukünftig als geplante Expositionssituationen betrachtet. In Folge der Überschreitung sind die in Kapitel VI (Schutz von Beschäftigten, Auszubildenden und Studenten) dargelegten Anforderungen zu prüfen. Effektive Dosen von $> 1 \text{ mSv a}^{-1}$ werden als möglich erachtet, was in Zukunft bei Umsetzung der EU-BSS die Anmeldung der Tätigkeit bei der zuständigen Behörde erfordern könnte.

Für Radon an Arbeitsplätzen wird nach den neuen EU-BSS in Artikel 54 die Einführung eines Referenzwertes von nicht über 300 Bq m^{-3} gefordert. Gleichzeitig werden die Mitgliedstaaten aufgefordert, im Rahmen eines nationalen Radon-Aktionsplanes in sogenannten Radon-Verdachtsgebieten in ebenerdigen oder unterirdischen Arbeitsplätzen die Radonkonzentration am Arbeitsplatz zu bestimmen. Im Sinne einer Optimierung wird erwartet, dass entsprechende Maßnahmen zur Reduzierung der Strahlenbelastung durch Radon bei einem möglichen Überschreiten des gewählten Referenzwertes ergriffen werden. Für den Fall, dass eine Absenkung der Radonkonzentration unter den Referenzwert nicht möglich ist, wertet auch die Europäische Kommission die Exposition am Arbeitsplatz als geplante Situation und fordert die behördliche Anmeldung und fortlaufende Überwachung.

9.5 Kompartiment „Umwelt 2“ (unterirdischer Anlagenbereich)

Der Untersuchungsraum des Kompartimentes Umwelt 2 bezieht sich auf den Teil der Geothermieanlage, welcher sich im Wesentlichen unter der Erdoberfläche befindet. Die Arbeiten sind generisch und beziehen sich nicht speziell auf einen Anlagentyp, da der Bohrungsausbau unabhängig vom Anlagentyp (Kalina-, ORC-Prozess oder Wärmeauskopplung) ist.

9.5.1 Bohrablauf und -technik

In der Optimierung der Erkundungs- bzw. der Explorationsbohrungen liegt ein großes ökonomisches Einsparungspotenzial. Der Einsatz von schnelleren bzw. effizienteren Bohrverfahren mit kleinen und mobilen Anlagen kann erheblich dazu beitragen, Kosten bei der Exploration zu sparen. Optimierungsmöglichkeiten zur Kosteneinsparung während der Erschließung tiefer geothermischer Lagerstätten sind laut /OPP 08/:

- Minimierung des Bohrrisikos durch eine gute Vorplanung zur Vermeidung von Standzeiten
- Reduzierung der Anlagenkosten durch einen kontinuierlichen und automatisierten Bohrablauf sowie eine Verringerung der Umrüstzeiten
- Erhöhung der effektiven Bohrgeschwindigkeit
- Schnelle und materialsparende Verrohrung der Bohrung
- Echt-Zeit-Informationsaustausch mit dem Bohrgerät und Einbindung von Spezialisten
- „Underbalanced Drilling“-Optionen zur Vermeidung von Feststoffeinträgen in das Speichergestein und Gewährleistung eines schnellstmöglichen Bohrvortriebes
- „Coiled Tubing“- Bohren
 - Reduzierter Aufwand für den Ein- und Ausbau des Bohrgestänges
 - Höhere Gesamtbohrgeschwindigkeit
 - Bohrlochdurchmesser bis 8 ½“ am 3 ½“Coiled Tubing
- Monobore und Slim Casing Verrohrungen
- Einsatz von automatischen Bohrsystemen mit einer hohen Datenübertragungsrate
- Casing / Liner Expansion (aufweitbare Verrohrung)

Eine zusätzliche Möglichkeit, Bohrkosten zu senken, sind multilaterale Bohrungen mittels Sidetracks, die von einer bestehenden Bohrung ausgehend im Untergrund abzweigt werden. Dieses Verfahren wird z. B. eingesetzt, wenn die erste Bohrung nicht fündig ist und dient dem Erreichen eines „neuen“ Zielhorizontes oder um die Gesamt-

produktivität eines Bohrlochs zu steigern. Zudem kann ein Sidetrack verwendet werden, um den Injektionsdruck bei Injektionsbohrungen auf mehrere Bohrungen aufzuteilen und somit den Injektionsdruck für eine einzelne Bohrung zu verringern. Der entscheidende Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Kosten für die oberen Bohrlochsektionen eingespart werden /VOL 13/.

Durch eine angepasste Messtechnik kann der Bohrprozess effizienter geplant werden. Zum Beispiel könnten durch die „Downhole“-Messtechnik, (Seismic) Prediction while Drilling ((S)PWD) „Measurement While Drilling (MWD)“-Technik, bereits während des Bohrvorganges die vorausliegenden Schichten und Störungen erfasst werden. Somit könnten bereits während der Bohrung Aussagen zu den Reservoir-Charakteristiken gemacht werden, um den Bohrverlauf an die entsprechenden Erfordernisse anzupassen /TUC 14/.

9.5.2 Werkstoffe

Die Auswahl der Werkstoffe hängt von der Zusammensetzung des Thermalwassers und den Spannungsverhältnissen im Untergrund ab. Für die Verrohrung können metallische oder beschichtete Werkstoffe und Verbundwerkstoffe zum Einsatz kommen /BAC 12/.

- Unlegierte Kohlenstoff-Stähle (geringer Widerstand gegen Korrosion)
- Hochlegierte Chrom-Nickelstähle (keine flächenhafte Korrosion)
- Duplex Stähle (sehr gute Korrosionsbeständigkeiten)
- Super Duplex Stähle (sehr gute Korrosionsbeständigkeiten, bis 280 °C geeignet)
- Austenitische Stähle (gute Beständigkeit gegen Erosion und Korrosion)
- Stähle aus Nickelbasislegierungen (gute Korrosionsbeständigkeit auch bei hohen Temperaturen)
- Stähle aus Titanlegierungen (exzellente Korrosionsbeständigkeit)

Die Materialkosten, aber auch die günstigen Materialeigenschaften, nehmen bei den oben aufgezählten Materialien von oben nach unten zu (siehe Kap.3.5.1).

Durch die Zementierung des Ringraumes zwischen der Verrohrung und dem Gebirge wird sichergestellt, dass keine hydraulische Verbindung zwischen Grundwasserstockwerken entstehen kann, die Verrohrung fest im Gebirge verankert ist, keine hydraulische Verbindung zwischen Lagerstätte und Tagesoberfläche entsteht und die Verrohrung vor aggressiven Formationswässern geschützt ist. Eine weitere Aufgabe ist es, die Verrohrung selbst vor Knicken oder sonstigem Versagen zu schützen /BUJ 11/.

Die derzeitige Zementationstechnik bei Geothermie-Bohrungen entspricht im Prinzip der von herkömmlichen Öl- und Gasbohrungen. Die geochemische Umgebung ist bei Geothermie-Bohrungen jedoch vielerorts aggressiver, deshalb werden höhere Anforderungen an die Zemente gestellt /NEL 90/. Die Zementierung muss speziell an die lokalen geologischen, hydraulischen und chemischen Bedingungen angepasst werden, damit die Zementierung gleichermaßen chemisch und mechanisch stabil ist. Bei der Erforschung zur Zementierung von CO₂-Speicherbohrungen wurden neue Techniken aufgezeigt; diese Techniken können auch auf andere Bohrungen, wie die der Tiefengeothermie übertragen werden /STR 09/:

- Einsatz von Zementen mit einer höheren Elastizität
- Nutzung von Zementen mit speziellen Additiven und / oder kleineren Anteilen von Portland- Zement, um die Beständigkeit zu erhöhen
- Einsatz von Zementen ohne Calcium, das durch CO₂ zu einem Karbonat umgewandelt werden kann, sowie der Einsatz von Calcium-Phosphat-Hydraten und Calcium-Aluminosilikaten

In der Abdichtung des Ringraumes vor allem beim Rückbau einer Bohrung in der Nachbetriebsphase können z. B. arteigene Abdichtungsmaterialien wie Ton oder Salz verwendet werden. Diese verhalten sich plastisch und entstandene Risse und Klüfte können anders als bei einem spröden Zement wieder verheilen (siehe Kap. 3.5.2).

9.5.3 Auswirkungen bei der Stimulation geothermaler Lagerstätten

Bei der Stimulation geothermaler Lagerstätten bzw. dem Fracken von unkonventionellen Gaslagerstätten werden unterschiedliche Gesteine und Fluide im Untergrund ange-

troffen. Im Wesentlichen muss die Rheologie der Prozessfluide (Bohrspülung und Stimulationsfluid) an die Bedingungen im Untergrund durch die Zugabe von Additiven angepasst werden. In der Bevölkerung besteht die Sorge, dass durch Stimulationsmaßnahmen Schadstoffe in oberflächennahe Grundwasserleiter migrieren können. Es werden zwei grundsätzliche Stimulationsverfahren unterschieden: Die hydraulische und die chemische Stimulation (siehe Kap. 3.3).

Bei der **hydraulischen Stimulation** geothermaler Lagerstätten werden in der Regel kompakte Sandsteine, Granite oder Kalkformationen angetroffen. In diesen Gesteinen erzeugte Klüfte und Spalten werden nicht sofort wieder geschlossen, sondern durch die Gesteinsmatrix gestützt. Bei der unkonventionellen Gasförderung werden dagegen i. d. R. Gesteine gefrackt deren Selbststützfunktion nicht gegeben ist (z. B. Tonsteine). Deshalb müssen Stoffe zugesetzt werden, welche die erzeugten Klüfte und Spalten „offen“ halten. Zudem können die Kohlenwasserstoffe in der Lagerstätte das Stimulationsfluid chemisch negativ beeinflussen. Die Zugabe bestimmter Additive soll dies verhindern. In der Geothermie kann aufgrund der Selbststützfunktion gänzlich auf den Einsatz von schädlichen Zusatzstoffen bei der hydraulischen Stimulation der Lagerstätte verzichtet werden /GEO 12/, /GTV 11/.

Es besteht allerdings die Gefahr, dass durch hydraulische Stimulationsmaßnahmen Scherspannungen im Untergrund schlagartig abgebaut werden, welche zu spürbaren seismischen Ereignissen an der Oberfläche führen. Spürbare seismische Ereignisse können in allen drei Geothermie-Regionen auftreten, wobei die Wahrscheinlichkeit im tektonisch aktiven Oberrheingraben wesentlich höher ist als im Norddeutschen Becken- oder im Süddeutschen Molassebecken /HUE 10/. Eine Zusammenfassung der Seismik-Problematik wird im Kapitel 5.6 gegeben.

Bei der **chemischen Stimulation** geothermaler Lagerstätten (überwiegend im Süddeutschen Molassebecken) werden Säuren eingesetzt. Durch die Reaktion der Säuren mit dem Gestein wird diese neutralisiert. Dadurch ist eine Migration von Säure aus dem Zielhorizont in oberflächennahe Grundwasserleiter sehr unwahrscheinlich /WOL 12/. Ein möglicher Schadstoffaustrag wird im Kapitel 9.5.4 diskutiert.

9.5.4 Schadstoffemissionen und -immissionen

Um die Rheologie bzw. die Eigenschaften der Prozessfluide (z. B. Bohrspülung, Stimulationsfluid) an die Bedingungen im Untergrund einzustellen, werden ihnen häufig Addi-

tive zugemischt. Diese können umweltschädlich sein. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass die erbohrten geologischen Schichten Formations- bzw. Lagerstättenwässer enthalten können, die mit Kohlenwasserstoffen angereichert und hochmineralisiert sind bzw. schädliche Konzentrationen an Metallen oder Gasen (Schwefelwasserstoff) enthalten. Diese Wässer sind meistens von sich aus schon als stark wassergefährdend (WVK 2 – 3) einzustufen und damit bedenklicher als die eingebrachten Additive. Zudem kann ein Stoffeintrag von der Oberfläche durch mögliche Störfälle und ein Versickern der Schadstoffe in den Untergrund erfolgen. Ein oberflächlicher Eintrag von Schadstoffen in den Boden und oberflächliche Gewässer wird bei einem nach den WEG-Richtlinien /WEG 06a/ erstellten Bohrplatz und einem planmäßigen Normalbetrieb aber wirkungsvoll unterbunden (siehe Kap. 3.2.3).

Während des Durchteufens von oberflächennahen Grundwasserleitern dürfen nur unbedenkliche Bohrspülungen verwendet werden. Bevor in tieferen Schichten mit bedenklichen Fluiden gebohrt wird, werden die darüber liegenden Schichten gegen diese mit einzementierten Rohren abgedichtet. Damit soll ein Eintrag von Bohrspülung in oberflächennahe Grundwasserleiter nahezu ausgeschlossen werden. Aus qualitativer Sicht stellen die einzementierten Rohre eine wirkungsvolle Abschirmung des Grundwasserleiters vor dem Einfluss der Bohrspülungen und im späteren Betrieb vor dem Thermalwasser dar /FRK 07/. Grundsätzlich kann bereits durch eine optimale Vorplanung und durch den Einsatz zertifizierter Bohrunternehmen eine wesentliche Risikoverminderung erfolgen (siehe Kap.7.4.2).

Die Ringraumzementierung stellt das wichtigste Sicherheitselement bei der Abdichtung von verschiedenen Grundwasserstockwerken dar. Es gibt Ansätze, die Ringraumzementierung durch Latex-Materialien zu ergänzen um deren Duktilität gegenüber Scherbewegungen oder thermalen Volumenänderungen im Untergrund zu verbessern. Da die Langzeitstabilität der eingesetzten Dichtmaterialien noch nicht ohne Zweifel nachgewiesen ist, besteht hier noch Forschungsbedarf /FIC 08/. Die für den Bohrlochausbau eingesetzten Materialien und Stoffe müssen in Bezug auf mögliche Veränderungen der Grundwassereigenschaften beurteilt werden, diese werden nur zugelassen, wenn sie das oberflächennahe Grundwasser nicht gefährden oder schädlich verändern /BWB 13/ (siehe Kap. 7.5.2).

Durch folgende Migrationswege ist ein potenzieller Schadstoffeintrag in oberflächennahe Grundwasserleiter aus dem Untergrund prinzipiell möglich (siehe Kap. 7.4):

- Entlang von künstlichen Wegsamkeiten (Bohrung)
- Entlang von Störungen oder Klüften

Im späteren Anlagenbetrieb sind Schädigungen der Ringraumzementierung nur sehr schwer und kostenintensiv zu beheben. Deshalb muss die Integrität des Verbundsystems aus Zement und Verrohrung schon während des Bohrlochausbaus bzw. umgehend danach sichergestellt sein. Der Aufstieg von Thermalwässern entlang einer fehlerhaften Ringraumzementierung oder der Ausfluss aufgrund von Leckagen in der Verrohrung kann durch folgende Maßnahmen detektiert werden /SCI 12/:

- Monitoring bzw. Prüfungen zur Gewährleistung der Bohrlochintegrität
 - Druckprüfungen nach dem Bohrlochausbau
 - Zementbondlogs

In der Betriebsphase sollte die Bohrlochintegrität durch periodische Ringraumdrucküberwachungen überprüft werden.

Der Aufstieg von Fluiden in höher liegende Schichten durch künstlich induzierte Störungen oder Klüfte ist in der Regel aus folgenden Gründen unwahrscheinlich /GTV 11/, /AND 12/:

- Die Bruchlängen bei Stimulationsmaßnahmen erreichen aufgrund der großen Tiefe der Lagerstätte nicht oberflächennahe Grundwasserleiter.
- Durch das Monitoring seismischer Ereignisse können nicht planmäßig erzeugte Risse detektiert und Gegenmaßnahmen getroffen werden.
- Ein Vermischen von hochmineralisierten Tiefenwässern mit oberflächennahen Süßwassern findet bei einem ausgeglichenen Druckpotenzial, aufgrund der unterschiedlichen Dichte nur über sehr lange Zeiträume statt.

Modellierungen und Erfahrungen aus durchgeführten Projekten zur Stimulation von niedrigpermeablen geothermalen Lagerstätten ergaben, dass Risslängen bis zu 500 m in vertikaler Richtung anwachsen können. Somit würden oberflächennahe Grundwasserleiter bei Lagerstättentiefen von > 2.000 m wie sie in Deutschland überwiegend vor-

kommen, nicht durch künstlich erzeugte Risse erreicht werden /POR 09/, /SCS 09/, /ZIM 10b/.

Aufgrund der im lokalen Maßstab großen Heterogenität des geologischen Untergrundes und der dadurch einhergehenden Unsicherheiten (vor allem im zerklüfteten Oberreingraben), muss eine Bewertung der möglichen Wegsamkeiten für jedes Geothermieprojekt einzeln vorgenommen werden und sollte deren Entstehung niemals von vornherein ausgeschlossen werden.

9.5.5 Auswirkungen hydro-geomechanischer Prozesse

Im süddeutschen Raum stehen im Untergrund vielerorts Anhydrit-Gesteine an. Die Umwandlung von Anhydrit in Gips aufgrund eines Wasserzutrittes (z. B. undichte Ringraumzementierung) in die Anhydrit-Schichten führt zu einer Volumenzunahme des Gesteines. Bei oberflächennahen Anhydrit-Schichten kann die Umwandlung zu einer Hebung der Geländeoberfläche führen. Damit es zu einer Hebung kommt, muss der Quelldruck des Anhydrits höher sein als der Gebirgsdruck /STE 10/. Da sich die Tiefengeothermie in Teufenbereichen > 2.000 m befindet, sind durch Quellen von Anhydrit verursachte signifikante Hebungsvorgänge aufgrund des hohen lithostatischen Druckes in dieser Tiefe nicht zu erwarten, sofern ein Aufstieg bzw. Ausfluss von Flüssigkeit in oberflächennahe Gesteinsschichten ausgeschlossen wird (siehe Kap. 7.5.4.1).

Bei Tiefengeothermie-Projekten wird das geförderte Thermalwasser durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund injiziert. Damit bleibt auch der Porendruck im Reservoir nahezu konstant und verhindert effektiv Setzungsvorgänge. Die hydraulische Verbindung der beiden Bohrungen im Reservoir, kann durch Zirkulations- oder Tracer-tests sicher nachgewiesen werden /MUE 12/ (siehe Kap. 7.5.4.1).

Durch unterschiedliche Temperatur- und Druckbedingungen sowie die Veränderung der Thermalwasserzusammensetzung wird das geochemische Gleichgewicht zwischen gefördertem und anstehendem Thermalwasser in der Lagerstätte gestört. Durch das Reinjizieren kann es in der Mischungszone in der Lagerstätte zu Ausfällungs- und Lösungsprozessen kommen. Durch die Zugabe von Inhibitoren und Druckhaltemaßnahmen versucht man, die Ausfällungen (Scale) insbesondere in der Anlage zu verhindern. Dadurch wird die Lösung größerer Mineralmengen im Untergrund unterbunden. Wenn trotzdem Hohlräume im Untergrund gebildet werden, werden diese sofort mit Flüssigkeit gefüllt, die so gering kompressibel ist, das größere Setzungsbeträge nicht

zu erwarten sind /MUE 12/. Dies wird z. B. bei der Flutung einsturzgefährdeter Salzbergwerke angewendet. Durch das Fluten der Bergwerke werden der Einsturz von Hohlräumen und eine damit verbundene Setzung der Geländeoberfläche verhindert (siehe Kap. 7.5.4.1).

Während des Abteufens der Bohrung werden unterschiedliche Grundwasserstockwerke identifiziert und gegeneinander abgedichtet. In der Bohrphase würde ein unbeabsichtigtes Verbinden unterschiedlicher Grundwasserstockwerke registriert und es können umgehend Gegenmaßnahmen getroffen werden. Durch Monitoringmaßnahmen (z. B. Druckprüfungen) können undichte Ringraumzementierungen (z. B. durch Alteration) auch während des Anlagenbetriebes erkannt und Gegenmaßnahmen getroffen werden /NRW 06/ (siehe Kap. 7.5.4.3).

Die Bohrungsintegrität kann signifikant durch deren Erstellung in einer Störungszone beeinflusst werden. Da in der Geothermie aufgrund ihrer hohen Durchlässigkeiten bevorzugt gestörte oder geklüftete Bereiche angebohrt werden, kann es bei einem Abbau von Scherspannungen bzw. bei einem Versatz von Klufflächen im Bohrungsbereich zu einer Beeinträchtigung der Bohrungsintegrität kommen /KRE 10/. Durch eine optimale Auslegung der Materialien insbesondere der Rohre sowie dem Einsatz besonderer Bohrtechniken, kann das Risiko der Scherung einer Bohrung wesentlich vermindert werden.

9.5.6 Thermische Auswirkungen

Während des Anlagenbetriebes erwärmt das in den Bohrungen zirkulierende Thermalwasser die Bohrungsmaterialien. Dadurch wird das Nahfeld der Förder- und Reinjektionsbohrung konduktiv erwärmt. Diese Wärmeabgabe an die umgebenden Gesteins- und Bodenschichten wird durch die Zementierung der Verrohrung gehemmt, zudem ist eine Abkühlung des Thermalwassers aus ökonomischer Sicht zu unterbinden. Die abgegebene Wärmeleistung ist vernachlässigbar und führt nicht zu einer Beeinträchtigung von Flora oder Fauna /SCP 06/ (siehe Kap. 7.5.5).

Die Bohrungsmaterialien sollten keinen größeren und häufigen Temperaturwechseln ausgesetzt werden, was bei Standzeiten ohne kontinuierliche Thermalwasserförderung auftreten kann. Temperaturänderungen führen zur Expansion und Kontraktion der Materialien, was insbesondere die Integrität der Zementation beeinflussen kann /TEO 12/ (siehe Kap. 7.4.2).

Eine durch die Auskühlung des Reservoirs und des Deckgebirges hervorgerufene Kontraktion der Gesteine und eine Fortsetzung bis an die Geländeoberfläche kann vernachlässigt werden. Durch die geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Mineralphasen im Gestein reduziert sich der Porenraum bei Abkühlung nur unwesentlich. Die Absenkungsbeträge liegen weit unter denen aus dem Steinkohle-, dem Erz- und Kalibergbau und sind für die Stabilität von Gebäuden unbedenklich (siehe Kap. 7.5.5).

9.5.7 Funktionsverluste (Wasser und Boden)

Der Bau eines befestigten Bohrplatzes sowie eine Flächenbelegung durch die Geothermieanlage sind nicht vermeidbar /WEG 06a/. Nach einer erfolglosen Bohrung kann der Bohrplatz bis auf den Bohrkopf wieder komplett renaturiert bzw. der zwischengelagerte Mutterboden wieder eingebracht werden. Bei Einhaltung der Vorschriften wird die Beeinträchtigung des Schutzgutes Boden insgesamt als vernachlässigbar angesehen. Der rechtliche Schutz des Bodens ist ausreichend /FRK 07/ (siehe Kap. 3.2.2 und Kap. 7.5.3.1).

Für den Bohrbetrieb und für mögliche Stimulationsmaßnahmen wird Wasser mit Trinkwasserqualität benötigt. Dieses Prozesswasser muss in der Regel nach Abschluss der Arbeiten aufbereitet oder entsorgt werden.

Da im Anlagenbetrieb das anstehende Thermalwasser aus der Lagerstätte als Prozesswasser verwendet wird, muss bei der geothermalen Nutzung von hydrothermalen Lagerstätten kein zusätzliches Wasser mehr zugeführt werden. Zudem wird das geförderte Thermalwasser im Anlagenbetrieb durch eine Injektionsbohrung wieder in den Untergrund verpresst. Somit entfällt eine Entsorgung möglicher hoch mineralisierter Wässer und es erfolgt keine gravierende Druckreduzierung in der Lagerstätte /FRK 07/ (siehe Kap. 3.2.3 und Kap. 7.5.3.2).

9.5.8 Erfolgte und derzeitige Forschungsarbeiten, möglicher Forschungsbedarf

An der Weiterentwicklung der konventionellen Bohr- bzw. Richtbohrtechnik forschen mehrere Universitäten. Die TU-Clausthal und die TU Bergakademie Freiberg besitzen z. B. Versuchsanlagen, mit denen verschiedene Bohrprozesse untersucht werden kön-

nen. Das Geothermiezentrum in Bochum plant eine Versuchsanlage zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von:

- Bohrantrieben,
- Geophysikalischen Messsonden,
- Hydraulischen Stimulationstechnologien und
- Mikroseismischen Überwachungstechniken.

Bohrungen für die Erschließung geothermaler Lagerstätten werden in größere Tiefen als in der Kohlenwasserstoffindustrie abgeteuft und erreichen höhere Temperaturen und Drücke. Somit werden auch höhere Anforderungen an die eingesetzten Materialien und Verfahren gestellt. Deshalb wurde in Deutschland der Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik (Gebo) gegründet. Der Forschungsverbund hat das Ziel, neue Konzepte zur geothermischen Energiegewinnung in tiefen geologischen Schichten mit geringerem geologischem und technischem Risiko zu entwickeln. Hauptziel des Forschungsverbundes ist es, die Kosten um 30 – 50 % zu reduzieren. Die geplanten Einsparungen sollen durch die nachstehenden drei Maßnahmen erreicht werden /TUC 14/:

1. Änderung der Bohrlochkonstruktion

Zielvorstellung ist es, ein sogenanntes Monobohrloch herzustellen, d. h. ein Bohrloch, das von oben beginnend bis zur Endteufe mit gleichem Durchmesser gebohrt wird. Nach gängiger Technik werden heute Bohrlöcher hergestellt, die mit großem Durchmesser (bis 80 cm) beginnen und sich nach unten teleskopartig verjüngen (bis auf ca. 15 cm). Von Zeit zu Zeit muss das Bohrloch durch sog. Rohrfahrten stabilisiert werden. Durch diese Rohrfahrten kann immer nur mit einem kleineren Bohrmeißel weiter gebohrt werden. Das Monobore-Bohrloch vermeidet, bei gleichem Enddurchmesser, die großen Anfangsdurchmesser der herkömmlichen teleskopartigen Konstruktion. Kleinere Durchmesser lassen sich zudem schneller bohren, benötigen weniger Bohrspülung, weniger Stahl für die Bohrlochstabilisierung und weniger Zement, um die Rohrfahrten im Gebirge zu verankern und sie benötigen kleinere Anlagen und Aggregate (z. B. für Spülpumpen).

2. Änderung des Bohrprozesses

Zielvorstellung ist das Bohren mit einem Endlosrohr, das von einer Rolle abgewickelt wird und gleichzeitig die Nutzung dieses Rohres als "Stützrohr" zur Stabilisierung des Gebirges. Diese Bohrprozessänderung zusammen mit dem Ziel der Herstellung eines Monobore-Bohrloches lassen sich nur erreichen, wenn der "Bohrstrang" für seine Nutzung als "Stützrohr" aufgeweitet wird. Hierbei wird u. a. an gefalteten Rohren geforscht. Die derzeitigen Bohrvorgänge mit einem Bohrstrang, der aus etwa 10 m langen Bohrstangen zusammengeschaubt wird, muss beim Bohren alle 10 m (20 oder höchstens 30 m) unterbrochen werden, um eine neue Bohrstange bzw. Stangenzug nachzusetzen. Ist die Verrohrungsteufe erreicht, muss der Strang ausgebaut und die Verrohrung zur Gebirgsstabilisierung eingebracht werden. Der gesamte Prozess ist zeitaufwendig und mit dem Risiko verbunden, dass es während des Ein- und Ausbaus zu Brüchen im Bohrloch kommt. Der Einsatz eines abwickelbaren gefalteten Endlosrohres und seine Nutzung als "Stützrohrfahrt" spart Zeit und verringert Risiken aufgrund von Bohrlochverbruch und Bohrgestängebruch, da das Endlosrohr ja nur einmal eingesetzt wird.

3. Einsatz künstlicher Intelligenz

Ziel hierbei ist die Entwicklung eines Bohrsimulators, der geeignet ist, die Bohrplanung zu unterstützen und die Bohrungsausführung in Echtzeit zu überwachen. Somit sollen Risiken bzw. suboptimale Bohrbedingungen früh erkannt und durch entsprechende Gegenmaßnahmen vermieden werden. Schwingungen im Bohrstrang zum Beispiel können Bohrfortschritt und Bohrmeißel-Lebensdauer erheblich beeinflussen.

Zurzeit ist der erwähnte Ansatz der Monobore-Bohrlochkonstruktion nur in Verbindung mit innovativen Bohranlagenkonzepten und dem Coiled Tubing Verfahren anwendbar. Die Techniken sind noch nicht für tiefe Geothermie-Bohrungen anwendbar. Ob eine wirtschaftliche aber auch technisch vertretbare Anwendung erreicht werden kann, bleibt abzuwarten.

In der Forschung werden zudem thermische Vortriebstechniken untersucht. Ein F&E-Vorhaben untersucht z. B. die Gesteinszerstörung durch Laser. Bisher werden diese Techniken aber nur im Labor verwendet.

Das Ziel gegenwärtiger und zukünftiger Forschungsprojekte muss es sein, den gesamten Bohrablauf zu optimieren und durch Kombination innovativer Technologien und Werkstoffe die Effizienz herkömmlicher Konzepte zu steigern. Die Reduzierung der

Bohrkosten ist erforderlich, um die geothermische Energiegewinnung rentabler zu machen.

10 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die komplexen Systeme von Anlagen der Tiefengeothermie in Deutschland wurden untersucht. Die vorgestellten Ergebnisse führen zu den im Folgenden komprimiert dargestellten Schlussfolgerungen und Empfehlungen.

10.1 Allgemeines

Von Seiten der Geothermiebranche wird angeführt, dass die Geothermie beim Umbau der Energieversorgung eine wichtige Rolle spielen kann. Hinsichtlich der immensen theoretischen Potenziale der Technologie wird dazu regelmäßig auf die Studie des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) aus dem Jahr 2003 verwiesen.

Das derzeit praktisch nutzbare Potenzial liegt deutlich darunter. Um durch geothermale Energie einen signifikanten Anteil zum sog. Energiemix, insbesondere zur Stromerzeugung beizutragen, müsste eine Vielzahl an Anlagen gebaut werden. Zurzeit sind in Deutschland Anlagen in Betrieb, die bis zu 7 MW elektrische Leistung erzeugen können. Hiervon muss der Eigenverbrauch (in der Regel etwa 25 bis 30 % der Bruttoleistung) abgezogen werden, so dass der tatsächlich ins öffentliche Netz eingespeiste Strom deutlich unter der angegebenen Bruttostromerzeugung liegt. Eine wesentliche Erhöhung des Wirkungsgrades einer geothermalen Anlage zur Stromerzeugung ist aufgrund der geringen Thermalwassertemperaturen nicht absehbar. Um ein durchschnittliches konventionelles Großkraftwerk (ca. 1.000 MW) zu ersetzen, müssten dementsprechend mehr als 150 Geothermiekraftwerke gebaut werden. Die immer wieder angeführte Grundlastfähigkeit von Geothermiekraftwerken muss daher, auch vor dem Hintergrund der derzeit noch häufigen Revisions- / Stillstandszeiten, deutlich relativiert werden.

Wiederholt haben Ereignisse und Probleme in Anlagen der Tiefengeothermie und die Information hierüber Bürger verunsichert. Anders als der Sach- war der Imageschaden groß. Die Verbesserung des Betriebsmonitorings und der Probennahmetechnik sowie eine über die einzelne Anlage hinausgehende systematische Gewinnung, Auswertung und Berücksichtigung von Betriebserfahrungen sind daher nicht nur die wesentlichen Elemente zur Verbesserung der Anlagenverfügbarkeit, sondern liefern auch wichtige Grundlagen für die Kommunikation mit der Öffentlichkeit. Die Anlagenverfügbarkeit ist

zudem ein wesentlicher Punkt hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Anlage. Entsprechende Fortschritte auf diesem Gebiet hätten nach diesseitiger Einschätzung die größten ökonomischen Auswirkungen.

Derzeit werden in Deutschland nur hydrothermale Lagerstätten für tiefengeothermische Projekte erschlossen. Ein großes noch unerschlossenes Potenzial liegt bei den petrothermalen Systemen in Kristallin-Gebieten. Schätzungen zufolge können 95 % des geothermischen Potenzials den petrothermalen Hot-Dry-Rock-Systemen zugeordnet werden (BMU 2004). Durch das Marktanreizprogramm der Bundesregierung wird die Erschließung dieser Lagerstätten gefördert. Jedoch wurde bislang keine einzige Anlage in Deutschland vollständig realisiert. Um die geothermale Stromerzeugung als zukünftige Energiequelle zu nutzen, müsste die Weiterentwicklung dieser Systeme vorangetrieben werden.

10.2 Kompartiment “Recht“

Alles in allem stellen die vorhandenen rechtlichen Strukturen, welche die Genehmigung, den Betrieb und die zukünftige Stilllegungs- und Rückbauphase regeln, einen ausreichend gefüllten Werkzeugkasten zur Verfügung, um die sich in der Praxis ergebenden Problemsituationen sachgerecht lösen zu können. Die Behörden haben die Möglichkeit, im Einzelfall über entsprechende Auflagen und Kontrollen die Einhaltung des gesetzlich geforderten Sicherheitsniveaus sicherzustellen. Dennoch ist festzuhalten, dass es zahlreiche Faktoren gibt, die den Bau der Anlage verzögern oder den planmäßigen Betrieb der Anlage in erheblicher Weise beeinflussen können.

Bestmögliche Informationen sowohl auf Seiten der Unternehmer (Planungsgrundlage) als auch auf Seiten der Öffentlichkeit (Transparenz als Mittel zur Erhöhung der Akzeptanz) sind ein wesentlicher Faktor zur erfolgreichen Durchführung eines Geothermie-Projektes. Daher sollte an der Optimierung der Zugangsrechte zu Informationen mit speziellem Bezug auf die Besonderheiten eines Geothermie-Projektes gearbeitet werden, ohne jedoch den Ausgleich entgegengesetzter Interessen aus den Augen zu verlieren.

Als Umweltinformationen sollten insbesondere die verwendeten und auf dem Betriebsgelände gelagerten (z. B. wassergefährdenden) Stoffe des Primär- und Sekundärkreislaufs, die sich auf die Umweltbestandteile im Sinne des § 2 Abs. 3 Nr. 1 UIG auswirken

können, mit Angaben zur Stoffbezeichnung, zum Verwendungs- bzw. Lagerort, der Verwendungs- bzw. Lagermenge und der ermittelten Wassergefährdungsklasse zugänglich gemacht werden.

Im Bereich des Zugangs zu Umweltinformationen und Geodaten für private Unternehmen kommt eine Modifikation des § 9 Umweltinformationsgesetz (UIG) in Betracht. Dabei käme entweder eine Fristenregelung oder eine Entschädigungsregelung oder eine Kombination aus beiden Regelungen in Frage, welche den verfassungsrechtlichen Anforderungen an den Schutz von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen als entgegenstehende Interessen gerecht werden. Eine Fristenregelung erscheint dabei vorzuzugswürdig, da sie praktisch besser handhabbar ist und somit einen effektiveren Zugang zu den Daten gewährleistet.

Die Frage nach der Bedeutung der Erfordernisse der Raumordnung und der Landesplanung bei bergbaulichen Vorhaben, hier der Tiefengeothermie, ist nicht einfach zu beantworten. Als Anknüpfungspunkte für die Berücksichtigung von Erfordernissen und Zielen der Raumordnung und Landesplanung im Bergrecht kommen § 11 Abs. 10 und § 48 Abs. 2 BBergG in Betracht. Aufgabe der Raumordnung ist es, den Gesamttraum der Bundesrepublik Deutschland und seine Teilräume durch zusammenfassende, übergeordnete Raumordnungspläne und durch Abstimmung raumbedeutsamer Planungen und Maßnahmen zu entwickeln, zu ordnen und zu sichern (vgl. § 1 Abs. 1 ROG). Dabei sind unterschiedliche Anforderungen an den Raum aufeinander abzustimmen, die auf der jeweiligen Planungsebene auftretenden Konflikte auszugleichen und Vorsorge für einzelne Nutzungen und Funktionen des Raumes zu treffen. Die Schaffung der räumlichen Voraussetzungen für die vorsorgende Sicherung sowie für die geordnete Aufsuchung und Gewinnung von standortgebundenen Rohstoffen zählt nach § 2 Abs. 2 ROG ebenso zu den bundesgesetzlich geregelten Grundsätzen der Raumordnung wie die Berücksichtigung der räumlichen Erfordernisse für eine kostengünstige, sichere und umweltverträgliche Energieversorgung. Daraus lassen sich Hinweise darauf ableiten, dass auch unterirdische Vorhaben relevante Gegenstände raumordnerischer Planungen sein können.

Gegenstand des Raumordnungsrechts ist somit nicht nur die oberirdische Verortung von Raumnutzungen und Raumfunktionen, sondern es umfasst auch Nutzungen des Raums in der Tiefe. Dies erlaubt raumordnerische Festlegungen, um Nutzungskonkurrenzen im Untergrund planerisch zu lösen. Eine dreidimensionale Raumplanung im Sinne einer gleichzeitigen Nutzung übereinander liegender Gesteinsschichten für un-

terschiedliche Zwecke (Stockwerksnutzung) ist im Raumordnungsrecht bisher allerdings nicht vorgesehen.

Auf Ebene der Regionalplanung sollten die in den Landesentwicklungsplänen (LEP) zumeist allgemein formulierten Grundsätze und Ziele zu erneuerbaren Energien bzw. der Geothermie konkretisiert werden. Sie sind dann bei kommunalen Planungen entsprechend zu berücksichtigen. Fraglich ist allerdings, ob eine regionalplanerische Ausweisung von Gebietsfestlegungen gemäß § 8 Abs. 7 ROG sinnvoll ist. Dies liegt zuvorderst daran, dass es Aufgabe des Bergrechts ist, die Aufsuchung und Gewinnung des bergfreien Bodenschatzes „Erdwärme“ zu regeln und Bergbauberechtigungen zu erteilen. Darüber hinaus ist die Prognose im Vorfeld mangels entsprechend detaillierter Datenlage (z. B. durch seismische Untersuchungen) schwierig, ob trotz einer regional hohen Eignung lokal die Ergiebigkeit der wasserführenden Schichten für einen wirtschaftlichen Betrieb einer Anlage am Standort ausreicht. Schließlich wird angeführt, dass die Obertageanlagen der Tiefengeothermie wegen ihres geringen Flächenbedarfs nicht raumbedeutsam seien.

Steuerungsmöglichkeiten der wasserwirtschaftlichen Fachplanung sind durch die Möglichkeit der Festsetzung von Wasserschutzgebieten vorhanden. Sofern man in der Grundwassernutzung durch die Geothermie also ein entsprechendes Gefährdungspotential für ein konkretes Wassergewinnungsgebiet sieht, kann die zuständige Verwaltungsbehörde ein solches (Trink-)Wasserschutzgebiet per Verordnung festsetzen, sofern die in § 51 Abs. 1 Satz 1 WHG normierten Festsetzungsvoraussetzungen (Erforderlichkeit der Festsetzung eines Wasserschutzgebietes anhand von Schutzwürdigkeit, Schutzbedürftigkeit und Schutzfähigkeit des jeweiligen Wasservorkommens) gegeben sind. Das Konzept bei der Bemessung dieser Wasserschutzgebiete orientiert sich am DVGW-Arbeitsblatt W 101, sollte aber auch klare Differenzierungen bezüglich der zulässigen Tätigkeiten inkl. der bergbaulichen Eingriffe in den Untergrund beinhalten. Auf diese Weise wirken sich Gebote und Verbote, die sich aus den Festsetzungen einer Wasserschutzgebietsverordnung ergeben, in der Bauleitplanung als Planungsschranke aus. Weitere sensible Teile des Einzugsgebiets könnten im Hinblick auf raumbedeutsame Planungen als Vorrang- und Vorbehaltsgebiete für die öffentliche Wasserversorgung in den Regionalplänen dargestellt werden.

Sofern eine Obertageanlage der Tiefengeothermie im Außenbereich errichtet werden soll, stellt sich die Frage der Privilegierung nach § 35 Abs. 1 BauGB. Anders als andere Anlagen der Erneuerbaren Energien ist die Tiefengeothermie bisher nicht ausdrück-

lich in der Liste der privilegierten Vorhaben nach § 35 Abs. 1 BauGB aufgenommen. In der Praxis hat sich dies in der Regel nicht als Problem erwiesen. Dies liegt insbesondere daran, dass die zuständige Behörde die Obertageanlage im Einzelfall als Elektrizitäts- und / oder Wärmearanlage zulassen kann, sofern die vom BVerwG als Zulässigkeitsvoraussetzung angesehene Ortsgebundenheit der Anlage bejaht wird. Allerdings zeigt bspw. das Verfahren der Gemeinde Brühl vor dem Verwaltungsgericht Karlsruhe (Urteil vom 01.08.2013 – 5 K 2037/12), dass eine ausdrückliche Privilegierung der Tiefengeothermie Klarheit schaffen könnte.

Soll die Obertageanlage im Innenbereich errichtet werden, kann es auf Ebene der Kommunalplanung geboten sein, die Tiefengeothermie ausdrücklich in den Flächennutzungs- und Bebauungsplänen zu berücksichtigen (z. B. im Rahmen einer Festsetzung als Sondergebiet im Sinne des § 11 BauNVO für Anlagen, die der Erforschung, Entwicklung oder Nutzung erneuerbarer Energien dienen). Auch sollte eine Betrachtung über das Gemeindegebiet hinaus erfolgen, bspw. hinsichtlich der Lage und Größe schon von der Bergbehörde ausgewiesener Erlaubnisfelder in Nachbargemeinden oder ausreichender Abstände zu schon vorhandenen Anlagen, damit diese sich nicht gegenseitig beeinflussen. Ein frühzeitiger Abgleich zwischen der Erteilung bergrechtlicher Berechtigungen zur Aufsuchung und Gewinnung von Erdwärme und einer hiermit korrespondierenden Kommunalplanung könnte auch dazu beitragen, kritische Einwendungen bezüglich einer späteren Anlagenplanung in Teilen zu antizipieren und seitens des Vorhabensträgers in einen Dialog mit der Öffentlichkeit einzutreten. Eine ähnliche Zielrichtung verfolgt die Regelung in § 25 Abs. 3 VwVfG.

Die Forderungen nach einer Reform des Bergrechts sind nicht unbegründet. Zwar bietet die Systematik des deutschen Bergrechts hinreichende Regelungen, sowohl um den bergfreien Bodenschatz „Erdwärme“ in einem geordneten Verfahren aufzusuchen und zu gewinnen als auch um die sach- und fachgerechte Errichtung und den Betrieb der Anlagen der Tiefengeothermie (gemeinsam mit den anderen fachgesetzlichen Regelungen) zu ordnen und einer Schutzgutverletzung vorzubeugen. Dennoch erweist sich das Bergrecht an manchen Stellen – wie dargelegt – als reformbedürftig. Die Berücksichtigung von Interessen von Grundstückseigentümern, Umweltschutz, Ressourcenschutz und Öffentlichkeitsbeteiligung sollte sich im Gesetzestext widerspiegeln.

Wünschenswert wäre eine gesetzgeberische Klarstellung in § 1 BBergG durch eine Ergänzung des Gesetzeszwecks um den Schutz der „Umwelt“.

Auch der Wortlaut des § 48 Abs. 2 BBergG, dessen tatsächliche Bedeutung als materielle Norm der Gesamtabwägung für widerstreitende Interessen, aber auch als Berücksichtigungsgebot z. B. des Umweltrechts bei der Betriebsplanzulassung, sich nur aus der Rechtsprechung ergibt, sollte geändert werden. Hier ist zu überlegen, ob nicht eine klare Bestimmung in Anlehnung an § 6 Abs. 1 BImSchG („sonstige öffentlich-rechtliche Vorschriften dürfen Errichtung und Betrieb der Anlage nicht entgegenstehen“) vorzugswürdig ist.

Die derzeitige Diskussion der Erweiterung der UVP-Pflicht für Tiefbohrungen ist mit Augenmaß zu führen. In diesem Zusammenhang steht neben der nationalen Diskussion auch die Änderung der derzeitigen UVP-Richtlinie auf europäischer Ebene an. Die bisher vorgelegten Regelungsentwürfe, die als Tatbestandsmerkmal für eine UVP-Pflicht u. a. das „Aufbrechen von Gestein unter hydraulischem Druck“ enthalten, werfen weitere Fragen, wie die nach der Abgrenzung der hydraulischen Gesteinsbehandlung (inkl. des sog. „Wasser-Frac“) zur chemischen Stimulation, auf. In diesem Zusammenhang wäre des Weiteren fraglich, ob eine solche unterschiedliche Behandlung der Stimulationstechniken sachlich begründbar wäre. Alles in allem sollte bei der Entscheidung für eine Erweiterung der UVP-Pflicht für Tiefbohrungen insbesondere auf Wertungswidersprüche geachtet werden. Insofern sei auf die Liste der UVP-pflichtigen Vorhaben nach Anlage 1 zum UVPG und speziell die Nr. 13.3.3 hingewiesen. Ferner ist nicht klar, warum die UVP-Pflicht für eine Tiefbohrung in einem Naturschutz-, Vogelschutz- und FFH-Gebieten erst ab einer Teufe von 1000 Metern besteht. Der mit der Ausweisung dieser Gebiete verbundene Schutzgedanke sollte auch bei einer geringeren Teufe Beachtung finden. Vor diesem Hintergrund erscheinen Vorschläge, die eine allgemeine Vorprüfung des Einzelfalls nach § 3c UVPG für Tiefbohrungen zur Gewinnung von Bodenschätzen vorsehen, sachgerechter. Dabei ist zu bedenken, dass die behördliche Entscheidung, nach einer allgemeinen Vorprüfung des Einzelfalls keine UVP durchzuführen – und damit auch auf Öffentlichkeitsbeteiligung, Planfeststellungsverfahren und Rahmenbetriebsplan zu verzichten –, gemäß § 3a Abs. 4 UVPG gerichtlich nur eingeschränkt überprüfbar ist (Beurteilungsspielraum der Behörde).

Das BBergG enthält Verordnungszuständigkeiten sowohl für den Bund als auch für die Länder. Infolgedessen können teilweise von Bundesland zu Bundesland abweichende Regelungen gelten. Mit der Einheitlichkeit der Rechtsordnung und Verwaltungspraxis beschäftigen sich der Länderausschuss Bergbau (LAB) und dessen Fachausschüsse. Dennoch kann es vorkommen, dass sich trotz weitgehenden Konsenses in den Fachausschüssen eine einheitliche Umsetzung in den Ländern verzögert oder länderspezi-

fische Sonderwege beschriftet werden. Insbesondere im Bereich der Tiefbohrverordnungen (BVOT) wäre allerdings eine einheitliche Verordnungsgebung wünschenswert. Es sollte erwogen werden, ob unter den Voraussetzungen der Art. 72 Abs. 2 und Art. 74 Abs. 1 Nr. 11 GG eine bundesrechtliche Zuständigkeit für eine Tiefbohrverordnung neu geschaffen oder bestehend mit § 68 Abs. 2 Nr. 3 BBergG begründet werden kann. Die bundesrechtliche Zuständigkeit und Umsetzung hätten den Vorteil, dass eine einheitliche Rechtslage in allen Bundesländern zeitgleich geschaffen würde. Dies wäre auch für Unternehmen, die in verschiedenen Bundesländern tätig sind, eine Vereinfachung. Bei einer bundeseinheitlichen Umsetzung könnte auch ein Freiraum für länderspezifische Anpassungen an den praktischen Bedarf in den einzelnen Bundesländern bleiben.

10.3 Kompartiment “Geothermales Reservoir“

Die sich gegenseitig beeinflussenden thermischen, hydraulischen, mechanischen und chemischen Prozesse, die in der Tiefengeothermie eine Rolle spielen, sind eng mit dem geologischen System des geothermalen Reservoirs gekoppelt. Sie hängen, in den hier betrachteten hydrothermalen Systemen, alle mit dem dort vorliegenden Thermalwasser zusammen, dass aus großer Tiefe an die Erdoberfläche gefördert, dort abgekühlt und wieder reinjiziert wird.

Für den sicheren und rentablen Betrieb einer Anlage der Tiefengeothermie ist es daher von entscheidender Bedeutung, die Veränderungen des Energieträgers Thermalwasser auf seinem Weg aus dem Reservoir in die oberirdische Anlage und zurück ins Reservoir zu verstehen, sie zu quantifizieren und damit belastbar vorhersagen zu können. Weiterhin ist es wichtig, die mechanischen (seismischen) Prozesse zu verstehen, die mit der Stimulation der Thermalwasserförderung zusammenhängen. Diese Prozesse lassen sich in einem bestimmten Umfang beeinflussen. Geschieht dies auf der Grundlage eines vertieften Systemverständnisses, lässt sich der Anlagenbetrieb aus Sicht der Wirtschaftlichkeit, des Arbeitsschutzes und des Umweltschutzes optimieren.

Das Systemverständnis ist jedoch noch lückenhaft und für die drei Geothermieregionen Deutschlands unterschiedlich. Auch werden an das Systemverständnis in den drei Geothermieregionen Deutschlands voneinander abweichende Anforderungen gestellt, weil differierende geologische Randbedingungen zu unterschiedlichen Auswirkungen der gleichen Prozesse führen können.

Zwischen den Geothermieranlagen im Norddeutschen Becken und im Oberrheingraben einerseits und denen im Süddeutschen Molassebecken andererseits gibt es grundsätzliche Unterschiede, die vor allem in den Salzgehalten der Thermalwässer begründet liegen – hochsalinare Wässer in Norddeutschland und dem Oberrheingraben und nahezu Süßwasser im Süddeutschen Molassebecken.

Die großen Temperatur- und Druckänderungen im Verlaufe der Förderung des Thermalwassers führen zu starken Ausfällungen in Anlageteilen (Scale-Bildung) in Norddeutschland und im Oberrheingraben, bereiten aber bei Anlagen im Süddeutschen Molassebecken kaum Probleme. Damit sind auch die durch Scale-Bildung hervorgerufenen Probleme in den ersten beiden Regionen ungleich größer und vielfältiger. Solche Probleme stellen beispielsweise einen hohen Pumpenverschleiß und intensive Korrosion der Verrohrungen sowie häufige Filterwechsel in der obertägigen Anlage dar. Welches wiederum Auswirkungen auf den Arbeitsschutz hinsichtlich radioaktiver Scale und deren Entsorgung hat.

Die Scale-Bildung ist ein physikalisch-chemischer Prozess, der auf die Übersättigung der Thermalwässer durch Temperatur- und Druckänderungen zurückzuführen ist. Übersättigte Lösungen haben die Tendenz, diese Übersättigungen abzubauen, indem übersättigte Mineralphasen ausgeschieden werden (Scale-Bildung). Der Abbau der Übersättigungen erfolgt jedoch nicht spontan, sondern ist kinetisch kontrolliert. Das heißt, Ausfällungen finden i. d. R. nicht an den Stellen statt, an denen sich Übersättigungen einstellen, sondern im weiteren Verlauf der Anlage oder noch später nach der Reinjektion im Reservoir.

Der Einsatz von sog. Inhibitoren kann die Scale-Bildung zwar verlangsamen, aber nicht verhindern. Die Entwicklung von Inhibitoren erfolgt heute noch experimentell und empirisch, weil die vorhandenen wissenschaftlichen Grundlagen ungenügend sind.

Gleichzeitig ist aber auch zu bedenken, dass sich geochemische Gleichgewichte früher oder später immer einstellen. Die Verhinderung lästiger Ausfällungen in der Anlage führt dann zu verstärkten Ausfällungen später im Reservoir. Dort können Ausfällungen zur Verstopfung des Porenraums führen, was wiederum Stimulationsarbeiten erforderlich machen kann, um die Förderleistung auf einem für die Anlage wirtschaftlichen Niveau zu halten.

Die Kenntnis der chemischen und hydraulischen Prozesse ist heute noch lückenhaft. Es ist zwar möglich, durch „Drehen“ an den vielfältigen Schrauben der Modellierungswerkzeuge, Beobachtungen nachzuvollziehen. Wo diese aber fehlen und man auf Prognosen angewiesen ist, sieht es schlechter aus. Belastbare Prognosen sind mit den heute verfügbaren Modellierungswerkzeugen und der lückenhaften Datenlage nicht möglich. Dies hat mehrere Ursachen:

- Das Reservoir ist für Probennahmen nicht leicht zugänglich
- Unverfälschte Probennahme von Thermalwässern ist mit den heute verfügbaren Probennahme-Systemen nicht möglich
- Die quantitativen Zusammenhänge zwischen Lösungszusammensetzung, Druck und Temperatur sind nur sehr lückenhaft bekannt
- Die thermodynamische Datenbasis, um solche Zusammenhänge rechnerisch zu ermitteln, ist unvollständig
- Wegen der unzureichenden Messdatenlage können Modellierungsergebnisse nicht überprüft werden
- Kinetische Daten fehlen
- Die relevanten elektrochemischen Reaktionen, die besonders für Korrosionsprozesse verantwortlich sind, sind noch weniger bekannt als geochemische Gleichgewichtsreaktionen

Diese Wissenslücken sind besonders für die Anlagen in Norddeutschland und im Oberrheingraben problematisch. Sie wirken sich in den Anlagen im Süddeutschen Molassebecken nicht so stark aus.

Um die Wissenslücken zu schließen und damit einen wirtschaftlicheren Betrieb von Anlagen zu ermöglichen, bieten sich folgende Maßnahmen an:

- Schaffung von Techniken für eine unverfälschte Probennahme von Thermalwässern
- Verbesserung des Anlagen-Monitorings
- Vervollständigung der thermodynamischen Datenbasis für die geochemische Modellierung

- Ermittlung kinetischer Daten
- Untersuchung der relevanten elektrochemischen Reaktionen
- Implementierung der besten Prozessmodellbeschreibungen in einem einzigen Rechencode

Ein weiteres an das geothermale Reservoir gebundenes und noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem ist die eingeschränkte bzw. fehlende öffentliche Akzeptanz von Geothermieanlagen. Verantwortlich dafür sind im Wesentlichen mikroseismische Ereignisse als Folge der oft notwendigen Stimulation der Durchlässigkeit durch Fracking. Diesbezüglich bietet sich eine verstärkte Implementierung des so genannten „Ampel-systems“ an (siehe Kap. 5.6).

10.4 Kompartiment “Technische Anlage“

Der verstärkte und zielgerichtete Austausch von Betriebserfahrungen zwischen den Behörden und zwischen den Kraftwerksbetreibern wird empfohlen. Ein solcher Austausch hat sich z. B. im Rahmen der World Association of Nuclear Operators (WANO) für Kernkraftwerke (innerhalb Deutschlands: VGB Power Tech) als hilfreich erwiesen. In der Kerntechnik existieren auch nationale und internationale Behördennetzwerke, zum Beispiel bei der IAEO und der OECD/NEA.

Auf Grundlage der öffentlich zugänglichen Informationen bezüglich Betriebserfahrungen lassen sich allgemeine Punkte ableiten, die jedoch auch wirtschaftlichen Zwängen unterliegen. Diese Punkte sind:

- Möglichst redundanter Aufbau der Anlagen, um bei Ausfall eines Stranges auf den Anderen umschalten zu können
- Regelmäßige und zielgerichtete Prüfungen und Wartungen (der bisherige Umfang ist nicht feststellbar)
- Vorhaltung von Ersatzteilen auf der Anlage

Im Hinblick auf Forschungsvorhaben zur geothermischen Energieerzeugung lässt sich aus Sicht der technischen Anlage empfehlen, dass vor allem Forschungsvorhaben:

- zur standortangepassten Werkstoffentwicklung bzw. -auswahl zur Vermeidung oder Verminderung von Korrosion und Abrasion,
- zur frühzeitigen Detektierung von Korrosion und Abrasion,
- zum Einsatz von Inhibitoren, Filterung, Druckhaltung u. a. zur Vermeidung oder Verminderung von Scale-Bildung und daraus folgender Abrasion oder Wirkungsgradminderung,
- zur Verbesserung der Zuverlässigkeit der Förderpumpen

fortgesetzt werden.

10.5 Kompartiment “Umwelt“

In der Vorerkundungsphase (seismische Erkundung der unterirdischen Schichten) ist nicht mit einer Überschreitung von Grenzwerten aufgrund der Einwirkungen von Wirkfaktoren auf Schutzgüter zu rechnen. Für geothermische Anlagen sind die hervorgerufenen potentiellen Umweltauswirkungen im Normalbetrieb während der Erschließungs- und Betriebsphase nach dem Stand der Technik vertretbar. Vor allem die oberirdischen Wirkfaktoren sind bekannt und gut kontrollierbar. Die unterirdischen Wirkfaktoren sind schwerer zu detektieren und zu beheben, wenn Störfälle auftreten. Zum Nachbetrieb der Anlagen existieren bislang wenige Erfahrungen. Ein Kenntnistransfer aus vergleichbaren Industriezweigen ist angeraten. Wirkfaktoren sind immer standortspezifisch. Eine Verallgemeinerung von Auswirkungen ist deshalb nicht gestattet. Im Folgenden wird näher auf einzelne Wirkfaktoren bzw. Prozesse eingegangen.

In der Erschließungsphase führt die Erstellung des Bohrplatzes und möglicher Zufahrtsstraßen zu einem Abtrag oder einer Verdichtung des Bodens. Dieser Prozess ist wie bei allen Bauvorhaben unumgänglich und dient u. a. dem Schutz des Grundwassers. Bei Nichtfündigkeit kann der Boden wieder eingebracht und der Bohrplatz rückgebaut bzw. renaturiert werden.

Die Lärmentwicklung während der Erschließungsphase muss die Vorgaben der TA-Lärm einhalten. Durch Schallschutzwände und -gehäuse kann der Lärmpegel signifikant verringert werden. Lärmintensive Arbeiten und Lkw-Fahrten sollten nicht in der Nacht durchgeführt werden. Durch die Höhe des Bohrturmes und einen 24-Stunden

Bohrbetrieb kommt es zu einer visuellen Beeinträchtigung des Landschaftsbildes und einer Lichtemission bei Nacht. Dieser Umstand ist temporär.

Ein oberflächlicher Schadstoffeintrag in den Boden oder das oberflächennahe Grundwasser ist während der Erschließungsphase im Normalbetrieb durch einen nach WEG-Vorgaben erstellten Bohrplatz nicht gegeben. Ein Schadstoffausstoß in die Luft wird hauptsächlich durch Baumaschinen, Lkws und Generatoren hervorgerufen. Ausgasungen aus Prozesswässern in die Umgebungsluft werden durch Gasabscheider unterbunden. Der direkte Eintrag von Schadstoffen in anstehende Tiefenwässer, die durch ihre Zusammensetzung ein höheres Gefährdungspotenzial aufweisen als die eingebrachten Prozesswässer, wird als vertretbar angesehen und führt nicht zu einer Degradierung der Tiefenwässer (Ausnahme Molassebecken).

Für den Bohrbetrieb wird Frischwasser zum Anmischen der Bohrspülung und möglicher Stimulationsfluide benötigt. Dieses Wasser verbleibt im Untergrund oder wird bei Rückförderung durch Servicefirmen fachkundig entsorgt. Das Verpressen in so genannte Disposalbohrungen wird allerdings als bedenklich angesehen und sollte einer genaueren Untersuchung unterzogen werden.

Durch Stimulationsmaßnahmen erzeugte Risse in Tiefen > 2.000 m erreichen nach derzeitigem Kenntnisstand nicht oberflächennahe Grundwasserleiter. Hebungsprozesse durch quellende Gesteinsschichten sind bei großen Lagerstättentiefen aufgrund des geringen Quelldruckes im Gegensatz zum lithostatischen Druck ausgeschlossen. Umläufigkeiten im Ringraum müssen durch entsprechende technische Maßnahmen und deren Überprüfung ausgeschlossen werden.

Es sollte darauf hingewirkt werden, die internen Sicherheitsstandards (Sicherheitsmanagement-Systeme) der Bohr- und Serviceunternehmen (z. B. Spülungsservice) zu vereinheitlichen und ein verbindliches Sicherheitsniveau länderübergreifend vorzugeben.

In der Betriebsphase muss die Geothermieanlage die Vorgaben der TA-Lärm einhalten /MEI 12a/. Die Versiegelung des Anlagengeländes dient dem Boden- und Grundwasserschutz. In bestimmten Betriebszuständen kommt es z. B. bei der Anlage in Landau zu einem Dampfaustrag in die Atmosphäre. Dieser Prozess kann zu einer visuellen Beeinträchtigung führen, ist jedoch auf wenige Betriebsstunden und spezielle Betriebs-situationen begrenzt.

Der Ringraum der Produktions- und Injektionsbohrung wird im Falle des Aufsteigens von Thermalwässern aus dem Untergrund (Störfall) in oberflächennahe Schichten als potenzieller Hauptfließweg angesehen. Nach Erstellen der einzelnen Rohrfahrten ist eine Integritätsprüfung des Verbundsystems aus Verrohrung und Zementation in der Bergverordnung vorgeschrieben /NRW 06/, /WEG 14/. Im Anlagenbetrieb gilt das allgemeine Prinzip der Schadensvorsorge (siehe u. a. § 55 Abs. 1 BBergG). Die Integrität muss deshalb durch Monitoringmaßnahmen und Prüfungen im Anlagenbetrieb sichergestellt werden. Im Regelwerk ist ein solches Monitoring während des Betriebs bisher nicht vorgesehen.

Bei Gewährleistung der Integrität stellt das Verbundsystem der Bohrung im Normalbetrieb einen ausreichenden Schutz vor der Migration von Thermalwasser in oberflächennahe Grundwasserleiter dar/GTV 11/. Aus diesem Grunde sollte auf dem Gebiet der Zementation bzw. der Bohrlochverschlüsse weiter geforscht werden, damit das Risiko des Versagens der Bohrungsintegrität durch Korrosion oder mechanische Prozesse in der Betriebs- und vor allem in der Nachbetriebsphase so weit wie möglich minimiert wird. Die Entwicklung neuer Bohrlochverschlusstechniken, bestehend aus einer Kombination von langzeitstabilem quellfähigem Bentonit, in Alternanz mit zementierten Bohrlochabschnitten könnte eine Lösung für die bisher noch offene Frage des Langzeitverhaltens zementierter Bohrlochverschlüsse in der Nachbetriebsphase sein. Bentonit, ein natürliches Dichtmaterial ist im Gegensatz zum heute verwendeten Zement langzeitstabil. Mit Bentonit verfüllte Bohrlochabschnitte können den freien Fluss von Lösungen zuverlässig und dauerhaft verhindern, weil Bentonit bei Kontakt mit Wasser quillt, sein Volumen stark vergrößert und somit selbsttätig zum Verschließen von Wasserwegsamkeiten führt. Die heute übliche Zementation ist dagegen problembehaftet. Beton, egal welcher Rezeptur, ist i. d. R. in der geologischen Umgebung, in die er eingebracht wird, nicht langzeitstabil. Je nach Rezeptur und Porenvolumen wird jeder Beton schneller oder langsamer zersetzt. Damit verliert er auf lange Sicht seine Dichtwirkung. Eine Kombination mit dem natürlichen Dichtmaterial Bentonit scheint deshalb empfehlenswert.

Senkungsprozesse an der Geländeoberfläche durch eine Entnahme des Thermalwassers oder die Lösung von Gesteinen (Kavernenbildung) wird durch die Reinjektion des Thermalwassers unterbunden. Zudem sind Senkungsprozesse durch die Abkühlung des Untergrundes sehr marginal und somit vernachlässigbar. Da Tiefengeothermie-Anlagen in Deutschland das anstehende Thermalwasser aus der Tiefe fördern und wieder reinjizieren, wird kein Frischwasser in der Betriebsphase benötigt bzw. ver-

braucht. Die Auswirkungen einer steigenden und langzeitlichen Energieentnahme aus der gleichen Lagerstätte, z. B. auf die Hydraulik (z. B. Malmaquifere im Molassebecken), sind noch nicht absehbar. Langzeiterfahrungen von hydrothermalen Geothermieranlagen im Pariser Becken zeigen, dass auch nach der veranschlagten Lebensdauer von ca. 30 Jahren eine längere geothermale Nutzung der Bohrungen zu erwarten ist. Thermale Einflüsse auf das Tiefengestein, oberflächennahe Bodenschichten und Grundwasserleiter sind sehr gering und damit vernachlässigbar.

In der Nachbetriebsphase bzw. beim Rückbau einer Geothermieranlage ist zu beachten, dass einige Anlagenbauteile durch radioaktive Scale kontaminiert sein können und gesondert entsorgt werden müssen.

Besonders beim Rückbau und Verfüllen der Bohrung muss besondere Sorgfalt gelten, damit eine Alteration der Abdichtung in der Nachbetriebsphase ausgeschlossen ist. Hier sollte besonders auf dem Gebiet der Verfüllmaterialien weiter geforscht werden.

Die Verbesserung der Akzeptanz tiefegeothermischer Projekte kann durch den Einsatz eines unabhängigen Kontrolleures gesteigert werden. In England ist z. B. seit 1996 festgelegt, dass die Integrität von Offshore- und Onshore-Bohrungen von einer unabhängigen und sachkundigen Person geprüft werden muss. Der Prüfer kann die Ergebnisse der Drucktests und CBLs (Cement Bond Logs) einsehen und bei Bedenken diese an die zuständige Behörde weiterleiten.

Die Thermalsolen einiger deutscher Geothermie-Provinzen sind durch eine erhöhte Aktivitätskonzentration natürlicher Radionuklide charakterisiert. Im Verlauf der Förderung und energetischen Nutzung kommt es zur Fällung von Mineralien mit vergleichsweise hohen Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide. Neben den resultierenden technischen Problemen sind im Sinne eines umfassenden Arbeitsschutzes und Schutzes der Bevölkerung Untersuchungen einer möglichen erhöhten Strahlenexposition erforderlich.

Nach Sichtung der vorhandenen Untersuchungsergebnisse können in begründeter Weise Anlagen im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens davon ausgenommen werden. Die dort erschlossenen Thermalwasseraufkommen sind als gering mineralisierte karbonatische Wässer der verkarsteten Malmaquifere charakterisiert und zeich-

nen sich durch niedrige Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide aus. Infolge dessen kommt es in den übertägigen Anlagenteilen nicht zu einer nennenswerten Ablagerung von mineralischen Rückständen. Eine erhöhte Strahlenexposition von Beschäftigten und Einzelpersonen ist nach gegenwärtigem Kenntnisstand dort nicht zu besorgen.

Eine Reihe von Anlagen der reinen Wärmeerzeugung durch Tiefengeothermie nutzen Thermalwasserhorizonte meist geringerer Temperatur und Salinität (Anlagen in Waren und Prenzlau). Auch für diese gibt es gegenwärtig keine Hinweise für erhöhte natürliche Radioaktivität des Thermalwassers oder entstehender Rückstände. Standortspezifische Untersuchungen konnten im Vorhaben nicht durchgeführt werden.

Das Auftreten von NORM bei der Nutzung von echten petrothermalen Systemen kann gegenwärtig nur gemutmaßt werden.

In einigen wenigen Anlagen der Tiefengeothermie im Oberrheingraben und im Norddeutschen Becken führen inwandige Ablagerungen zu erhöhten Dosisleistungen im Bereich des übertägigen Betriebsteils und zum Anfall von radioaktiven Rückständen, die einer geordneten Beseitigung oder Verwertung zugeführt werden müssen. Der Umgang mit derartigen Rückständen und der Strahlenschutz bezüglich NORM zum Schutz der Beschäftigten und der Bevölkerung vor erhöhten Strahlenexpositionen wird in Deutschland durch die Kombination aus eigenverantwortlicher Überwachung der Industriebranche und den Vorschriften der Strahlenschutzverordnung in angepasster Weise geregelt. Entsorgungsoptionen werden erfolgreich genutzt. Bis auf wenige Ausnahmen können Rückstände aus der Überwachung und damit dem Geltungsbereich der Strahlenschutzverordnung entlassen werden. Die bisherigen Erfahrungen mit der Entlassung von NORM-Rückständen aus der behördlichen Überwachung durch Einhaltung restriktiver Dosisrichtwerte in Deutschland sind positiv. Zahlreiche Untersuchungen haben den Kenntnisstand erweitert und sind bei der Entwicklung des Regelwerkes berücksichtigt worden. Bei einer unverändert restriktiven Haltung der Entsorgungswirtschaft bezüglich der Annahme von aus der Strahlenschutzüberwachung entlassenen Rückständen ist jedoch zukünftig mit erheblichen Schwierigkeiten bei der Entsorgung dieser Rückstände zu rechnen. Für Rückstände, bei denen die Freisetzung nicht-radioaktiver Kontaminaten eine ausschlaggebende Rolle spielt und bestimmte Beseitigungsoptionen ausschließt, sind auch zukünftig alternative Entsorgungsoptionen unter Einsatz spezieller Immobilisierungsstrategien zu prüfen. Für den Anteil der zu erwartenden NORM-Rückstände, die nicht aus der Strahlenschutzüberwachung entlassen wer-

den können und als NORM-Abfälle zu beseitigen sind, ergibt sich die zwingende Notwendigkeit, ausreichende, geeignete Endlagermöglichkeiten und Kapazitäten zu schaffen - ein Problem das gleichermaßen alle NORM-Rückstände verschiedenster Industriezweige betrifft.

Im Sinne eines umfassenden Arbeitsschutzes können beim Betrieb von Anlagen der Tiefengeothermie Maßnahmen des Strahlenschutzes erforderlich sein. Anders als bei den ausdrücklich in Anlage XI StrlSchV genannten Arbeitsfeldern trifft den Betriebsstätteninhaber/Arbeitgeber - zumindest nach den Regelungen der StrlSchV - keine automatische Pflicht zur Expositionsabschätzung seiner Beschäftigten. Vorliegende Dosisabschätzungen sowie die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten probabilistischen Analysen zeigen, dass Überschreitungen der zulässigen effektiven Jahresdosen nicht oder nur in unwahrscheinlichen Fällen zu besorgen sind. Im Verlauf des Vorhabens wurden keine unzulässig hohen Jahresdosen von Beschäftigten bekannt. Allerdings muss einschränkend angemerkt werden, dass der Zugang zu sensiblen personenbezogenen Daten der Jahresdosen sehr eingeschränkt ist und die Kenntnisse auf Gesprächen mit Betreibern beruhen. Aufgrund stark variierender Expositionsrandbedingungen sind anlagenspezifische Einzelfallbetrachtungen erforderlich. Szenarienbeschreibungen, welche die Variabilität der möglichen relevanten Eingangsparameter der Dosisabschätzung abdecken, können in Verbindung mit probabilistischen Analysen hier helfen, erste Abschätzungen frühzeitig vornehmen zu können – ein solches Vorgehen sollte auch auf behördliche Akzeptanz hin überprüft werden. Zur Schließung von Kenntnislücken werden bereits weitere Vorhaben durch den Zuwendungsgeber gefördert.

In Mediationsverfahren äußerten Bürger ihre Besorgnis über eine mögliche Erhöhung der Freisetzung, einen vermehrten Transport aus dem Untergrund und nachfolgend eine gesundheitlich bedenkliche Anreicherung von Radon in Gebäuden durch den Betrieb von geothermischen Kraftwerken. Ein diffusiver Aufstieg von Fluiden und Radon durch die Deckgebirgsschichten kann ausgeschlossen werden. Aus Bergbaudisziplinen mit intensiver Schaffung von untertägigen Hohlräumen sind Setzungserscheinungen bekannt, die, wenn sie oberflächlich wirksam werden, Schäden an erdberührenden Teilen von Bauwerken verursachen können. Entlang von derartig geschaffenen Wegsamkeiten im Fundament kann Radon aus der Bodenluft des nahen Umfeldes in das Gebäude migrieren. Da die aus Tiefen von > 3.000 m geförderten Thermalwässer in den als Dubletten ausgeführten Geothermalkraftwerken nach Wärmeentzug reinjiziert werden, sind Setzungen nicht zu besorgen.

Es ist nicht zu erwarten, dass in der Tiefengeothermie Radon-Arbeitsplatzkonzentrationen von $> 300 \text{ Bq m}^{-3}$ verbreitet in Anlagen auftreten. Der mögliche Zutritt von Radon aus dem Baugrund und die Ausbildung möglicher erhöhter Innenraumaktivitätskonzentrationen in oberflächliche Anlagen- und Gebäudeteile von Geothermieanlagen werden durch die bekannten Prozesse wie Ankopplung an den Untergrund, Lüftung und Ausbildung eines Druckgradienten kontrolliert.

Radium-haltige Rückstände aus Reinigungsarbeiten stellen potenzielle Radon-Quellen dar. Die vorübergehende Lagerung dieser Rückstände in definierten Verwahrbereichen außerhalb der Maschinenhallen auf dem Betriebsgelände gewährleistet, dass in Räumen mit Aufenthalt von Beschäftigten unzulässig hohe Radonkonzentrationen vermieden werden.

Die Vermittlung eines behördlich geregelten und gesicherten Umgangs mit Materialien mit erhöhten Gehalten natürlicher radioaktiver Stoffe ist hierzulande selbst bei äußerst sachgerechter Darstellung schwierig und stößt bei der Bevölkerung auf Vorbehalte und Misstrauen. Es wird empfohlen, ein hohes Maß an Transparenz bei der Beschreibung von Vorgängen und Prozessen im Rahmen des Betriebes geothermaler Anlagen zu zeigen. Vergleichsmaßstäbe müssen behutsam eingeführt werden und sollen nicht vom eigentlichen Sachverhalt ablenken.

Keinesfalls sollte der Eindruck entstehen, dass die Eigenverantwortung des Betreibers die Behörde aus der Aufsichtspflicht entlässt.

Es ist nicht Aufgabe der zuständigen Behörde, den privatwirtschaftlichen Betrieb einer Geothermieanlage durch Stellungnahmen zur Thematik zu fördern. Gleichwohl erscheint es geboten, dass Behörden auch im Fall der Einhaltung von Grenz- und Richtwerten ihrer Informationspflicht proaktiv nachkommen.

Die Bestrebungen der Betreiber, offen mit der für ihren Industriezweig „Erneuerbare Energien“ zunächst sicherlich unerwartet bedeutsamen Thematik umzugehen, sind anzuerkennen.

Auf europäischer Ebene rücken Anlagen der geothermalen Energiegewinnung durch explizite Nennung als Industriezweig, in denen natürlich vorkommende radioaktive Materialien auftreten in der am 5. Dezember 2013 verabschiedeten Richtlinie 2013/59/Euratom in den Fokus der regulatorischen Kontrolle. Der Schutz von Beschäf-

tigten und Personen der Bevölkerung vor ionisierender Strahlung infolge z. B. eines Umgangs mit NORM wird zukünftig nicht mehr wie bislang in einem separaten Teil (Teil 3 BSS 96/29 EURATOM) geregelt sondern vollständig in das Gesamtsystem des Strahlenschutzes integriert. Expositionen von Arbeitskräften oder Einzelpersonen der Bevölkerung, die unter Strahlenschutzgesichtspunkten nicht außer Acht gelassen werden können, sind danach zu ermitteln. Die erforderliche Ausgestaltung des nationalen Rechtsrahmens bezüglich des Schutzes von Beschäftigten und Einzelpersonen der Bevölkerung infolge Handhabung und Beseitigung oder Wiederverwendung von NORM bis zum 06. Februar 2018 kann durch Bearbeitung entsprechender Einzelfragestellungen auch für den Sektor Geothermie unterstützt werden. Die in Richtlinie 2013/59/Euratom allgemein eingeführte Abgrenzung geplanter von existierenden Expositionssituationen auch im Zusammenhang mit der Exposition durch Radon / Radon-Folgeprodukte an Arbeitsplätzen sollte ebenso wie die sich aus den aktuellen Empfehlungen und Überlegungen der ICRP ergebenden abgesenkten Referenzwerte für Radon an Arbeitsplätzen für die geothermalen Energienutzung thematisch vertieft werden.

11 Literaturverzeichnis

Vor dem Hintergrund unterschiedlicher fachlicher Zitierweise im naturwissenschaftlich-technischen und im juristischen Bereich ist das Literaturverzeichnis in zwei entsprechende Abschnitte aufgeteilt.

11.1 Verzeichnis der im naturwissenschaftlich-technischen Bereich zitierten Literatur

- /ADR 13/ United Nations (2012): European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. - ADR applicable as from 1 January 2013.
- /AHO 89/ Ahorner, L. (1989): Seismologische Untersuchung des Gebirgsschlags am 13. März 1989 bei Völkershausen (DDR) im Kalibergbaugebiet an der Werra. - Kali und Steinsalz, Band 10, Heft 4/4, Seiten 110-116.
- /AKE 05/ Ake, J.; Mahrer, K.; O'Connel, D.; Block, L. (2005): Deep-Injection and Closely Monitored Induced Seismicity at Paradox Valley, Colorado. - Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 95 (2), pp. 664-683.
- /AND 12/ Andruleit, H. et al.(2012): Abschätzung des Erdgaspotenzials aus dichten Tongesteinen (Schiefergas) in Deutschland. - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, Mai 2012.
- /API 09/ API (2009): API guidance document HF1 - Hydraulic fracturing operations: well construction and integrity guidelines. - American Petroleum Institute: Washington DC.
- /API 09a/ API (2009): Heat Transfer; Plattenwärmeübertrager in Geothermieranlagen. - Vortrag im Rahmen des Geothermiekongress in Bochum, 2009.
- /APP 11/ Appelhans, K. (2011): Bilanzierung der stofflichen Einträge bei der Stimulierung des Untergrundes zur tiefengeothermischen Nutzung. - Bachelorarbeit erstellt an der Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

- /ARN 06/ Arning, E., Kölling, M., Panteleit, B., Reichling, J., Schulz, H. D. (2006): Einfluss oberflächennaher Wärmegewinnung auf geochemische Prozesse im Grundwasserleiter. - Grundwasser Vol. 11, S. 27-39, DOI 10.1007/s00767-006-0116-0.
- /ASM 04/ ASME, S.S.C. (2004): Drilling Fluids Processing Handbook. - 700 Seiten, ISBN 978-0-7506-7775-2, November 2004.
- /BAC 03/ Bächler, D.; Kohl, T.; Rybach, L. (2003): Impact of graben-parallel faults on hydrothermal convection - Rhine Graben case study. - Physics and Chemistry of the Earth. 2003, 28.
- /BAC 12a/ Bachmann, C.; Wiemer, S.; Goertz-Allmann, B.P.; Woessner, J. (2012): Influence of pore pressure on the size distribution of induced earthquakes. - Geophysical Research Letters, Vol. 38, L09308.
- /BAC 12b/ Backers et al. (2012): Reservoirerschließung bei tiefengeothermischen Projekten - Planung, Vorbereitung und Durchführung von geothermischen Tiefbohrungen. - Enerchange: Freiburg, Juli 2012.
- /BAC 89/ Bachmann, G.H.; Grosse, S. (1989): Struktur und Entstehung des Norddeutschen Beckens - Geologische und geophysikalische Interpretation einer verbesserten Bouguer-Schwerekarte. - Veröffentlichungen der Nds. Akad. Geowiss.
- /BAI 02/ Baisch, S.; Bohnhoff, M.; Ceranna, L.; Tu, Y.; Harjes., H.-P. (2002): Probing the Crust to 9-km Depth: Fluid-Injection Experiments and Induced Seismicity at the KTB Superdeep Drilling Hole, Germany. - Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 92 (6), pp. 2369-2380.
- /BAI 03/ Baisch, S.; Weidler, R.; Tenzer, H. (2003): Injektionsinduzierte Seismizität zur Kartierung der hydraulischen Ankopplung am Beispiel des HDR-Reservoirs Bad Urach. - Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Jena, 2003.
- /BAI 03a/ Baisch, S.; Harjes, H.-P. (2003): A model for fluid injection induced seismicity at the KTB. - Geophys. Jour. Int., Vol. 152, pp. 160-170.

- /BAI 04/ Baisch, S.; Weidler, R.; Vörös, R.; Tenzer, H.; Teza, D. (2004): Improving hydraulic stimulation efficiency by means of real-time monitoring. - Proc. 29th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford CA.
- /BAI 06a/ Baisch, S.; Weidler, R.; Vörös, R.; Wyborn, D.; Degraaf, L. (2006): Induced seismicity during the stimulation of a geothermal HFR reservoir in the Cooper Basin (Australia). - Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 96 (6), pp. 2242-2256.
- /BAI 06b/ Baisch, S.; Weidler, R.; Vörös, R.; Jung, R. (2006): A conceptual model for post-injection seismicity at Soultz-sous-Forêts. - Geothermal Resources Council, Trans., Vol. 30, pp. 601-606.
- /BAI 08/ Baisch, S.; Vörös, R. (2008): Seismic Risk Associated with the Stimulation of Geothermal Reservoirs: A Case Study of the Deep Reservoir at Soultz-sous-Forêts. - Studie im Auftrag des Leibniz-Instituts für angewandte Geophysik, Hannover.
- /BAI 09a/ Baisch, S. et al. (2009): Deep Heat Mining Basel - Seismic Risk Analysis. - Studie im Auftrag des Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie, Basel, Schweiz.
- /BAI 09b/ Baisch, S. et al. (2009): Deep Heat Mining Basel - Seismische Risikoanalyse - Kurzfassung. - Studie im Auftrag des des Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, Amt für Umwelt und Energie, Basel, Schweiz. - abrufbar unter <http://www.wsu.bs.ch/serianex.pdf> (03.04.2013)
- /BAI 09c/ Baisch, S. (2009): Induzierte Seismizität in Geothermischen Reservoiren: Warum, Wo und wie stark? - Beitrag "Der Geothermiekongress 2009" Bochum, Germany, 17-19 November 2009. - abrufbar unter http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/aktuelles/Geothermiekongress/vortraege/EV_Baisch.pdf (26.03.2013).
- /BAI 10/ Baisch, S.; Vörös, R.; Rothert, E.; Stang, H.; Jung, R.; Schellschmidt, R. (2010): A numerical model for fluid injection induced seismicity at Soultz-sous-Forêts. - Int. Jour. Rock Mech. & Min. Sci., Vol. 47 (3), pp. 405-413.

- /BAR 85/ Barneich, J.A. (1985): Vehicle induced ground motion. - In: Gazetas, G.; Selig, E.T. (eds): Vibration problems in geotechnical engineering. Special Publication of ASCE, 1985, pp. 187-202.
- /BAR 86/ Barbier, E. (1986): Technical – Economic Aspects of the Utilization of geothermal Waters. - Geothermics, Vol. 15, 1986 (ID 150).
- /BAR 89/ Baria, R.; Green, A.S.P.; Jones, R.H. (1989): Anomalous Seismic Events Observed at the CSM HDR Project, U.K. - Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 26 (3-4), pp. 257-269
- /BAS 04/ Basel-Landschaft, K. (2004):Stand vom Baselland. - erreichbar unter: <http://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/pics/docs/parl-lk/vorlagen/2004/v188/grafik2.gif>, zitiert am 25.03.2014.
- /BAU 11/ Baumgärtner, J. (2011); Wie funktioniert ein Geothermiekraftwerk? Welche Betriebsmittel finden sich im Kraftwerksteil? Das Beispiel Landau. - Vortrag im Rahmen der 3. Sitzung des Mediationsteams Tiefe Geothermie Vorderpfalz, 2011.
- /BAY 10/ Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2010): Bayerischer Geothermieatlas. - 93 S., München. - abrufbar unter http://www.stmwivt.bayern.de/fileadmin/Web-Dateien/Dokumente/energie-und-rohstoffe/Bayerischer_Geothermieatlas.pdf (11.07.2013)
- /BBG 80/ Bundesberggesetz – BBergG vom 13. August 1980
- /BDJ 05/ Bundesministerium der Justiz (2005): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Änderung der Verwaltungsvorschrift wassergefährdende Stoffe, Nummer 142a. Berlin, 30. Juli 2005.
- /BDJ 09/ Bundesministerium der Justiz (2009): Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 6. Oktober 2011 (BGBl. I S. 1986) geändert worden ist. Berlin.

- /BDJ 13/ Bundesministerium der Justiz (2013): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG). Editor: Bundes-Immissionsschutzgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Mai 2013 (BGBl. I S. 1274), d.d.A.d.G.v.J.B.I., Bundesministeriums der Justiz: Berlin, Stand vom 17. Mai 2013.
- /BDJ 80/ Bundesministeriums der Justiz (1980): Bundesberggesetz (BBergG), vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), das zuletzt durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585) geändert worden ist.
- /BDJ 99/ Bundesministerium der Justiz (1999): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Wasserhaushaltsgesetz über die Einstufung wassergefährdender Stoffe in Wassergefährdungsklassen. Nummer 98a: Berlin, 29. Mai 1999.
- /BEL 06/ Belohlavek, K.-U. et al. (2006): Leitfaden - Futterrohrberechnung. - Vol. 18, Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V., Juni 2006.
- /BEN 04/ Bentz, D.P.; Jensen O.M. (2004): Mitigation strategies for autogenous shrinkage. - Cement and Concrete Composites, Vol. 26 (6), S. 677-685.
- /BER 13/ Berkeley National Laboratory (2013): Tough. TOUGHREACT Licensing & Download. [Online] 15. 10 2013.
<http://esd.lbl.gov/research/projects/tough/licensing/toughreact.html>.
- /BET 13/ Bethke, C.M.; Yeakel, S. (2013): The Geochemist's Workbench - Reactive Transport Modelling Guide. - Aqueous Solutions LCC, 2013.
- /BGR 13/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Karte der Epizentren der Schadenbeben in der Bundesrepublik Deutschland und angrenzenden Gebieten der Jahre 800 bis 2010. - Abrufbar unter http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Erdbeben-Gefahrdungsanalysen/Seismologie/Downloads/karte-epizentren-schadenbeben-800-2010.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (08.04.2013)

- /BGR 14/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2013): Stand von 2013. - erreichbar unter: http://www.bgr.bund.de/Genesys/DE/Bilder/2010-12-21-stratigraphie-bohrungsausbau_g.jpg%3F__blob%3Dnormal%26v%3D1, zitiert am 26.11.2013.
- /BIM 00/ Zwölfte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Störfall- Verordnung - 12. BImSchV) Störfall-Verordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 8. Juni 2005 (BGBl. I S. 1598), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 14. August 2013 (BGBl. I S. 3230) geändert worden ist"
- /BIS 10/ Bischoff, M.; Cete, A.; Fritschen, R.; Meier, T. (2010): Coal Mining Seismicity in the Ruhr Area, Germany. - Pure Appl. Geophys., Vol. 167, pp. 63-75.
- /BLO 08/ Blöcher, G. et al. (2008): Modelling of pore pressure response due to hydraulic stimulation treatments at the geothermal research doublet EGRSK3/90 and GTGRSK4/05 in summer 2007. - Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford : s.n., 2008.
- /BLÖ 10/ Blöcher, G.; Zimmermann, G.; Moeck, I.; Brandt, W.; Hassanzadegan, A.; Magri, F. (2010): 3D numerical modeling of hydrothermal processes during the lifetime of a deep geothermal reservoir. - Geofluids, Vol. 10 (3), pp. 406-421.
- /BLO 94/ Bloys, B. et al. (1994): Designing and Managing Drilling Fluid. - Oilfield Review, Vol. 6, No. 2, S. 33-43, 03.01.1994
- /BLU 10/ Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M. (2010): Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Edition, 570 Seiten, ISBN 978-3-8274-1444-1, Springer Spektrum.
- /BMU 11/ BMU (2011): Geothermische Stromerzeugung – Kraftwerkstechnologien und Technologien zu gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme; 2011 (ID 291).

- /BMU 11/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2010): Broschüre „Tiefe Geothermie - Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland“. - Stand: September 2011; abrufbar unter: https://secure.bmu.de/fileadmin/bmuimport/files/pdfs/allgemein/application/pdf/-broschuere_geothermie_tief_bf.pdf (28.03.2013)
- /BMU 12/ BMU(2011): Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2011; Juli 2012.
- /BOM 06/ Bommer, J.; Oates, S.; Cepeda, J.M.; Lindholm, C.; Bird, J.; Torres, R.; Marroquín, G.; Rivas, J. (2006): Control of Hazard due to Seismicity by a hot Fractured Rock Geothermal Project. - Eng. Geol., Vol. 83, pp. 287-306.
- /BÖN 14/ Bönnemann, C.; Krentz, O. (2014): Tiefengeothermie und induzierte Seismizität. - http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/luft/07_Boennemann_Krentz.pdf (13.03.2014)
- /BOR 12/ BorTec (2012): <http://www.bortec.de/de/boronizing>, aufgerufen am 14.12.2012.
- /BPS 12/ B.P.S. Engineering GmbH (2012): Software users manual. EQ3/6, Version 8.0. [Online] 2012. <http://www.dosmod.de/vira.htm>.
- /BRA 11/ Braun, J., Koschitzky, H.-P. (2011): Flache Geothermie - Perspektiven und Risiken, ISBN 978-3-942036-09-2, Universität Stuttgart, VEGAS-Kolloquium Stuttgart.
- /BRA 12/ Bracke, R. (2012): Geothermal Energy – Low Enthalpy Technologies; Vortrag im Rahmen des IV. Congreso Nacional de Energia; San Jose.
- /BUJ 11/ Buja, H.-O. (2011): Handbuch der Tief-, Flach-, Geothermie- und Horizontalbohrtechnik: Grundlagen und Anwendung. ISBN 978-3-8348-1278-0 Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien: Wiesbaden GmbH, April 2011.
- /BWB 13/ Berliner Wasserbetriebe: Grundwasser in Berlin Vorkommen-Nutzung-Schutz-Gefährdung. Berliner Wasserbetriebe: Berlin.

- /CAE 11/ Caenn, R., Darley, H.C.H., Gray, G.R. (2011): Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids Vol. Sixth Edition, ISBN 978-0-12-383858-2 Elsevier Inc.
- /CAL 13/ Calò, M.; Dorbath, C.; Frogneux, M. (2013): Injection tests at the EGS reservoir of Soultz-sous-Forêts. Seismicresponse of the GPK4 stimulations. - Geothermics [article in press]
- /CAS 12/ Castricum, A.; Baker Hughes (2012): Kreiselpumpen der neuesten Generation; Vortrag im Rahmen der Praktikertage Unterhaching, 2012.
- /CEL 04/ Celia, M.A.; Bachu, S.; Nordbotten, J.M.; Gasda, S.; Dahle, H.K. (2004): Quantitative estimation of CO2 leakage from geological storage: Analytical models, numerical models, and data needs, In: E.S.Rubin, D.W.Keith and C.F.Gilboy (Eds.), Proceedings of 7th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies. . Vol. Volume 1: Peer-Reviewed Papers and Plenary Presentations, IEA Greenhouse Gas Programme.: Cheltenham, UK.
- /CHA 07/ Charléty, J. et al. (2007): Large earthquakes during hydraulic stimulations at the geothermal site of Soultz-sous-Forêts. - Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., Vol. 44, pp. 1091-1105.
- /COM 13/ Committee on Induced Seismicity Potential in Energy Technologies et al. (2013): Induced Seismicity Potential in Energy Technologies. - The National Academies Press, Washington, D.C., 248 pp.
http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=13355 (27.02.2013)
- /CRDP 14/ CRDP (2014): BREVE HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'ALSACE. Strasbourg: s.n.
- /CRE 06/ Creel, P. (2006): Geothermal Prospects - Long Term Well Integrity, 28.03.2006.
- /CUE 06/ Cuenot, N.; Charléty, J.; Dorbarth, L.; Haessler, H. (2006): Faulting mechanisms and stress regime at the European HDR site of Soultz-sous-Forêts, France. - Geothermics, Vol. 35, pp. 561-575.

- /CUE 11/ Cuenot, N.; Goerke, X.; Guéry, B.; Bruzac, S.; Meneust, P.; Sontot, O.; Maquet, J. & Vidal, J. (2011): Evolution of the natural radioactivity within the Soultz geothermal installation. Soultz Geothermal Conference, October 5 & 6, 2011.
- /DAH 07/ Dahm, T.; Krüger, F.; Stammer, K.; Klinge, K.; Kind, R.; Wylegalla, K.; Grasso, J.R. (2007): The 2004 M_w 4.4 Rotenburg, Northern Germany, Earthquake and its Possible Relationship with Gas Recovery. - Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 97 (3), pp. 691-704.
- /DAV 12/ Davies, R.J. et al. (2012): Hydraulic fractures: How far can they go? Marine and Petroleum Geology.
- /DEG 09/ Degering, D.; Köhler, M.; Friedrich, H.-J. (2009): Verbundvorhaben : Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen – Teilprojekt: Mobilisierung und Ablagerungsprozesse natürlicher Radionuklide. FKZ 0329937C. Schlussbericht Hauptteil Teil 1: Radioaktivität
- /DEG 10/ Köhler, M.; Degering, D. (2010): Strahlenschutz in Anlagen der Tiefen Geothermie. In: Proceedings of the Annual Conference 2010 of the Fachverband für Strahlenschutz e.v. Borkum. 153-158. FS-2010-153-T.
- /DEG 11/ Degering, D.; Köhler, M.; Genter, A. (2011): Radionuclides in geothermal fluids – origin and applications. Presentation at the 1st Soultz Geothermal Conference, Soultz-sous-Forêts, France, October 5-6, 2011. /GeoSys Lib ID 357/
- /DEP 10/ Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt Basel-Stadt (2010): Abschlussbericht über die Risikoanalyse zum Deep Heat Mining Projekt Basel. - Bericht P070061 an den Regierungsrat, Basel, 26. Mai 2010. Abrufbar unter http://www.wsu.bs.ch/schlussbericht_risikoanalyse.pdf (04.04.2013)
- /DIN 01/ DIN 4150 (2001): Erschütterungen im Bauwesen. - Beuth Verlag, Berlin.

- /DIN 05/ DIN 4149 (2005): Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. - Beuth Verlag, Berlin.
- /DOE 13/ U.S. Department of Energy (DoE) (2013): Website “Induced Seismicity”. - abrufbar unter http://esd.lbl.gov/research/projects/induced_seismicity/ (26.03.2013)
- /DOE 79/ Doehl, F.; Teichmüller, R. (1979): Zur Geologie und Geothermik im mittleren Oberrheingraben. - Fortschr. Geol. Rheinld. u. Westf., Vol. 27, pp. 1-17.
- /DOR 09/ Dorbarth L.; Cuenot, N.; Genter, A.; Frogneux, M. (2009): Seismic Response of the Fractured and Faulted Granite of Soultz-sous-Forêts (France) to 5 km deep massive water injections. - Geophys. J. Int., Vol. 177, pp. 653-675.
- /DUA 08/ Duan, Z.; Li, D. (2008): Coupled phase and aqueous species equilibrium of the H₂O–CO₂-NaCl-CaCO₃ system from 0 to 250°C, 1 to 1000 bar with NaCl concentrations up to saturation of halite. *Geochemica Acta*. 2008, 72.
- /DUP 07/ DuPont (2007): Sicherheitsdatenblatt, DuPont SUVA 134a Refrigerant, 17.07.2007.
- /DUS 01/ Dusseault, M.B., Bruno, M. S., Barrera, J. (2001): Casing Shear: Causes, Cases, Cures. *SPE Drilling & Completion*, June 2001.
- /DVG 08/ DVGW (2008): Bohrungen zur Erkundung, Beobachtung und Gewinnung von Grundwasser. Technische Regel, Arbeitsblatt W 115, Juli 2008.
- /DVG 98a/ DVGW (1998): Sanierung und Rückbau von Bohrungen, Grundwassermessstellen und Brunnen. In: Arbeitsblatt W 135, Editor: W.-u.V.G.u.W.mbH,: Bonn.
- /DVG 98b/ DVGW (1998): Verwendung von Spülmittelzusätzen in Bohrspülungen bei Bohrarbeiten im Grundwasser. In: Technische Mitteilung, Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.: Bonn.

- /ECO 90/ Economides, M.J. et al. (1990): Well Cementing. In: Developments in Petroleum Science, Vol. Volume 28, Erik, B.N. (Editor), S. i, ISBN 0376-7361, Elsevier, 1990.
- /EGG 10/ Eggeling, L. et al. (2010): Das Geothermiekraftwerk Bruchsal – Bau, Inbetriebnahme und erste Ergebnisse; Geothermische Energie, Heft 68, 2010.
- /EGG 11/ Eggeling, L.; Kölbl, T. (2011): Geothermie-Projekt Bruchsal – Stromerzeugung mit dem Kalina-Prozess; Vortrag, 2011.
- /EGG 13/ .Eggeling, L.; Genter, A.; Kölbl, T.; Münch, W. (2013): Impact of natural radionuclides on geothermal exploitation in the Upper Rhine Graben. Geothermics 47 (2013) 80-88.
- /ENG 14/ Engineering Toolbox (2014): Solids - Specific Heats. Engineering Toolbox. [Online] http://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html.
- /ERB 99/ Erbaş, K. (1999): Evaluierung geowissenschaftlicher und wirtschaftlicher Bedingungen für die Nutzung hydrogeothermaler Ressourcen. Vol. Geothermie Report 99-2 STR99/09, Geo Forschungszentrum: Potsdam.
- /ERD 13/ Erdwerk (2013): Geothermie-Projekt Holzkirchen (Hauptbetriebsplan) - Herrichtung Bohrplatz alte Au und Durchführung der Bohrarbeiten Holzkirchen GT1 Geothermie-Projekt Holzkirchen GmbH: Holzkirchen, Januar 2013.
- /ERI 97/ Erikson, G.; Hack, K.; Petersen, S. (1997): Chemapp - A programmable thermodynamic calculation interface. Frankfurt : DGM Informationgesellschaft mbH, 1997. ISBN 3-88355-236-4.

- /EU 85/ Richtlinie des Rates vom 27. Juni 1985 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten (85/337/EWG) (Consolidierte Fassung). Geändert durch: Richtlinie 97/11/EG des Rates vom 3. März 1997 L 73 5 14.3.1997, Richtlinie 2003/35/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Mai 2003 und Richtlinie 2009/31/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009.
- /EVA 11/ Evans, K.F., Zappone, A., Kraft, K., Deichmann, N., Moia, F.(2011): A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. *Geothermics*, Vol. 41, S. 30– 54.
- /EVA 12/ Evans, K.F.; Zappone, A.; Kraft, T.; Deichmann, N.; Moia, F.(2012): A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO2 reservoirs in Europe. - *Geothermics*, Vol. 41, pp. 30-54.
- /EWB 14/ Erdwärme Bayern (2014): <http://www.erdwaerme-bayern.de/faq.htm>, abgerufen am 08.04.2014
- /EWE 12/ Ewen, C., Ewers, U., Frimmel, F.H., Gordalla B. (2012): Humantoxikologische Bewertung der beim Fracking eingesetzten Chemikalien im Hinblick auf das Grundwasser, das für die Trinkwassergewinnung genutzt wird. 29. Mai 2012.
- /EWE 12/ Ewen, C.; Borchardt, D.; Richter, S.; Hammerbacher, R.: (2012); Risikostudie Fracking – Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking-Technologie für die Erdgasgewinnung aus unkonventionellen Quellen (Übersichtsfassung). - Neutraler Expertenkreis, Informations- und Dialogprozess der ExxonMobil über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking-Technologie für die Erdgasgewinnung, 75 S.

- /EXP 10/ Expertengruppe „Seismisches Risiko bei hydrothermaler Geothermie“ (2010): Das seismische Ereignis bei Landau vom 15. August 2009. - Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, Mainz - Abschlussbericht der Expertengruppe vom 29.10.2010, 54 S., Hannover 2010. Abrufbar unter <http://www.mwkel.rlp.de/File/Landau-Abschlussbericht-Expertengruppe-pdf/> (26.06.2013)
- /EXX 10/ Exxon Mobil (2010): Erdgassuche in Deutschland. Stand vom 2010, Exxon Mobil, erreichbar unter: http://www.erdgassuche-in-deutschland.de/technik/hydraulic_fracturing/index.html, zitiert am 26.11.2012.
- /FEL 13/ Feldbusch, E. (2013): Scaling and corrosion processes at GrSk04: Investigations of Bailer and Coiled-Tubing Samples. GeoDat-Projekt Report. Potsdam: s.n., 2013.
- /FIC 08/ Fichter, C., Reinicke, K.M. (2008): CO2 Lagerung im Geogrund: Bohrungsintegrität akzeptabel für CCS, TU Clausthal, Fakultätskolloquium, November 2008.
- /FIC 09/ Fichter, C. (2009): Tiefbohrtechnik - Erschließung von Tiefengeothermischen Wärmespeichern, Institut für Erdöl- und Erdgastechnik, TU Clausthal, GeoTHERM: Offenburg, 2009.
- /FIN 12/ Fink, J.K. (2012): Petroleum Engineer's Guide to Oil Field Chemicals and Fluids. Vol. 1, ISBN 978-0-12-383844-5, Elsevier Inc.
- /FIS 12/ Fisher, K., Warpinski, N. (2012): Hydraulic-Fracture-Height Growth: Real Data. Society of Petroleum Engineers Vol. Volume 27, Number 1, S. 8-19, DOI 10.2118/145949-PA, February 2012.
- /FKPE 12/ Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE) (2012): Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität – Positionspapier des FKPE. - DGG-Mittlg. 3/2012, S. 17-31.

- /FOK 11/ Fokker, P. (2011): Geothermal Energy Production - Issues in coupled modelling and data assimilation. s.l. : European Association of Geoscientists and Engineers, 2011.
- /FOR 13/ Forschungszentrum Geothermie der TUBA Freiberg (2013): Grundlagen der tiefen Geothermie. - http://tu-freiberg.de/ze/geothermie/tg_grundlagen.html (30.07.2013)
- /FRI 12/ Fritschen, R. (2012): Überwachung induzierter Seismizität. - DMT Fachstelle für Erschütterungsmessungen, Foliensatz 2012 - abrufbar unter http://www.geothermiezentrum.de/fileadmin/media/geothermiezentrum/Service/Tagungsunterlagen/Fritschen_Ueberwachung_induzierter_Seismizitaet.pdf (11.07.2013)
- /FRK 07/ Frick, S., Schröder, G., Rychtyk, M., Bohnenschäfer, W., Kaltschmitt, M. (2007): Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung – Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung. Forschungsprojekt FKZ 205 42 110 Forschungsprojekt FKZ 205 42 110 Leipzig.
- /FRK 08/ Frick, S., Kaltschmitt, M. (2008): Ökologische Aspekte der tiefen Erdwärmennutzung - Analyse und Bewertung lokaler Umwelteffekte. pp. 323-328.
- /FRT 10/ Fritzer, T. et al. (2010): Bayerischer Geothermieatlas - Hydrothermale Energiegewinnung. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie: München, Januar 2010.
- /FUC 12/ Fuchs, S.; Förster, A. (2012): Thermal conductivity determination in the North German Basin: New approaches - New results. Geophysical Research Abstracts. 2012, 14.
- /GAL 12/ St. Gallen (2012): Das Geothermie-Projekt der Stadt St.Gallen. erreichbar unter: <http://www.geothermie.stadt.sg.ch/projekt/tiefbohrungen/bohranlage.html#>. UZIPWcosjQw, zitiert am 14.05.2012.

- /GAS 97/ Gassner, E.; Winkelbrandt, A. (1997): UVP. Umweltverträglichkeitsprüfung in der Praxis. - 3. Auflage.- München, Berlin.
- /GBO 14/ GEBO (2014): Fragen und Antworten - Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik. Stand vom 04.04.2009 Technische Universität Clausthal, zitiert am 25.03.2014.
- /GDZ 14/ GeoDZ (2011): GeoDZ ist das umfassende Lexikon rund um unsere Erde - Geologie Geografie Geowissenschaften. Stand vom 09.02.2011, erreichbar unter: <http://www.geodz.com/deu/d/Bohrverfahren>.
- /GEI 12a/ Geisinger, W. (2012): The combined-cycle geothermal plant for generation of power and heat – complex but manageable; Vortrag im Rahmen des Geothermiekongress Freiburg, 2012.
- /GEI 12b/ Geisinger, W. (2012): Report of the thermal water pump at the Unterhaching site: introduced improvements and optimization Potenzial; Vortrag im Rahmen des Geothermiekongress Freiburg, 2012.
- /GEN 10/ Genter, A. et al. (2010): Programme de suivi scientifique et technique de la Centrale géothermique de Soultz pendant l'exploitation. s.l.: GEIE Exploitation minière de la chaleur, 2010.
- /GEO 06/ Geopower Basel (2006): Projekt Deep Heat Mining Basel - Massnahmen zur Überwachung und Kontrolle induzierter Seismizität und Erschütterungen. - Anhang zu /GEO 07/, Teil 3, Pratteln/Basel. - abrufbar unter <http://www.wsu.bs.ch/teil3.pdf> (12.07.2013)
- /GEO 07/ Geothermal Explorers Ltd. (2007): Projekt Deep Heat Mining Basel - Beantwortung der Fragen der Behörden des Kantons Basel-Stadt vom 15. Dezember 2006 zum induzierten Erdstoss vom 8. Dezember 2006 in Basel. - Bericht im Auftrag der Geopower Basel AG, Geothermal Explorers Ltd., Pratteln. - Zusammenfassung, Inhaltsverzeichnis sowie Teile 1-4 abrufbar unter <http://www.wsu.bs.ch/geothermie> (12.07.2013, Stichwort „Geopower-Bericht 05.01.07“)

- /GEO 12/ Bems, C. (2012): Forschungsprojekt zur Erforschung der Verbesserung eines tiefeingeothermischen Systems im Allgäu (Hauptbetriebsplan) Geothermie Allgäu 2.0. Geysir Europe GmbH: Grünwald.
- /GEO 13/ GeORG-Projektteam (2013): Geopotenziale des tieferen Untergrundes im Oberrheingraben, Fachlich-Technischer Abschlussbericht des Interreg-Projekts GeORG, Teil 4: Atlas. - abrufbar unter <http://www.geopotenziale.org/products?lang=1> (01.08.2013).
- /GES 13/ GESTIS-Stoffdatenbank (2013): <http://gestis.itrust.de/>, abgerufen am 30.11.2013
- /GFZ 99/ Naumann, D., Erzinger, J., Erbas, K., Faber, E. (1999): Gasanalytik am Thermalwasser der Geothermie-Anlage Neustadt-Glewe - Ergebnisse und Rekonstruktion der Genese anhand der Isotopie. - In: Schallenberg, K., Erbas, K., Huenges, E., Menzel, H. (Eds.), Geothermisches Heizwerk Neustadt-Glewe: Zustands- und Stoffparameter, Prozeßmodellierungen, Betriebserfahrungen und Emissionsbilanzen, (Scientific technical report; 99/04), Geoforschungszentrum, p. 87-102.
- /GNT 10/ Gesellchen, A. (2010): Geothermie-nachrichten. Stand vom 30.06.2010, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, erreichbar unter: http://www.geothermie-nachrichten.de/wp-content/uploads/2010/06/Geothermiekraftwerk_7.jpg, zitiert am 25.03.2014.
- /GRI 89/ Griesmeyer, J.M.;Smith, L.N. (1989): A Reference Manual for the EVENT Progression Analysis Code (EVNTRE) NUREG/CR-5174, Sept. 1989.
- /GRO 12/ Groos, J.; Richter, J. (2012): Detection and analysis of the microseismic activity near the city of Landau, Upper Rhine Graben, Germany. - FKPE-LFZG Workshop "Induced Seismicity", 26. - 28. November 2012, Karlsruhe.
- /GRS 14/ Moog, H.C. & Vannepin, R. (2014): Entwicklung von thermodynamischen Daten für die Belange der thermodynamischen Gleichgewichtsmodellierung von Prozessen in tiefen, geothermalen Schichten. Teilprojekt A (GRS): Bestimmung von Ionenwechselwirkungskoeffizienten und Aufstellung eines Reservoirmodells. GRS-A-Bericht Nr. 3749. Köln / Braunschweig

- /GRS 10a/ Feige, S.; Weiss, D.; Roloff, R. (2010): Recherche zur Art, Aufkommen und Eigenschaften von NORM-Rückständen im Ausland, Abschätzung der Strahlenexposition der Bevölkerung bei der Deponierung bzw. Verwertung. GRS-A-Bericht Nr. 3571.
- /GRS 10b/ Weiß, D. (2010): Untersuchungen zu aktuellen Fragestellungen zur Sicherheit bei der Beförderung radioaktiver Stoffe Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben CRP NORM der IAEA im Rahmen des Vorhabens 3607R02600 (AP 3): Exposure of Transport Workers from the Transport of Most Important NORM in Germany. GRS-A-Bericht Nr. 3541. Köln.
- /GRÜ 04/ Grünthal, G. (2004): Erdbeben und Erdbebengefährdung in Deutschland sowie im europäischen Kontext. - Geographie und Schule, Vol. 151, S. 14-23.
- /GRÜ 12/ Grünthal, G.; Wahlström, R. (2012): The European-Mediterranean Earthquake Catalogue (EMEC) for the last millennium. - Journal of Seismology, Vol. 16 (3), pp. 535-570.
- /GRÜ 13a/ Grünthal, G. (2013): Induced Seismic Events at Geothermal Sites Versus Other Seismicity Types. - International Conference on Enhanced Geothermal Systems, May 27th, 2013, Potsdam, Abstract Volume 2013, pp. 18-19.
- /GRÜ 13b/ Grünthal, G. (2013): Induced seismicity related to geothermal projects versus natural tectonic earthquakes and other types of induced seismic events in Central Europe. - Geothermics Special Issue. [article in press]
- /GRÜ 98/ Grünthal, G. (Hrsg.) (1998): European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). - Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie 15, Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.
- /GSO 12/ Geothermie Soultz (2012): Website; <http://deutsch.geothermie-soultz.fr/>; abgerufen am 14.12.2012
- /GTT 14/ GTT Technologies (2014): Chemapp. GTT-web. [Online] 04 2014. <http://gtt.mch.rwth-aachen.de/gtt-web/chemapp>.

- /GTV 10/ GtV Bundesverband Geothermie e.V. (2010): Induzierte Seismizität - Position des GtV-BV Geothermie e.V. vom 07. Juli 2010. - abrufbar unter http://www.geothermie.de/uploads/media/GtV_Positionspapier_Seismizitaet_070710_01.pdf (25.03.2013).
- /GTV 11/ GtV Bundesverband Geothermie e.V. (2011): GTV-Richtlinie Seismizität bei Geothermie-Projekten, Blatt 1: Seismische Überwachung - Gelbdruck. - GTV 1101, Blatt 1 (Dezember 2011), abrufbar unter http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/GTV_Richtlinie_2011-1.pdf (25.03.2013).
- /GTV 12a/ GtV (2012): Bundesverband Geothermie; Homepage: www.geothermie.de; abgerufen am 08.11.2012.
- /GTV 12b/ GtV Bundesverband Geothermie e.V. (2012): Hintergrundpapier zur Stimulation geothermischer Reservoirs vom 11. Januar 2012. - abrufbar unter http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Hintergrundpapier_Stimulation_GtV-BV.pdf (25.03.2013).
- /GTV 13/ GtV (2013): Geothermedialog - Fragen zur Geothermie. GtV - Bundesverband Geothermie e.V., erreichbar unter: http://www.geothermedialog.de/index.php?option=com_content&view=article&id=35&Itemid=3, zitiert am 14.03.
- /GTV 14a/ GtV (2014): Norddeutsches Becken. [geothermie.de](http://www.geothermie.de). [Online] 04 2014. <http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossar-lexikon/n/norddeutsches-becken.html>.
- /GTV 14b/ GTV (2014): Nutzung der Geothermie in Deutschland. Stand vom 25.03.2014, GtV - Bundesverband Geothermie e.V.
- /GUB 14/ Grießl, D. (2014): Stand vom 18.03.2014, G.U.B. Ingenieur AG, erreichbar unter: www.gub-ing.de/inc/bilder/2010_04_09_Kupfer_4.jpg, zitiert am 25.03.2014.
- /GUN 12/ Gunnarson, A. (2012): The Potenzial of Line Shaft Pumps in geothermal Applications; Vortrag, Geothermiekongress Freiburg, 2012.

- /GUP 69/ Gupta, H.K.; Hari, N.; Rastogi, B.K.; Mohan, I. (1969): A study of the Koyna earthquake of December 10, 1967. - Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 59(3), pp. 1149-1162.
- /GUP 92/ Gupta, H.K. (1992): Reservoir-Induced Earthquakes. - Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 64; Elsevier, Amsterdam - London - New York - Tokyo.
- /GUT 95/ Gutscher, M.-A. (1995): Crustal structure and dynamics in the Rhine Graben and the Alpine. Geophysical Journal International. 1995.
- /HAI 06/ Haidinger, P., Dornstädter, J., Fabritius, A. (2006): HDR economic modelling: HDRec software. Geothermics, Vol. 35, No. 5-6, Oktober-Dezember 2006.
- /HAK 14/ Hakimhashemi, A.H.; Schoenball, M.; Heidbach, O.; Zang, A.; Grünthal, G. (2014): Forward modelling of seismicity rate changes in georeservoirs with a hybrid geomechanical–statistical prototype model. - Geothermics [article in press]
- /HÄR 08/ Häring, M.O.; Schanz, U.; Ladner, F.; Dyer, B.C., (2008): Characterisation of the Basel 1 enhanced geothermal system. - Geothermics, Vol. 37, pp. 469-495.
- /HAR 08/ Hartmann, A.; Pechinig, R.; Clauser, C. (2008): Petrophysical analysis of regional-scale thermal properties for improved simulations of geothermal installations and basin-scale heat and fluid flow. 2008.
- /HAR 12/ Harrison, J.D. & Marsh, J.W. (2012): Effective dose from inhaled radon and its progeny, ICRP Publication (2012), doi:10.1016/j.icrp.2012.06.012
- /HEA 68/ Healy, J.H.; Rubey, W.W.; Griggs, D.T.; Raleigh, C.B. (1968): The Denver Earthquakes. - Science, Vol. 161 (3848), pp. 1301-1309.
- /HER 10/ Herzberger, P. et al. (2010): The Geothermal Power Plant Bruchsal. Proceedings World Geothermal Congress 2010. Bali: s.n., 2010.

- /HES 13/ Hesshaus, A. et al. (2013): Characterisation of reservoir fluid conditions at geothermal well. 2013.
- /HIE 05/ Hielscher, M. (2005): Erfahrungsbericht zum Einsatz einer Centrillift-Tiefpumpenanlage in der Bohrung NG 01-88 im Zeitraum November 1994 bis Juni 2005; Vortrag im Rahmen des Tiefpumpenworkshop in Karlsruhe, 2005.
- /HIS 81/ Hsieh, P.A.; Bredehoeft, J.D. (1981): A reservoir analysis of the Denver earthquakes: A case of induced seismicity. - Jour. Geophys. Res., Vol. 86, pp. 903-920.
- /HLR 04/ Hellberg-Rode, G. (2004): Bodeninterne Degradation Projekt Hypersoil, erreichbar unter: <http://hypersoil.uni-muenster.de/0/02/02/03.htm>.
- /HOL 13a/ Holenstein, M., Wallquist, L. (2013): Dialoggeo Stiftung Risiko-Dialog, erreichbar unter: <http://dialoggeo.de/faq/>, zitiert am 10.06.
- /HOL 13b/ Holenstein, M., Wallquist, L. (2013): Schlussbericht Beirat DialoGGeo - Bewertungen und Forderungen zum Geothermie-Projekt der ÜWG im Kreis Groß-Gerau. Überlandwerk Groß-Gerau GmbH, 7. Mai 2013.
- /HUE 04a/ Huenges, E., Winter, H. (2004): Experimente zur Produktivitätssteigerung in der Geothermie-Forschungsbohrung Groß Schönebeck 3/90. Vol. Scientific Technical Report STR04/16: Geo-Forschungszentrum Potsdam.
- /HUE 04b/ Huenges, E. et al. (2004): Sandsteine im In-situ-Geothermielabor Groß Schönebeck - Reservoircharakterisierung, Stimulation, Hydraulik und Nutzungskonzepte. Scientific Technical Report STR04/03, GEOFORSCHUNGSZENTRUM: Potsdam, April 2004.
- /HUE 10/ Huenges, E. (2010): Geothermal Energy Systems - Exploration, Development and Utilization. Vol. 1. Auflage, ISBN 978-3527408313, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 19. April 2010.

- /HUE 11/ Huenges, E. (2011): Forschungsplattform Groß Schönebeck - Technologieentwicklung für eine effiziente Wärme- und Strombereitstellung aus tiefer Erdwärme. System Erde, Vol. Jahrgang 1, Heft 2, DOI DOI: 10.2312/GFZ.syserde.01.02.3.
- /HUR 02/ Hurter, S.; Haenel, R. (2002): Atlas of geothermal resources in Europe. s.l. : Office for Official Publications of the European Communities, 2002.
- /HÜS 13/ Hüser, U. (2013): Ergebnisse der Mediation Tiefe Geothermie Vorderpfalz. Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland Pfalz: Mainz.
- /IAE 13/ International Atomic Energy Agency (IAEA) (2013): IAEA Safety Standards. Draft Safety Guide DS 435. Occupational Radiation Protection. 14. August 2013. Draft Version 3.2.
- /ICR 10/ ICRP (2010): Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon. ICRP Publication 115, Ann. ICRP 40(1).
- /ICR 12/ ICRP (2012): Draft Report for Consultation. Occupational Intakes of Radionuclides. Annals of the ICRP. Ref 4828-2081-0510 1, 2012 February 23
- /IEU 07/ Institut für Energetik und Umwelt gGmbH (2007): Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung, 20.12.2007.
- /IEU 07/ Institut für Energetik und Umwelt GmbH (2007): Tiefe Geothermie in Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Berlin, September 2007.
- /IHL 09/ Ihling, H. (2009): Merkblatt Rückbau von Grundwassermessstellen. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Dresden, Oktober 2009.
- /ILL 14/ Illies J-H., Röhr C. (1914): Der Oberrheingraben – Querschnitte, Erreichbar unter: <http://www.oberrheingraben.de/Grabenfuellung/Querschnitte.htm>

- /ISE 12/ Isecke, B. et al. (2012): Qualifizierung von High Performance Werkstoffen für die Geothermie, Bundesamt für Materialforschung (BAM), 25.09.2012.
- /JUN 05/ Jung, R.; Orzol, J.; Tischner, T.; Jatho, R.; Kehrer, P. (2005): The geothermal project GeneSys – Results of massive waterfrac-tests in the Bunter sandstone formation in the Northern German Basin. - In: Proceedings, 30th Stanford University workshop Geothermal Reservoir, 31.01.-02.02.2005, Stanford, USA.
- /KAB 03/ Kabus, F., Lenz, G., Wolfgramm, M., Hoffmann, F., Kellner, T. (2003): Möglichkeiten der Stromerzeugung aus hydrothermalen Geothermie in Mecklenburg-Vorpommern. 148 Seiten, Geothermie Neubrandenburg GmbH: Neubrandenburg.
- /KAG 05/ Kagel, A. et al. (2005): A Guide to Geothermal Energy and the Environment, 2005
<https://docs.google.com/gview?url=http://www.publicpower.org/files/images/Geothermal-Guide%2520by%2520Geothermal%2520Energy%2520Assoc.pdf&chrome=true>
- /KAI 04/ Kaiser, M., Fäs, M. (2004): Deep Heat Mining, Basel - Umweltverträglichkeitsbericht. Gruner AG Ingenieure und Planer, 27. Juli 2004.
- /KAL 08/ Kalfayan, L. (2008): Production Enhancement with Acid Stimulation. 2. Edition, ISBN 978-1593701390, PennWell Corp.
- /KAL 97/ Kaltschmitt, M., Wiese, A. (1997): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; Springer Verlag, 1997.
- /KAT 03/ Kattenstein, T. (2003): Auslegung, Simulation und energiewirtschaftliche Analyse der Einbindung tiefer Erdwärme aus trockenem Gestein in Fernheizsysteme; Dissertation, 2003.

- /KEH 07/ Kehrler, P.; Orzol, J.; Jung, R.; Jatho, R.; Junker, R. (2007): The GeneSys-Project - a contribution of GEOZENTRUM Hannover to the development of Enhanced Geothermal Systems (EGS). - Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Vol. 158/1, pp. 119-132.
- /KEI 10/ Keilen, K., Robrecht, W., Bode, T. (2010): Das seismische Ereignis bei Landau vom 15. August 2009. Abschlussbericht der Expertengruppe Seismisches Risiko bei hydrothermalen Geothermie: Hannover, 29.10.2010.
- /KEM 13/ Kemski, J., Feige, S., Ostwald, B., Rüter, H., Woith, H. (2013): Hintergrundpapier zum Edelgas Radon und seiner Bedeutung in der Geothermie. GtV-Bundesverband Geothermie.
- /KÖL 02/ Köhler, M.; Wöllert, A.; Menzel, H. (2002): NORM in einem geothermischen Heizwerk. Präsentation.
- /KÖL 10/ Köhler, M. & Degering, D. (2010): Strahlenschutz in Anlagen der Tiefen Geothermie. In: Tagungsband der Jahrestagung 2010 des Fachverband für Strahlenschutz e.v. Borkum. 153-158. FS-2010-153-T.
- /KOL 12/ Kolditz, O. et al. (2012): Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Fractured Porous Media - Benchmarks and Examples. s.l. : Springer, 2012.
- /KOL 95/ Kolditz, O. (1995): Modelling flow and heat transfer in fractured rocks: conceptual model of a 3-D deterministic fracture network. Geothermics. Pergamon, 1995, 24.
- /KOP 12/ Koppelman, B. et al. (2012): Shale gas extraction in the UK: a review of hydraulic fracturing. The Royal Society and The Royal Academy of Engineering: London, June 2012.
- /KOZ 86/ Kozlovsky, Y.A. (1986): The Super-deep Well of the Kola Peninsula. Springer Verlag Berlin.

- /KRE 10/ Kreuter, H., Mutschler, T., Schoenball, M., Tembe, S., Rübel, S., Osan, C., Balthasar, K., Wenke, A., Sperber, A. : Reduzierung der geologisch bedingten bohrtechnischen Risiken Bohrlochstabilität in tertiären Tonsteinfolgen im Oberrheingraben als Hindernis für die Erschließung geothermischer Reservoirs Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Karlsruhe, Juli 2010.
- /KUH 12/ Kuhn, D. (2012): MoNiKa – Der modulare Niedertemperatur-Kreislauf Karlsruhe; Vortrag im Rahmen der Praktikertage Unterhaching, 2012.
- /KÜN 02/ Kühn, M., Stöfen, H., Schneider, W. (2002): Abschätzung der Subsidenz im Einflussbereich Geothermischer Anlagen. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Vol. 7, S. 3-13.
- /KWI 10/ Kwiatek G.; Bohnhoff, M.; Dresen, G.; Schulze, A.; Schulte, T.; Zimmermann, G.; Huenges, E. (2010): Microseismicity Induced During Fluid-Injection: A Case Study from the Geothermal Site at Groß Schönebeck, North German Basin. - Acta Geophysica, Vol. 58 (6), pp. 955-1020.
- /LAG 03/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln – Allgemeiner Teil; Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) 20; Überarbeitung Endfassung v. 06.11.2003
- /LAI 00/ Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (2000): Hinweise zur Messung und Beurteilung von Lichtimmissionen (Beschluss der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI) vom 10. Mai 2000). Version 02/2003. Vorschriftensammlung der Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg.
- /LAN 09a/ Langenbruch, C.; Shapiro, S.A. (2009): Induced Seismicity after Termination of Rock Stimulations: Possibilities for Reservoir Characterization. - SEG Houston International Exposition and Annual Meeting, pp. 1855-1859.
- /LAN 09b/ Langenbruch, C.; Shapiro, S.A. (2009): Omori Law for Fluid Induced Microseismicity and its Dependence on Parameters of Reservoir and Source. - 71st EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, The Netherlands.

- /LAS 10/ Elbe, L., Bayer, H.J. (2010): Bohrspülungen für HDD- und Geothermie-Bohrungen. Vol. 2. Auflage, ISBN 978-3-8027-5332-9, Vulkan-Verlag, 10. Februar 2010.
- /LAW 04/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2004): Ableitung von Geringfügigkeitsschwellenwerten für das Grundwasser. Berlin, Dezember 2004.
- /LAW 06/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (2006): Lawa-Hinweise für die Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte bei Benutzungen des Grundwassers in bestimmten Fallgestaltungen Berlin, September 2006.
- /LEG 03/ Legarth, B.A. (2003): Erschließung sedimentärer Speichergesteine für eine geothermische Stromerzeugung. - Dissertation, TU Berlin.
- /LEG 03a/ Legarth, B.A. (2003): Erschließung sedimentärer Speichergesteine für eine geothermische Stromerzeugung. Scientific Technical Report STR03/09, GeoForschungsZentrum: Potsdam.
- /LEG 03b/ Legarth, B.A., Wohlgemuth, L. (2003): Bohrtechnik und Bohrkosten für Sedimentgesteine – Erschließung geothermischer Lagerstätten, Fachkongress Geothermischer Strom - Start in eine neue Energiezukunft: Neustadt-Glewe, 2003b.
- /LEG 05/ Legarth, B., Huenges, E., Zimmermann, G. (2005): Hydraulic fracturing in a sedimentary geothermal reservoir: Results and implications. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 42, S. 1028-1041, 28 June 2005.
- /LEY 98a/ Leydecker, G. (Kordinator) (1998): Der Gebirgsschlag vom 13. März 1989 bei Völkershausen in Thüringen im Kalibergbaugebiet des Werratal. - Geologisches Jahrbuch, Reihe E, Heft 55.
- /LEY 98b/ Leydecker, G. (1998): Beziehung zwischen Magnitude und Größe des Bruchfeldes bei starken Gebirgsschlägen im deutschen Kalibergbau – ein Beitrag zur Gefährdungsprognose. - Z. angew. Geol., Band 44, Seiten 22-25.

- /LGR 10/ LGRB (2010): Geologische Untersuchungen von Baugrundhebungen im Bereich des Erdwärmesondenfeldes beim Rathaus in der historischen Altstadt von Staufen i. Br. Sachstandsbericht: Az.: 94-4763//10-563, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Freiburg, 01.03.2010.
- /LGR 11/ LGRB (2011): Erläuterungen zum Informationssystem Oberflächennahe Geothermie für Baden-Württemberg (ISONG). Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau: Freiburg, März 2011.
- /LIA 14/ Gramenz, J. (2014): Geothermisches Informationssystem für Deutschland. Stand vom 29.01.2014, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, erreichbar unter: <http://www.geotis.de>, zitiert am 29.01.2014
- /LOB 12/ Lobianco, L.; Schlumberger (2012): Reliable high Flowrate and high Temperature Pumping Systems; Vortrag im Rahmen des Geothermiekongress Freiburg, 2012.
- /LUL 11/ Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfLUG) (2011): Tiefengeothermie Sachsen. - Schriftenreihe des LfULG, Heft 9/2011, 109 S., Dresden. - abrufbar unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15145> (11.07.2013)
- /MAJ 07/ Majer, E.L. et al. (2007): Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. - Geothermics, Vol. 36, pp. 185-222.
- /MAJ 11/ Majer, E. ; Nelson, J.; Robertson-Tait, A.; Savy, J.; Wong, I. (2011): Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems (EGS). - Final Draft - May 31st, 2011; abrufbar unter: http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/aktuelles/Aktuelles/Dateien_zu_News/EGS_Induced_Seismicity_Protocol_Final_Draft_110422-1_jam-1finaleIm.pdf (28.03.2013)
- /MAJ 12/ Majer, E. ; Nelson, J.; Robertson-Tait, A.; Savy, J.; Wong, I. (2012): Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems. - U.S. Department of Energy, Energy Efficiency & Renewable Energy, DOE/EE-0662, 45 pp., January 2012.

- /MAT 03/ Matthes, G. (2003): Lehrbuch der Hydrogeologie 1. Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt. Vol. 2.te überarb. u. erweiterte Ausgabe, 575 Seiten, ISBN ISBN-10: 3443010490, Verlag: Borntraeger, 23. April 2003.
- /MAT 09/ Mathews, T. (2009): Vorlesung Grundwasserhydraulik und -erschließung. 1-34 Seiten, Fachhochschule Bochum - Insitut für Wasser und Umwelt: Bochum.
- /MCG 76/ McGarr, A. (1976): Seismic moment and volume change. - J. geophys. Res., Vol. 81, pp. 1487-1494.
- /MEI 12a/ Meiners, G. (2012): Gutachten mit Risikostudie zur Exploration und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten in Nordrhein-Westfalen (NRW) und deren Auswirkungen auf den Naturhaushalt insbesondere die öffentliche Trinkwasserversorgung. 6. September 2012.
- /MEI 12b/ Meiners, G. et al. (2012): Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen. FKZ 3711 23 299, August 2012.
- /MEN 00/ Menzel, H.; Seibt, P.; Kellner, T. (2000): Five years of experrience in the operation of the Neustadt-Glewe geothermal project. World Geothermal Congress. Kyushu - Thohoku: s.n., 2000.
- /MER 12/ Mergner, H., Eggeling, L., Kölbl, T., Münch, W., Genter, A. (2012): Geothermische Stromerzeugung: Bruchsal und Soultz-sous-Forêts. S. 666-673, mining+geo 20. Symposium Felsmechanik und Tunnelbau.
- /MER 05/ Merkel, B. (2005): scCO₂ – Machbarkeitsuntersuchung über den Einsatz von Hot Dry Rock Geothermie zur Elektrizitätserzeugung mit Hilfe von superkritischem CO₂. 105 p.
- /MIL 12/ Milles, U. (2012): Energieforschung konkret: Korrosion in geothermischen Anlagen, Projektinfo 06/2012.

- /MLC 02/ Mlcak, H. et al. (2002): Notes from the North: a Report on Debut Year of the 2 MW Kalina Cycle Geothermal Power Plan in Husavik, Island, 2002.
- /MUE 12/ Müller, B., Schilling, F., Kohl, T. (2012): Antworten zu Fragen zur Tiefengeothermie. Landesforschungszentrum Geothermie: Karlsruhe, Mai 2012.
- /MÜN 05/ Münch, W. et al. (2005): Möglichkeiten der geothermischen Stromerzeugung im Oberrheingraben, VGB Powertech 10/2005.
- /MUN 13/ Mundhenk, N. et al. (2013): Corrosion and scaling as interrelated phenomena in an operating geothermal power plant. Corrosion science. elsevier, 2013, 70.
- /NAG 02/ NAGRA (2002): Bohrlochversiegelung/-verfüllung. Editor: 02-24, T.B., Nagra - Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Dezember 2002.
- /NAR 68/ Narain, H.; Gupta, H.K. (1968): The Koyana earthquake. - Nature, Vol. 217, pp. 1138-1139.
- /NEL 90/ Nelson, E.B. (1990): Well Cementing. In: Developments in Petroleum Science, Vol. Volume 28, ISBN 0376-7361, Elsevier, 1990.
- /NIC 12/ Nickol, P. (2012): Nickol und Partner; Wasserkühlung unabhängig von Fließgewässern – technische und wirtschaftliche Herausforderungen; Vortrag im Rahmen der Praktikertage Unterhaching, 2012.
- /NIC 90/ Nicholson, C; Wesson, R.L. (1990): Earthquake Hazard Associated with Deep Well Injection - A Report to the U.S. Environmental Protection Agency. - U.S. Geological Survey Bulletin 1951, 74 pp., Denver, CO.
- /NÖV 05/ Növig, T. (2005): Kostenoptimiertes Bohren, Workshop Bohrtechnik: Hannover, 09. Februar 2005.

- /NRW 06/ Land Nordrhein-Westfalen (2006): BVOT-Bergverordnung für Tiefbohrungen, Unterspeicherung und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen im Land Nordrhein-Westfalen. Land Nordrhein-Westfalen, 31. Oktober 2006.
- /NYG 10/ Nygaard, R. (2010): Well Design and Well Integrity - WABAMUN AREA CO2 SEQUESTRATION PROJECT (WASP). Energy and Environmental Systems Group.
- /OGP 09/ OGP/IIPECA (2009): Drilling fluids and health risk management - A guide for drilling personnel, managers and health professionals in the oil and gas industry. OGP Report Number 396, OGP/IIPECA Health Committee by the Drilling Fluids Task Force: London.
- /OPP 08/ Oppelt, J. (2008): Geothermie und Bohrtechnik, Baker Hughes INTEQ GmbH, Zweite Niedersächsische Energietage: Goslar, 09.10. 2008.
- /ORZ 04/ Orzol, J.; Jatho, R.; Kehrer, P.; Tischner, T. (2004): The GeneSys Project - Development of concepts for the Extraction of Heat from Tight Sedimentary Rocks. - Z. angew. Geol., Band 2, S. 17-23.
- /ORZ 05/ Orzol, J. et al. (2005): The Genesys-Project: Extraction of Geothermal Heat from Tight Sediments. World Geothermal Congress. Antalya : s.n., 2005.
- /ORZ 05/ Orzol, J.; Jung, R.; Jatho, R.; Tischner, T.; Kehrer, P. (2005): The GeneSys-Project: Extraction of Geothermal Heat from Tight Sediments. - Proceedings World Geothermal Congress, Antalya, Turkey, 2005.
- /OST 08/ Ostin, M. (2008): Merkblatt über Anforderungen des Gewässerschutzes an geothermische Anlagen. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg: Potsdam, April 2008.

- /PAS 03/ Paschen, H.; Oertel, D.; Grünwald, R. (2003): Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland - Sachstandsbericht („TAB-Studie“). - Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Arbeitsbericht Nr. 84, 124 S., Berlin. Abrufbar unter: <http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Tab84.pdf> (28.03.2013)
- /PAU 93/ Pauwels, H. ; Fouillac, C. ; Fouillac, A.-M. (1993): Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben: Origin of compounds and water-rock interactions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Pergamon Press Ltd, 1993.
- /PES 07/ Pester, S.; Schellschmidt, R.; Schulz, R. (2007): Verzeichnis geothermischer Standorte - Geothermische Anlagen in Deutschland auf einen Blick. - Geothermische Energie, Vol. 56 + 57, S. 4-8.
- /PET 03/ Petty, S., Gastineau, J., Bour, D.L., Ravi, K. (2003): LIFE CYCLE MODELING OF WELLBORE CEMENT SYSTEMS USED FOR ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM DEVELOPMENT, Twenty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering: Stanford University, Stanford, California, January 27-29, 2003.
- /PGF 12/ P.g. GmbH, (2012): Hauptbetriebsplan für den Betrieb des Geothermiekraftwerkes Insheim - Primärkreislaufsystem zur Erdwärmegewinnung.
- /PGG 11/ Personenkreis Geothermie der Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Geologie (2011): Fachbericht zu bisher bekannten Auswirkungen geothermischer Vorhaben in den Bundesländern. Wiesbaden, Februar 2011.
- /PIN 07/ Pinnacle Technologies (2007): Evaluation of Oil-Industry Stimulation Practices for Engineered Geothermal Systems. DOE-PS36-04GO94001, Pinnacle Technologies, Inc.: San Francisco, October 2007.

- /PLA 10/ Place, J. (2010): Caractérisation des chemins de circulations de fluides dans le réseau poreux d'un batholite granitique. - Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'Université de Strasbourg, 344 pp. + annex.
- /POR 07/ Portier, S., André, L., Vuataz, F.D. (2007): Review on chemical stimulation techniques in oil industry and applications to geothermal systems, Enhanced Geothermal Innovative Network for Europe, Work Package 4 : Drilling, stimulation and reservoir assessment. CREGE – Centre for Geothermal Research: Neuchâtel - Switzerland, Mai 2007.
- /POR 09/ Portier, S., Vuataz, F.-D. (2009): Studies and support for the EGS reservoirs at Soultz-sous-Forêts. Final report April 2004 – May 2009. Project financed by State Secretariat for Education and Research (SER/SBF) and Swiss Federal Office of Energy (OFEN/BFE). August 2009.
- /QUI 12/ Quick, H. et al. (2012): Geothermal applicaion in low enthalpy regions. Renewable Energy. Elsevier, 2012, 49.
- /RAT 12/ Rathje, H.-W. (2012): Vortrag im Rahmen der Praktikertage Unterhaching, 2012.
- /REC 11/ Reich, M., Prevedel, B. (2011): Tiefengeothermie-Bohrungen im Kristallin, Tiefengeothermie Sachsen: Dresden, 2011.
- /REG 10a/ Regenspurg, S.; Banks, J.; Zimmermann, G. (2010): Mineral precipitation from geothermal brines during reservoir activities - Example Gross Schonebeck (Germany). - Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 74 (12), Suppl. 1, A856.
- /REG 10b/ Regenspurg, S.; Wiersberg, T.; Brandt, W.; Huenges, E.; Saadat, A.; Schmidt, K.; Zimmermann, G. (2010): Geochemical properties of saline geothermal fluids from the in-situ geothermal laboratory Groß Schönebeck (Germany). - Chemie der Erde - Geochemistry, Vol. 70, Suppl. 3, pp. 3-12.

- /REG 13/ Regenspurg, S.; Feldbusch, E. (2013). Summary: Geochemical processes responsible for clogging of the production well (Groß-Schönebeck). Potsdam: s.n., 2013.
- /REI 96/ Reis, J.C. (1996): Environmental Control in Petroleum Engineering. Vol. 1, 400 Seiten, ISBN 978-0-88415-273-6, Elsevier Inc., April 1996.
- /REN 11/ Renpu, W. (2011): Advanced well completion engineering (English translation). Vol. Third Edition, ISBN ISBN: 978-0-12-385868-9, Elsevier Inc.
- /REP 10/ Regenspurg, S., Wiersberg, T., Brandt, W., Huenges, E., Saadat, A., Schmidt, K., Zimmermann, G., Reinicke, A. (2010): Geochemical properties of saline geothermal fluids from the in-situ geothermal laboratory Groß Schönebeck (Germany). Chemie der Erde - Geochemistry, Vol. 70, S. 3-12.
- /RIC 35/ Richter, C.F. (1935): An Instrumental Earthquake Magnitude Scale. - Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 25 (1), pp. 1-32.
- /ROS 12/ Rosenwinkel, K.-H., Weichgrebe, D., Olsson, O. (2012): Stand der Technik und fortschrittliche Ansätze in der Entsorgung des Flowback zum Informations- und Dialogprozess über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking Technologie für die Erdgasgewinnung. Institutes für Siedlungswasserwirtschaft und Abfall (ISAH) der Leibniz Universität Hannover: Hannover.
- /RYB 07/ Rybach, L. (2007): The geothermal conditions in the Rhine Graben - a summary. Bulletin für angewandte Geologie. 2007, Vol. 12/1.
- /SAA 08/ Saadat, A., Brandt, W. (2008): Bohrtechnische Erschließung geothermischer Reservoirs, Deutsches Geo Forschungs Zentrum Potsdam, Zweite Niedersächsische Energietage: Goslar, 09.-10.Okt. 2008.
- /SAL 13/ Salim, P., Amani, M. (2013): Principal Points in Cementing Geothermal Wells. Advances in Petroleum Exploration and Development, Vol. Vol. 5, No. 1 S. 77-91, DOI DOI:10.3968/j.aped.1925543820130501.1145, 17 March 2013.

- /SAN 08/ Sanjuan, B. et al. (2008): Main characteristics of the deep geothermal brine (5 km) at Soultz-sous-Forêts (France) determined using geochemical and tracer test data. *Comptes Rendus Geoscience*. 2008.
- /SAS 09/ Sass, I., Homuth, S. (2009): Risikomanagement bei der Umsetzung von Tiefengeothermie-Projekten, 4. Tiefengeothermie-Forum, 2009.
- /SAU 06/ Sausse, J.; Fourar, M.; Genter, A. (2006): Permeability and alteration within the Soultz granite inferred from geophysical and flow log analysis. *Geothermics*. Elsevier, 2006, 35.
- /SAU 12/ Sauter, M., Helmig, R., Schetelig, K. (2012): Abschätzung der Auswirkungen von Fracking-Maßnahmen auf das oberflächennahe Grundwasser - Generische Charakterisierung und Modellierung, im Rahmen des InfoDialogs Fracking Informations- und Dialogprozess der ExxonMobil über die Sicherheit und Umweltverträglichkeit der Fracking-Technologie für die Erdgasgewinnung.
- /SCB 09/ Schwäbe, A. (2009): Bohrspülungen im HDD-Verfahren. Institut für Geologie, TU Bergakademie Freiberg, Sachsen.
- /SCD 10/ Schindler, S. et al. (2010): Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric Power Production in the Upper Rhine Graben, Central Europe, World Geothermal Congress Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- /SCH 07/ Schröder, H. et al. (2007): Long term reliability of geothermal plants – Examples from Germany. *Proceedings European Geothermal Congress*. Unterhaching: s.n., 2007.
- /SCH 10/ Schindler, S. et al. (2010): Successful Hydraulic Stimulation Techniques for Electric Power Production in the Upper Rhine Graben, Central Europe. - *Proceedings World Geothermal Congress 2010 Bali, Indonesia, 25-29th April, 2010*.

- /SCH 12/ Scheiber, J.; Nitschke, F.; Seibt, A.; Genter, A. (2012): Geochemical and mineralogical Monitoring of the geothermal power plant in Soultz-Sous-Forêts (France). PROCEEDINGS, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, 2012 SGP-TR-194. (GeoSys Lib ID 362).
- /SCH 12a/ Schulz, R.; Thomas, R. (Hrsg.) (2012): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München - Endbericht. - BMU-FKZ: 0325013A, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik Hannover, Archivnummer: 0130392 98 S., Hannover. - abrufbar unter <http://www.liag-hannover.de/fileadmin/produkte/20120423114303.pdf> (11.07.2013)
- /SCH 12b/ Schweizerische Vereinigung für Geothermie (2012): Tiefengeothermie und Erdbeben - Factsheet. - http://www.geothermie.ch/data/dokumente/miscellanusPDF/Factsheet_induzierte_Erdbeben_def.pdf (12.03.2014)
- /SCH 14/ Schulz, R. (2014): Geothermische Potenziale. Geotis. [Online] www.geotis.de.
- /SCH 99/ Schallenberg, K., et al. (1999): Das Geothermische Heizwerk in Neustadt-Glewe im Betriebsjahr 1996; GeoForschungsZentrum Potsdam; 1999.
- /SCI 09/ Schilling, F.R. (2009):: Monitoring - Überwachung zukünftiger CO₂-Speicher. Die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland – Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven. Geotechnologien Science Report, Vol. 14, S. 88 - 102.
- /SCI 12/ Schilling, F.R. (2012): Kurzgutachten - Bohrung, Verrohrung und Zementierung. Karlsruher Institut für Technologie: Karlsruhe, 16.04.2012.
- /SCJ 12/ Schmitt Jansen M., Faetsch S., Riedl J., Rotter S., Altenburger R. (2012): Ökotoxikologische Beurteilung von beim hydraulischen Fracking eingesetzten Chemikalien. Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Leipzig Halle, Dept. Bioanalytische Ökotoxikologie, Februar 2012.

- /SCN 12/ Schneble, H., Weinem, K., Niethammer, I. (2012): Informations- und Dialogprozess zum Aufsuchen und Fördern von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten (InfoDialog Fracking), Fachbeitrag zum Themenkreis Landschaft Flächeninanspruchnahme, (oberirdische) Infrastruktur, Betrieb. Umweltplanung Bullermann Schneble GmbH: Darmstadt, Mai 2012.
- /SCP 06/ Schippers, A., Reichling, J. (2006): Laboruntersuchungen zum Einfluss von Temperaturveränderungen auf die Mikrobiologie des Untergrundes. Grundwasser – Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Vol. 11 S. 40-45, DOI 10.1007/s00767-006-0117-z.
- /SCR 09/ Schröder, H., Hesshaus, A. (2009): Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen. In: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 03329937A, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, Juni 2009.
- /SCS 09/ Schellschmidt, R., Hesshaus, A., Sulzbacher, H., Junker, R., Tischner, T., Jatho, R. (2009): Genesys Horstberg II - Methoden und Konzepte zur Erdwärmegewinnung aus gering permeablen Sedimentgesteinen. In: Abschlussbericht zum Vorhaben FKZ 0329995, Leibniz Institut für Angewandte Geophysik: Hannover, 21.12.2009.
- /SEE 04/ Seeber, L.; Armbruster, J.G.; Kim, W.-Y. (2004): A fluid-injection-triggered Earthquake Sequence in Ashtabula, Ohio: Implications for Seismogenesis in Stable Continental Regions. - Bull. Seism. Soc. Amer., Vol. 94, pp. 76-87.
- /SEH 12/ Seher, H., Bracke, G. (2012): Chemische Vorgänge in einem Endlager für hochradioaktive Abfälle in Ton- und Salzgestein. ISBN 978-3-939355-80-9, September 2012.
- /SEI 08/ Seibt, A.; Wolfgramm, M. (2008): Zusammensetzung von Tiefenwässern in Deutschland und ihre Relevanz für geothermische Anlagen. S. 503-516, Der Geothermiekongress: Karlsruhe, 13.11.2008.

- /SEI 11/ Seibt, A.; Scheiber, J. (2011): Investigations of the use of antiscalants in Soultz. Soultz Conference 06.10.2011. (GeoSys Lib ID 368).
- /SHA 02/ Shapiro, S.A.; Rothert, E.; Rath, V.; Rindschwentner, J. (2002): Characterization of Fluid Transport Properties of Reservoirs Using Induced Microseismicity. - Geophysics, Vol. 67 (1), pp. 212-220.
- /SHA 07/ Shapiro, S.A.; Dinske, C.; Kummerow, J. (2007): Probability of a Given-Magnitude Earthquake Induced by a Fluid Injection. - J. Geophys. Res., Vol. 34, L22314.
- /SHA 09/ Shapiro, S.A.; Dinske, C. (2009): Scaling of Seismicity Induced by Nonlinear Fluid-Rock Interaction. - J. Geophys. Res., Vol. 114, B09307.
- /SIP 06/ Sippel, J. (2006): The Paleostress History of the Central European Basin System. Potsdam: GFZ, 2006.
- /SKA 11/ Skalle, P. (2011): Drilling Fluid Engineering. ISBN ISBN 978-87-7681-929-3, Pal Skalle & Ventus Publishing ApS.
- /SOU 11/ Soultz Geothermie (2011): Programme de suivi scientifique et technique de la Central géothermique de Soultz pendant l'exploitation, 12/2010.
- /SPE 13/ SPE (2013): PetroWiki - Drilling fluid types. Stand vom 3 January 2013, Society of Petroleum Engineers, zitiert am 07.06.
- /SPR 07/ Sperber, A. (2007): Die bohrtechnische Planung und ihr Einfluss auf Kosten und Risiko tiefer Geothermie Bohrungen., Geothermische Strom- und Wärmeerzeugung für Kommunen und Industrie: Potsdam, Oktober 2007.
- /SSK 02/ Veröffentlichung der Strahlenschutzkommission SSK Band 47 (2002): Leitfaden zur Messung von Radon, Thoron und ihren Zerfallsprodukten. Urban Fischer.

- /SSK 05/ Empfehlung der Strahlenschutzkommission (2005): Grundsätze und Methoden zur Berücksichtigung von statistischen Unsicherheiten für die Ermittlung repräsentativer Werte der spezifischen Aktivität von Rückständen. Heft 46.
- /SSK 10/ Empfehlung der Strahlenschutzkommission (2010): Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung der Strahlenexposition infolge bergbaubedingter Umweltradioaktivität (Berechnungsgrundlagen Bergbau – BGIB), BfS-SW-07/10, Salzgitter, März 2010.
- /STA 03/ Stange, S. (2003): Induzierte Mikroerdbeben beim Injektionstest in der Geothermiebohrung Urach-3. - Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, Jena, 2003.
- /STE 10/ Steiner, W., Kaiser, P. K., Spaun, G. (2010): Spröbruch in wenig festem Fels als Auslöser von Quellvorgängen: Beobachtungen und Analysen. Geomechanik und Tunnelbau, S. 583-596, DOI DOI: 10.1002/geot.201000053, Oktober 2010.
- /STO 11/ Stober, I. et al. (2011): Tiefe Geothermie - Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland. Vol. 3.Auflage: Berlin.
- /STR 09/ Stroink, L. et al. (2009): Die dauerhafte geologische Speicherung von CO₂ in Deutschland – Aktuelle Forschungsergebnisse und Perspektiven. Editor: 14, G.S.R.N.: Potsdam.
- /TAL 85/ Talwani, P.; Acree, S. (1985): Pore Pressure Diffusion and the Mechanism of Reservoir-Induced Seismicity. - Pure Appl. Geophys., Vol. 122, pp. 947-965.
- /TEN 03/ Tenzer, H. (2003): Development of Hot Dry Rock Technology, Geothermic Research, Municipality Works, International summer school on direct application of geothermal energy.
- /TEO 12/ Teodoriu, C. (2012): Why and When does Casing fail in Geothermal Wells, Celle Drilling: Celle, September 2012.

- /TES 07/ Tesmer, M. et al. (2007): Deep reaching fluid flow in the North East German Basin: origin and processes of groundwater salinisation. Hydrogeology Journal. 2007, 15.
- /TIS 06/ Tischner, T., Pfender, M., Teza, D. (2006): Hot Dry Rock Projekt Soultz: Erste Phase der Erstellung einer wissenschaftlichen Pilotanlage. Januar 2006.
- /TIS 07/ Tischner, T.; Schindler, M.; Jung, R.; Nami, P. (2007): HDR project Soultz: Hydraulic and seismic observations during stimulation of the 3 deep wells by massive water injections. - Proceedings 32nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, January 22-24.
- /TIS 13/ Tischner, T. et al. (2013): Massive hydraulic fracturing in low permeable sedimentary rock in the Genesys project. Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: s.n., 2013. 38.
- /TIT 01/ Tittel, B.; Korn, M.; Lange, W.; Leydecker, G.; Rappsilber, I.; Wendt, S. (2001): Der Gebirgsschlag in Teutschenthal bei Halle vom 11. September 1996: Makroseismische Auswertung. - Z. angew. Geol., Band 47, S. 126-131.
- /TLW 10/ Thüringer Landesverwaltungsamt (2010): Nutzung oberflächennaher Geothermie Vorläufige Arbeitshilfe zur wasserrechtlichen Beurteilung angezeigter Vorhaben. Weimar, 15.02.2010.
- /TRE 10/ Trend Reserch (2010): Der Geothermiemarkt in Europa bis 2030 - Energie aus der Erde: Potenziale für Kapitalanleger, Energieversorger und Anlagenbauer. 13-0187, 1207 Seiten: Bremen, August 2010.
- /TRO 11/ Troll, R. (2011): Geothermianlage Sauerlach - Projektvorstellung, 2011.
- /TUC 14/ TU Clausthal: gebo-Forschungsverbund Geothermie und Hochleistungsbohrtechnik. Stand vom 03.09.2014, Technische Universität Clausthal, erreichbar unter: <http://www.gebo-nds.de/materialien/fragen-antworten/#1>, zitiert am 31.10.2014.

- /TÜV 11/ Enderle, K.-H. (2011): SGS-TÜV-Gutachten 0044-02-0050-111017 für Geox GmbH: Immissionsprognose für Radionuklide, Notkreislaufbetrieb. 147 S.
- /UBA 01/ Rasmus, J. et al. (2001): Entwicklung einer Arbeitsanleitung zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen in der Umweltverträglichkeitsprüfung. Forschungsbericht 297 13 180. UBA-FB 000068. Umweltbundesamt. 139 S.
- /UBA 10/ Balla, S., Peters, H.-J., Wulfert, Katrin, (2010): Leitfaden zur Strategischen Umweltprüfung, Forschungsvorhaben FKZ 206 13 100 im Auftrag des Umweltbundesamtes, März 2010.
- /UBA 11/ Umweltbundesamt (2011): Einschätzung der Schiefergasförderung in Deutschland. Dezember 2011.
- /USA 72/ U.S. Army Corps of Engineers (1972): Systematic Drilling and Blasting for Surface Excavations. - CECW-EG Engineer Manual 1110-2-3800, Washington, D.C. -
http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-3800.pdf (12.03.2014)
- /UTH 12/ Uth, H.-J. (2012): Technische Sicherheit von Anlagen und Verfahren zur Erkundung und Förderung von Erdgas aus nichtkonventionellen Lagerstätten. Expertenkreis Fracking, AG Risiko: Lychen, Mai 2012.
- /VAN 06/ Van Eck, T.; Goutbeek, F.; Haak, H.; Dost, B. (2006): Seismic Hazard due to small-magnitude, shallow-source, induced earthquakes in The Netherlands. - Engineering Geology, Vol. 87, pp. 105-121.
- /VDI 01/ VDI (2001): Thermische Nutzung des Untergrundes. Richtlinie 4640, Verein Deutscher Ingenieure (VDI): Düsseldorf.
- /VOG 12/ Vogt, C. et al. (2012): Estimating the permeability distribution and its uncertainty at the EGS demonstration reservoir Soultz-sous-Forêts using the ensemble Kalman filter. Water Resources Research. 2012, 48.

- /VOL 13/ Volland, S. (2013): Verbessertes Risikomanagement durch multilaterale Bohrungen Enerchange GbR, erreichbar unter:
<http://www.tiefengeothermie.de/top-themen/verbessertes-risikomanagement-durch-multilaterale-bohrungen>, zitiert am 05.07.
- /VOL 14/ Volland, S. (2014): Das Bohrgerät TI-350 von Herrenknecht. Stand vom 25.03.2014, GeoThermal Engineering GmbH, zitiert am 25.03.2014.
- /WAC 09/ Wachtendorf, A. (2009): Abfallmanagement für Geothermie-Projekte, Geothermiekongress Bochum, 2009.
- /WAL 12/ Wallquist, L., Holenstein, M. (2012): Stakeholderanalyse Geothermie - Analyse von Einstellungen und Wahrnehmungsprozessen Stiftung Risiko-Dialog St. Gallen Winterthur, 17. Juli 2012.
- /WAN 11/ Wang, Y. et al. (2011): Nuclear Energy Advanced Modeling and Simulation (NEAMS) Waste Integrated Performance and Safety Codes (IPSC) Gap Analysis for High Fidelity and Performance Assessment Code Development. s.l.: Sandia, 2011.
- /WAT 07/ Watson, T.L., Bachu, S. (2007): Evaluation of the Potenzial for Gas and CO₂Leakage along Wellbores. SPE 106817., E&P Environmental and Safety Conference: Galveston, Texas, U.S.A..
- /WAT 13/ Watzel, R. (2013): Georg. Georg-Geoportal. [Online] 2013.
<http://maps.geopotenziale.eu/>.
- /WAT 95/ Watanabe, K.; Takahashi, H. (1995): Fractal geometry characterization of geothermal reservoir fracture networks. Journal of geophysical research. Sendai: s.n., 1995. 100.
- /PEB 11/ Phrikolat Drilling Specialties GmbH (2011): Grundlagen Bohrspülung. erreichbar unter:
<http://www.phrikolat.de/index.php/wissensCenter/grundlagenhdd/grundlagenpuelung>, zitiert am 08.03.2012.

- /WEG 06a/ WEG (2006): WEG-Leitfaden - Gestaltung des Bohrplatzes.
Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V., August 2006.
- /WEG 06b/ Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (2006): Leitfaden -
Futterrohrberechnung. Hannover, Juni 2006.
- /WEG 11/ Wegler, U. (2011): Geothermie und Seismizität. - DGG-Kolloquium „Indu-
zierte Seismizität“, 71. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen
Gesellschaft, Köln, Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesell-
schaft (Sonderband) I/2011, S.53-65, ISSN 0947-1944.
- /WEG 12/ Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (2012):
Stellungnahme des Wirtschaftsverbandes Erdöl- und Erdgasgewinnung
e.V. zum UBA-Gutachten. Hannover, 11. Dezember 2012.
- /WEG 14/ WEG: Praxis der hydraulischen Bohrlochbehandlung für konventionelle
Speichergesteine. In: WEG-Richtlinie, 67 Seiten, Wirtschaftsverband Erdöl-
und Erdgasgewinnung e.V., Stand: 06/2014.
- /WEI 02/ Weidler, R.; Gérard, A.; Baria, R.; Baumgärtner, J.; Jung, R. (2002): Hy-
draulic and microseismic results of a massive stimulation test at 5 km depth
at the European hot-dry rock test site Soultz, France. - Proceedings 27th
Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University;
Stanford, California: 28-30.
- /WIE 13/ Wiemer, S. (2013): Forecasting the Seismogenic Response of the Under-
ground to Injection: How Little Do We Know?. - International Conference on
Enhanced Geothermal Systems, May 27th, 2013, Potsdam, Abstract Vol-
ume 2013, pp. 20-21.
- /WIK 10/ Wikipedia (2010): Unterhaching - Geothermieanlage. Stand vom
20.08.2013, erreichbar unter:
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Unterhaching_-
Geothermieanlage-_geo.hlipp.de_-_9888.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Unterhaching_-_Geothermieanlage_-_geo.hlipp.de_-_9888.jpg).
- /WIK 13/ Wikipedia (2013): Sicherheits Zertifikat Kontraktoren. Stand vom 30. März
2013, zitiert am 10.06.2013.

- /WIK 14/ Wikipedia (2014): Hydraulic Fracturing. Stand vom 25.03.2014 Wikipedia, erreichbar unter: http://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_Fracturing, zitiert am 25.03.2014.
- /WOJ 02/ Wojtanowicz, A.K. et al. (2002): Cement Pulsation Treatment in Wells, Society of Petroleum Engineers Inc., SPE Annual Technical Conference and Exhibition San Antonio, 29 September – 2 October 2002.
- /WOL 07/ Wolfgramm, M. et al. (2007): Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristic; Bavaria (Germany). European Geothermal Congress. Unterhaching: s.n., 2007.
- /WOL 08/ Wolfgramm, M.; Seibt, A. (2008): Zusammensetzung von TiefenWässern in Deutschland und ihre Relevanz für geothermische Anlagen. Geothermiekongress 2008.
- /WOL 11/ Wolfgramm, M., Thorwart, K., Rauppach, K., Brandes, J. (2011): Zusammensetzung, Herkunft und Genese geothermaler Tiefengrundwässer im Norddeutschen Becken (NDB) und deren Relevanz für die geothermische Nutzung. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Vol. 39, Heft 3-4, S. 173-193.
- /WOL 11/ Wolfgramm, M.; Rauppach, K.; Thorwart, K. (2011): Mineralneubildungen und Partikeltransport im Thermalwasserkreislauf geothermischer Anlagen Deutschlands. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Berlin 39 (2011) 3/4: 213 – 239
- /WOL 12/ Wolfgramm, M., Birner, J., Lenz, G., Hoffmann, F., Rinke, M. (2012): Erfahrungen bei der Säurestimulation geothermaler Aquifere und Anlagen, GTV Bundesverband Geothermie, Der Geothermiekongress 2012: Karlsruhe, 13.-16. November 2012.
- /WOL 14/ Wolery, T.W.; Jarek, R.L. (2014): Software users manual. EQ3/6, Version 8.0. s.l. : Sandia National Laboratories U.S. Dept. of Energy.

- /XU 12/ Xu, T. et al. (2012): TOUGHREACT User's Guide: A Simulation Program for Non-isothermal Multiphase Reactive Transport in Variably Saturated Geologic Media. 2012.
- /YEH 04/ Yeh, G.-T. et al. (2004): HYDROGEOCHEM 5.0: A Three-Dimensional Model of Coupled Fluid Flow, Thermal Transport, and HYDROGEOCHEMical Transport through Variably Saturated Conditions: Version 5.0.
- /YOO 14/ Yoon, J.S.; Zang, A.; Stephansson, O. (2014): Numerical investigation on optimized stimulation of intact and naturally fractured deep geothermal reservoirs using hydro-mechanical coupled discrete particles joints model. - Geothermics [article in press]
- /ZEI 10/ Zeil, M.; Hessel, K. (2010): Bayerischer Geothermieatlas. s.l. : Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, 2010.
- /ZHA 14/ Zhao, P.; Kühn, D.; Oye, V.; Cesca, S. (2014): Evidence for tensile faulting deduced from full waveform moment tensor inversion during the stimulation of the Basel enhanced geothermal system. - Geothermics [article in press]
- /ZIE 88/ Ziegler, P.A. (1988): Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys. Tulsa : The American Association of Petroleum Geologists.
- /ZIM 10a/ Zimmermann, G., Moeck, I., Blöcher, G. (2010): Cyclic waterfrac stimulation to develop an Enhanced Geothermal System (EGS)— Conceptual design and experimental results. Geothermics, Vol. 39, S. 59-69.
- /ZIM 10b/ Zimmermann, G., Reinicke, A. (2010): Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System: Laboratory and field experiments. Geothermics, Vol. 39, No. 1, S. 70-77.
- /ZOB 97/ Zoback, M.D.; Harjes, H.-P. (1997): Injection-Induced Earthquakes and Crustal Stress at 9 km depth at the KTB Deep Drilling Site, Germany. - J. Geophys. Res., Vol. 102 (B8), pp. 18477-18491.

11.2 Verzeichnis der im Kompartiment Recht zitierten Literatur

- Altrock/Große/Lehnert „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefengeothermischer Anlagen“, Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU
- Attendorn „Fracking- zur Erteilung von Gewinnungsberechtigungen und der Zulassung von Probebohrungen zur Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten“, ZUR 2011, S. 565
- Ahlhelm/Bula/et al. Klimaschutz in der räumlichen Planung - Gestaltungsmöglichkeiten der Raumordnung und Bauleitplanung - Praxishilfe - Studie im Auftrag des UBA (Förderkennzeichen 3709 16 136), Abschlussbericht, Februar 2012
- Battis Öffentliches Baurecht und Raumordnungsrecht, 5. Aufl. 2006
- Battis/Krautzberger/Löhr BauGB, Baugesetzbuch Kommentar München, 11. Auflage, 2009
- Beckmann „Öffentlichkeitsbeteiligung in bergrechtlichen Genehmigungsverfahren, in: Öffentlichkeitsbeteiligung im Bergrecht“ Heft 134 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft der Metallurgen und Bergleute e.V., Seite 9
- Böhm/Schwarz Klimaschutz durch Anschluss- und Benutzungszwang für kommunale Fernwärmenetze - Voraussetzungen und Grenzen, DVBl. 2012, S. 540
- Boldt/Weller/Nölscher Bundesberggesetz, Kommentar, 1984
- Breuer Öffentliches und privates Wasserrecht, 3. Aufl. 2004
- Brockhoff Der Abfallbewirtschaftungsplan nach § 22a ABergV, UPR 2013, S. 254
- Brohm Öffentliches Baurecht, 3. Aufl. 2002
- Brumme Geodaten für tiefengeothermische Anlagen <http://ra-brumme.de/3-Geodaten.pdf>, 2009

| | |
|---|--|
| Buchholz | „Brennpunkte im Berg-, Wasser- und Planungsrecht“ Vortrag bei „Erfahrungsaustausch Kommunale Geothermieprojekte“ Augsburg, 2010 |
| Büdenbender/Heintschel | Energierrecht I, Recht der Energieanlagen, 1999. |
| Bundesministerium des Inneren | Beschleunigung von Genehmigungsverfahren für Anlagen – Empfehlungen der Unabhängigen Kommission für Rechts- und Verwaltungsvereinfachung auf der Grundlage einer Befragung von Beteiligten und Betroffenen, November 1990 |
| Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) | Broschüre „Tiefe Geothermie“ des, 2. Auflage 2010 |
| Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) | Abgrenzung zwischen Bundes-Bodenschutzgesetz und Bundesberggesetz Beschluss der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Bodenschutz am 11./12.09.2000, Zustimmung des Länderausschusses Bergbau (LAB) vom 15.12.2000 Abrufbar unter https://www.labo-deutschland.de/Suche.html |
| Byok/Bormann | „Aktuelle Rechtsfragen zu der öffentlichen Auftragsvergabe in der Entsorgungswirtschaft“, NVwZ 20/2010, S.1262 |
| Byok/Jäger-Werner | Vergaberecht, Kommentar, 3. Auflage 2011 |
| Cosack/Tomerius | Betrieblicher Geheimnisschutz und Interesse des Bürgers an Umweltinformationen bei der Aktenvorlage im Verwaltungsprozess, NVwZ 1993, S. 841 |
| Czychowski/Reinhardt | Wasserhaushaltsgesetz, Kommentar, 10. Auflage, 2010 |
| Dafft/Grotefels/Kment et al. (Zentralinstitut für Raumplanung an der Universität Münster) | Das Raumordnungsrecht: Vergangenheit – Gegenwart - Zukunft, DVBl. 2005, S. 1149 |
| Danner/Theobald | Energierrecht, Kommentar, München, 2013 |
| Degering/Köhler | „Natürliche Radionuklide in Anlagen der tiefen Geothermie“, Bochum, Geothermiekongress 2009, S. 8 |

| | |
|----------------------------|---|
| Denecke | „Rechtsfragen der Tiefengeothermie-Voraussetzungen der Genehmigung und vergaberechtliche Aspekte“, ZfBR-Beil., 2012 |
| Deutsch | Raumordnung als Auffangkompetenz? – Zur Regelungsbe- fugnis der Raumordnungspläne, NVwZ 2010, S. 1520 |
| Dippel | Das gemeindliche Einvernehmen gem. § 36 BauGB in der jüngeren Rechtsprechung - alle Fragen schon geklärt? NVwZ 2011, S. 769 |
| Ehricke | Verkehrssicherungspflichten im Hinblick auf Geothermieboh- rungen“, UPR 2009, S. 281 |
| Ekhard | Ausnahmen vom Umweltinformationszugang vor dem EuGH: ist Verordnungsgebung Gesetzgebung?, NVwZ 2013, S. 1591 |
| Erbguth | Kraftwerkssteuerung durch räumliche Gesamtplanung, NVwZ – Extra 15/2013, S. 1 |
| Erbguth | Eignungsgebiete als Ziele der Raumordnung? DVBl. 1998, S. 209 |
| Erbguth | Unterirdische Raumordnung – zur raumordnungsrechtlichen Steuerung untertägiger Vorhaben, ZUR 2011, S. 121 |
| Fluck | Der Schutz von Unternehmensdaten im Umweltinformati- onsgesetz, NVwZ 1994, S. 1048 |
| Frenz | Drittschutz im Bergrecht, NVwZ 2011, S. 86 |
| Frenz/Preuße | Tagungsbeiträge zum 12. Aachener Altlasten- und Berg- schadenskundlichen Kolloquium (ABK) am 21. und 22. Juni 2010: Geothermie – Risikobeherrschung und Stand der Technik, Perspektiven und Fördermöglichkeiten; Heft 123 der Schriftenreihe der GDMB Gesellschaft für Bergbau, Metallur- gie, Rohstoff- und Umwelttechnik |
| Frick/Schröder/ Rychtyk | Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung in Deutschland – Analyse und Bewertung der klein- und groß- räumigen Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeu- gung, UBA-FB, FKZ 205 42 110, Dezember 2012 |

| | |
|-----------------------------------|--|
| Gaentzsch | Rechtliche Fragen des Abbaus von Kies und Sand, NVwZ 1998, S. 889 |
| Gärditz | Ökologische Binnenkonflikte im Klimaschutzrecht, DVBl. 2010, S. 214 |
| Gärtner/Tachlinski | „Geothermie und Strahlenschutz“, Strahlenschutzpraxis 2/2013, S. 45 |
| Gaßner/Neusüß | Ausschreibungspflichten für Geothermie-Projekte nach der Sektorenverordnung, GtE 4/2009, S. 11 |
| Giesberts/Reinhardt | Beck'scher Onlinekommentar Umweltrecht (BeckOK), 2014 |
| Grooterhorst | Ziele der Raumordnung und Landesplanung, NuR, 1986, S. 276 |
| Groß | Die Bedeutung des Umweltstaatsprinzips für die Nutzung erneuerbarer Energien, NVwZ 2011, S. 129 |
| Große | „Strom und Wärme aus der Tiefe - Zur Genehmigung und Förderung tiefeingeothermischer Anlagen“, ZUR 2009, S. 535 |
| Gusy | Probleme der Verrechtlichung technischer Standards NVwZ 1995, S. 105 |
| Hack | Energie-Contracting – Energiedienstleistungen und dezentrale Energieversorgung, 2. Auflage, 2012 |
| Hellriegel | „Rechtsrahmen für eine Raumordnung zur Steuerung unterirdischer Nutzungen“, NVwZ 2013, S. 111 |
| Hirschfeld | Aktuelle Aktivitäten des Bund-Länder-Ausschusses Bodenforschung (BLA GEO) zur Raumordnung im Untergrund, Vortrag im Rahmen des Geoforums 2013 am 11. November 2013 in Hannover |
| Hofmann | „Kommunale Konzessionsverträge im Lichte des Energiewirtschafts- und Wettbewerbsrechts“, NZBau 2012, S. 11 |
| Holländer/Unnerstall/Skiba et al. | Bundeseinheitliche Regelung des Umgangs mit wassergefährdenden Stoffen, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 3707 48 300, März 2010 |
| Hoppe/Beckmann | UVPG, Kommentar, 4. Auflage 2012 |

| | |
|--------------------------|---|
| Hoppe/Beckmann/ Kauch | Umweltrecht, 2. Aufl. 2000 |
| Jarass | BImSchG – Bundesimmissionsschutzgesetz, Kommentar, 10. Auflage, 2013. |
| Jarass | „Regelungsspielräume des Landesgesetzgebers im Bereich der konkurrierenden Gesetzgebung und in anderen Bereichen“, NVwZ 1996, S. 1041 |
| Jasper/Czepull | „Oberlandesgericht Düsseldorf kippt Dienstleistungskonzession in die Abfalltonne“, Zeitschrift für Kommunalwirtschaft 1/2012, S. 33 |
| Just | Reformbedarf bei überwachungsbedürftigen Anlagen? Erfahrungen aus Sicht der hessischen Arbeitsschutzaufsicht in <i>Pieper/Lang</i> [Hrsg.], Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2009 - 2010 der Bergischen Universität Wuppertal, Band 6, S. 58 |
| Kahl | Klimaschutz durch die Kommunen – Möglichkeiten und Grenzen, ZUR 2010, 395 |
| Kluth/Smeddinck | Umweltrecht - Ein Lehrbuch, 2013 |
| Klinger | Erweiterte Klagerechte im Umweltrecht, NVwZ 2013, S. 850 |
| Kment | Standortfestlegungen und Streckenverläufe - Neues zum Verhältnis von Raumordnung und Fachplanung, NuR 2010, 392-395 |
| Kment | Raumplanung unter Ungewissheit, ZUR 2011, S. 127 |
| Kräber | Haftungsprobleme bei Geothermiebohrungen Dissertation 2012, Veröffentlichungen des Instituts für Energierecht an der Universität Köln, Band 169 |
| Kühne | Drei Jahrzehnte Bundesberggesetz — Entwicklungslinien und Ausblick, Zeitschrift für Bergrecht (Band 154), 2013 Seite 113 ff. |
| Kühne | Die Entwicklung des Umweltschutzgedankens im Bergrecht in Jahrbuch des Umwelt- und Technikrechts 1989, S. 165 |

| | |
|-------------------------------------|---|
| Kulartz/Kus/Portz | GWB Vergaberecht, Kommentar, 2. Auflage, 2009 |
| Landmann/Rohmer | Umweltrecht, Kommentar, 2013 |
| Limpens | „Wirkungsunsicherheiten in der Geothermiebohrung: Der „Fall Staufen“. DVBl. 2009, S. 1495. |
| Ludwig, Grit | Umweltaspekte in Verfahren nach dem BBergG, ZUR 2012 Seite 150 |
| Martini/Damm | Auf dem Weg zum Open Government: Zum Regimewechsel im Geodatenrecht, DVBl. 2013, S. 1 |
| Meiners/Denneborg/ Müller et al. | Gutachten „Umweltauswirkungen von Fracking bei der Aufsuchung und Gewinnung von Erdgas aus unkonventionellen Lagerstätten – Risikobewertung, Handlungsempfehlungen und Evaluierung bestehender rechtlicher Regelungen und Verwaltungsstrukturen“, FKZ 3711 23 299, August 2012 |
| Mohr/Schlöser | Die Risiken für das Grundwasser durch Geothermieanlagen BWGZ 19/2010, S. 782 |
| Müggenborg | Abgrenzungsfragen zwischen Bodenschutz- und Bergrecht, NVwZ 2012, S. 659 |
| Müggenborg | Die Abgrenzung von Berg- und Bodenschutzrecht, NVwZ 2006, S. 278 |
| Palandt | Bürgerliches Gesetzbuch, Kommentar, 70. Auflage 2011 |
| Paschen/Oertel/ Grünwald | Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland - Sachstandsbericht („TAB-Studie“). - Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB), Arbeitsbericht Nr. 84, Berlin, 2003. Abrufbar unter: http://www.geothermie.de/fileadmin/useruploads/Service/Publikationen/Tab84.pdf (28.03.2013) |
| Peters | Umweltrecht, 4. Aufl. 2010 |
| Piens/Schulte/ Graf Vitzthum | Bundesberggesetz, Kommentar, 2. Auflage, 2013 |
| Polenz | Aufbau einer Geodateninfrastruktur, NVwZ 2010, S. 485 |
| Reinhardt | Geothermiebohrungen und Wasserrecht, UPR 2009, S. 289 |

| | |
|--|--|
| Rossi | Staatliche Daten als Informationsrohstoff, NVwZ 2013, S. 1263 |
| Roßnagel/Hentschel/Polzer | Rechtliche Rahmenbedingungen der unkonventionellen Erdgasförderung mittels Fracking, Gutachten im Rahmen des Neutralen Expertenkreises, Kassel, 2012, S. 51 |
| Sachs | Kommentar zum GG, 6. Auflage, München 2011 |
| Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) | Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt, 2012 |
| Sanden | Wassergefährdende Stoffe und europäisches Chemikalienrecht, Zeitschrift für Wasserrecht (ZfW) 2010, (Heft 1) S. 32. |
| Schad | Sachverständigengutachten der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart, FB Geotechnik, vom 19.9.2008 zum Fall Staufen, Abrufbar unter http://www.staufen.de/partner/1030/2009/Stellungnahme_1_Schad.pdf |
| Schilling | Kurzgutachten - Bohrung, Verrohrung und Zementierung. Karlsruher Institut für Technologie, 16.04.2012. |
| Schink | Regelungsmöglichkeiten der Bundesländer im Klimaschutz, UPR 2011, S. 91 |
| Schink | “Flowback beim Fracking- Abfall- und wasserrechtliche Fragestellungen“, AbfallR 1/2013, S. 36 |
| Schlacke | Die Novelle des Umwelt-Rechtsbehelfsgesetzes-EuGH ante portas?, ZUR 2013, S. 195 |
| Schlacke/Schrader/Bunge | Informationsrechte, Öffentlichkeitsbeteiligung und Rechtsschutz im Umweltrecht – Aarhus-Handbuch, Berlin 2010 |
| Schlemminger/Apfelbacher | Ausgliederung/Abspaltung bodenschutzrechtlicher Umwelthaftungsrisiken, NVwZ 2013 Seite 1389 ff. |
| Schmidt, Manfred G. | Das politische System Deutschlands - Institutionen, Willensbildung und Politikfelder, Schriftenreihe der Bundeszentrale für politische Bildung (Bd. 1150), Bonn 2011 |
| Schmitz/Prell | Planungsvereinheitlichungsgesetz, NVwZ 2013, S. 745 |

| | |
|------------------------------|---|
| Schröder/Hesshaus (Hrsg.) | Abschlussbericht Forschungsvorhaben 0329937A: Langfristige Betriebssicherheit geothermischer Anlagen – Aspekte der langfristigen Betriebssicherheit und der zukünftigen Technologie geothermischer Anlagen in Deutschland, Juni 2009 |
| Schulz | „Bergrecht und Erdwärme – Gesichtspunkte zur Bemessung von Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern“, Geothermische Energie 40/2003, S. 12 |
| Seibel | Abgrenzung der „allgemein anerkannten Regeln der Technik“ vom „Stand der Technik“, NJW 2013, S. 3000 |
| Spannowsky | Planungsrechtliche Steuerung von Vorhaben der Erneuerbaren Energien durch Verträge - Möglichkeiten vertraglicher Gestaltungen zur bauplanungs- und raumordnungsrechtlichen Steuerung von Vorhaben in den Bereichen Biomasse, Photovoltaik und Repowering von Windenergie-Anlagen, UPR 2009, S. 201. |
| Spannowsky/Uechtritz | Baugesetzbuch, Kommentar, 2009 |
| Spannowsky/Runkel/Goppel | Raumordnungsgesetz, Kommentar, 2010 |
| Steiner | Besonderes Verwaltungsrecht, 8. Aufl. 2006 |
| Stolz/Kraus | „Ausschreibungspflichten im Rahmen von Geothermieprojekten“, VergabeR 6/2008, S. 894 |
| Stüer | „Umweltschutz im Vergaberecht-Kreislaufwirtschafts-Öffentlichkeitsbeteiligung-Geothermie“, DVBl. 2008, S. 1559 |
| Stüer/Stüer | Die BauGB-Klimanovelle und das Energiefach- und -finanzierungsrecht 2011, DVBl. 2011, S. 1117. |
| Versteyl/Mann/Schomerus | Kreislaufwirtschaftsgesetz Kommentar, 3. Auflage, 2012 |
| Vieweg | Technische Sicherheit im digitalen Zeitalter, in: Energie – Wirtschaft – Recht, Festschrift für Peter Salje zum 65. Geburtstag am 09. Februar 2013, Seite 439 |
| Wagner | „Privilegierung von Windkraftanlagen im Außenbereich und ihre planerische Steuerung durch die Gemeinde“, UPR 1996 S. 370 |

Waechter Der Umgang mit privaten Normen (DIN etc.) am Beispiel des
Baurechts, NVwZ 2013, Seite 1251

Ziekow Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung, NVwZ 2013, S. 754

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-------------------------|--|---|
| Ablagerungen (Scale) | Ablagerungen hängen von den in den Thermalwassern gelösten Mineralen ab, aber auch vom Gasgehalt, der Temperatur und dem Druck unter dem die Anlage betrieben wird sowie den Werkstoffen, die mit dem Wasser in Kontakt stehen. Meist tritt die Bildung von Ablagerungen und Korrosion gemeinsam auf. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 |
| Ableitungen | Abgabe flüssiger, aerosolgebundener oder gasförmiger, auch radioaktiver, Stoffe aus Anlagen und Einrichtungen auf hierfür vorgesehenen Wegen. Ableitungen werden durch zulässige Ableitungsgrenzwerte begrenzt. | Nach StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Aktivität, spezifische | Verhältnis der Aktivität eines Radionuklids zur Masse des Materials, in dem das Radionuklid verteilt ist. Bei festen radioaktiven Stoffen ist die Bezugsmasse für die Bestimmung der spezifischen Aktivität die Masse des Körpers oder Gegenstandes, mit dem die Radioaktivität bei vorgesehener Anwendung untrennbar verbunden ist. Bei gasförmigen radioaktiven Stoffen ist die Bezugsmasse die Masse des Gases oder Gasgemisches. | StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Aktivitätskonzentration | Verhältnis der Aktivität eines Radionuklids zum Volumen des Materials, in dem das Radionuklid verteilt ist. | StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Arbeiten | Handlungen, die, ohne Tätigkeit zu sein, bei natürlich vorkommender Radioaktivität die Strahlenexposition oder Kontamination erhöhen können a) im Zusammenhang mit der Aufsuchung, Gewinnung, Erzeugung, Lagerung, Bearbeitung, Verarbeitung und sonstigen Verwendung von Materialien, b) soweit sie mit Materialien erfolgen, die bei betrieblichen Abläufen anfallen, soweit diese Handlungen nicht bereits unter Buchstabe a) fallen, c) im Zusammenhang mit der Verwertung oder Beseitigung von Materialien, die durch Handlungen nach Buchstabe a) oder b) anfallen, d) durch dabei einwirkende natürliche terrestrische Strahlungsquellen, insbesondere von Radon-222 und Radonzerfallsprodukten, soweit diese Handlungen nicht bereits unter Buchstaben a bis c fallen und nicht zu einem unter Buchstabe a genannten Zweck erfolgen, | StrSchV vom 20. Juli 2001 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|------------------------|---|---|
| | <p>oder</p> <p>e) im Zusammenhang mit der Berufsausübung des fliegenden Personals in Flugzeugen. Nicht als Arbeiten im Sinne dieser Verordnung gelten die landwirtschaftliche, forstwirtschaftliche oder bautechnische Bearbeitung der Erdoberfläche, soweit diese Handlungen nicht zum Zwecke der Entfernung von Verunreinigungen nach § 101 erfolgen.</p> | |
| Arbeitsmedium | Fluid, mit dem tiefengeothermische Energie an der Erdoberfläche zur Strom und/oder Wärme- produktion genutzt wird. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 |
| Aufschluss | Mittel und Maßnahmen zur Feststellung von Art, Aufbau und Verbreitung des anstehenden Bodens und Fels sowie der Grundwasserverhältnisse (DIN 4020:2003-09). Aufschlüsse können durch natürliche geologische Prozesse wie beispielsweise Abtragung (Steilufer, Schichtstufen etc.) oder menschliche Tätigkeit (Bau-, Sand- und Kiesgruben, Bergbau, Straßeneinschnitte, Schurfgräben etc.) entstehen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 |
| Aufsuchen (Aufsuchung) | <p>Mittelbar oder unmittelbar auf die Entdeckung oder Feststellung der Ausdehnung von Bodenschätzen gerichtete Tätigkeit mit Ausnahme der Tätigkeiten im Rahmen der amtlichen geologischen Landesaufnahme,</p> <p>der Tätigkeiten, die ausschließlich und unmittelbar Lehr- oder Unterrichtszwecken dienen und</p> <p>des Sammelns von Mineralien in Form von Handstücken oder kleinen Proben für mineralogische oder geologische Sammlungen.</p> <p>Eine großräumige Aufsuchung ist eine mit Hilfe von geophysikalischen oder geochemischen Verfahren durchgeführte Untersuchung, wenn sie auf die Ermittlung von Kennwerten beschränkt ist, die großräumige Rückschlüsse auf das mögliche Vorkommen von Bodenschätzen zulassen.</p> | BBergG, § 4 Abs. 1 |
| Bequerel | <p>Einheit für die Aktivität eines Radionuklids.</p> <p>Eine Aktivität von 1 Becquerel (1 Bq) entspricht einem Zerfall pro Sekunde für eine bestimmte Menge eines Radionuklids. Früher wurde die Einheit Curie (Ci) verwendet. 1 Ci = 3.7*10¹⁰ Bq.</p> | Glossar Strahlenschutz des Forschungszentrum Jülich |
| Bergbauunternehmer | Eine natürliche oder juristische Person oder Personenhandels-gesellschaft, die eine der in § 2 Abs. 1 Nr. 1 und 2 BBergG bezeichneten Tätigkeiten auf eigene Rechnung durchführt oder durchführen lässt. | BBergG, § 4 Abs. 5 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-------------------------------|--|---|
| Bergschaden | Verletzungen des Körpers oder der Gesundheit eines Menschen, Tötung eines Menschen oder Beschädigung einer Sache infolge der Ausübung einer Tätigkeit im Zusammenhang mit dem Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Erdwärme sowie der Wiedernutzbarmachung der Oberfläche während und nach der Aufsuchung, Gewinnung und Aufbereitung. Bergschäden sind auch o.g. Verletzungen, Tötungen oder Sachbeschädigungen durch eine Betriebsanlage oder Betriebseinrichtung, die überwiegend der Aufsuchung, Gewinnung, Aufbereitung von Erdwärme sowie der Wiedernutzbarmachung der Oberfläche während und nach der Aufsuchung, Gewinnung und Aufbereitung dienen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 ff. In Bezug auf die im Detail komplexen Differenzierungen siehe BBergG, § 114 |
| Betriebsgelände | Grundstück, auf dem sich Anlagen oder Einrichtungen befinden und zu dem der Zugang oder auf dem die Aufenthaltsdauer von Personen durch den Strahlenschutzverantwortlichen beschränkt werden können. | Nach StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Bewirtschaftungsziele | Bezüglich der einzelnen Gewässerarten bestehen gesetzliche Bewirtschaftungsziele. Nach §§ 27, 44, 47 WHG sind oberirdische Gewässer natürlicher bzw. künstlicher Art, Küstengewässer und das Grundwasser so zu bewirtschaften, dass eine nachhaltige Veränderung ihres ökologischen bzw. mengenmäßigen und chemischen Zustands bzw. Potenzials vermieden und ein guter derartiger Zustand erhalten oder erreicht wird. § 47 fordert für das Grundwasser ferner die Umkehrung anthropogener Schadstoffkonzentrationen sowie die Gewährleistung eines Gleichgewichts zwischen Entnahme und Neuerungsbildung. | Peters, Umweltrecht, 4. Auflage 2010, Rn. 574 |
| Boden (Begriff nach BBodSchG) | Boden im Sinne des BBodSchG ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der in § 2 Abs. 2 BBodSchG genannten Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten. | BBodSchG, § 2 Abs. 1 |
| Bodenschätze, bergfreie | Stehen nicht im Eigentum des Grundeigentümers. Auf bergfreie Bodenschätze erstreckt sich das Eigentum an einem Grundstück nicht. Erdwärme gilt nach § 3 Abs. 3 Nr. 2 b BBergG als bergfreier Bodenschatz. | BBergG, § 3 Abs. 2 und 3 |
| Bodenschätze, grundeigene | Stehen im Eigentum des Grundeigentümers. Auf bergfreie Bodenschätze erstreckt sich das Eigentum an einem Grundstück nicht. | BBergG, § 3 Abs. 2 |
| Bohrablaufplanung | Stellt die aufeinanderfolgenden Ausführungsschritte einer Bohrung mit hoher Detailgenauigkeit in den wesentlichen Punkten dar. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|--------------------------|--|--|
| Bohranlage | Technik zur Erschließung Tiefer Geothermie. Als Grad für die Einsatzgröße einer Bohranlage dient üblicherweise die zulässige Hakenlast, d. h. welche Last mit der Bohranlage gehalten bzw. gezogen werden kann. Für Bohrungen zur Tiefengeothermie in Deutschland kommen bisher Bohreinheiten mit Hakenlasten von 150 bis 500 t zum Einsatz. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 |
| Bohrkeller | Wird im Bereich des Bohransatzpunktes erstellt. Hier können überschüssige Spülung und Zementsuspension kontrolliert gefasst und bei Bedarf Teile der Sicherheitseinrichtungen untergebracht werden. Nach Fertigstellung der Bohrarbeiten bietet sich der Bohrkeller zur Aufnahme des sog. Bohrlochkopfs an. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Bohrlayout | Es übersetzt die zum Planungszeitpunkt vorhandenen Informationen über Lithologie, Hydraulik, Tektonik und Lagerstätte in ein wirtschaftlich und technisch optimiertes Bohrungsdesign. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 98 f. |
| Bohrlochtest | Mit hydraulischen Bohrlochtests werden geohydraulische Parameter wie u. a. die Transmissivität, die Permeabilität und der Speicherkoeffizient ermittelt. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Bohrplatz | Fläche, auf der die Tiefbohrung oder die Tiefbohrungen abgeteuft wird/werden einschließlich Peripherie der Bohranlage (zum Beispiel 3.000 bis 5.000 m ²). Jeder Bohrplatz braucht eine ordnungsgemäße Zufahrt und eine Einfriedung der Bohrstelle. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Bohrspülung | Fluid, das im Bohrgestänge abwärts gepumpt wird, um nach dem Austritt durch den Bohrmeißel mit Bohrklein beladen im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwandung aufzusteigen. Das Bohrklein („Cuttings“) wird über Tage separiert, das Wasser im Kreislaufprozess genutzt. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Bohrunternehmer | Stellt sicher, dass sämtliche für den Bohrprozess notwendigen Geräte und Werkzeuge den jeweiligen Anforderungen entsprechen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| BOP (Blow-Out-Preventer) | Einzelne oder als "BOP Stack" kombinierte Vorrichtung zum kontrollierten Verschluss des Bohrlochs bei eindringenden Gasen oder Fluiden. Der BOP verschließt den Ringraum zwischen der obersten Verrohrung und dem Bohrgestänge oder das gesamte Bohrloch bei ausgebautem Gestänge. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-------------------------------------|---|--|
| Bundesberggesetz (BBergG) | Das BBergG regelt das Aufsuchen, Gewinnen und Aufbereiten von Bodenschätzen zur Sicherung der Rohstoffversorgung. Gegenstand des BBergG sind daher insbesondere verwaltungsrechtliche Fragen von der Erkundung, über die Gewinnung eines Rohstoffs bis zur Schließung eines Bergwerkes oder Tagebaus. Das Bundesberggesetz regelt außerdem die Zuständigkeit der Bergbehörden. | Siehe BBergG |
| Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) | Vollständiger Gesetzestitel: „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten“ Das Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) ist ein 1999 in Kraft getretenes bundesdeutsches Gesetz, das zusammen mit den Bodenschutzgesetzen der Länder den Hauptteil des bundesdeutschen Bodenschutzrechts bildet. Das Gesetz wird ergänzt durch die Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV). | Siehe BBodSchG |
| Choke Manifold | Teil der Bohrlochkontrollleinrichtung. Vorrichtung aus Ventilen und Verschlüssen zur Verteilung der Pumpenströme bei geschlossenem BOP. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Cuttings (Bohrklein) | Zertrümmertes Gestein unterschiedlicher Größe, das mit der Bohrspülung an die Erdoberfläche gespült wird. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Degasser | Vorrichtung zur Abscheidung von Gasanteilen aus dem Spülstrom. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Dekanter | Teil der Feststoffkontrollleinrichtung. Zentrifuge zur Abscheidung feiner und feinst suspensierter Feststoffanteile aus Bohrspülungen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 |
| Desander | Auch Desilter. Hydrozyklone als Teil der Feststoffkontrollleinrichtung zur Abscheidung der Sand- (Desander) bzw. Schlufffraktion (Desilter) aus Bohrspülungen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 99 f. |
| Drehtisch | Am Bohranlagenunterbau befestigtes Antriebsselement zur Übertragung der Drehbewegung auf den Bohrstrang und zur Aufnahme der Axiallasten von Bohrstrang und Verrohrung. Die Drehbewegung des Drehtisches wird über die auf dem Bohrstrang montierte sog. 6- oder 8-eckige Kellystange auf das Bohrgestänge übertragen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 100 |
| Drilling Spool | Teil des Bohrlochkontrollsystems mit Hochdruckanschlüssen zur Bohrlochkontrolle bei geschlossenem BOP. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 100 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|--|--|--|
| Dublette | Tiefengeothermische Anlage, die aus einem Förder- und einem Injektionsbrunnen besteht. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 100 |
| Durchlässigkeitsbeiwert (Hydraulische Leitfähigkeit) | Als Durchlässigkeitsbeiwert oder Hydraulische Leitfähigkeit bezeichnet man einen rechnerischen Wert, der in der Regel die Durchlässigkeit von Boden oder Fels für Wasser quantifiziert. | Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 16.03.2011 |
| Einwirkungsbereich (bodenschutzrechtlich) | Bereich, in dem von einem Grundstück im Sinne des § 2 Abs. 3 bis 6 des Bundes-Bodenschutzgesetzes Einwirkungen auf Schutzgüter zu erwarten sind oder in dem durch Einwirkungen auf den Boden die Besorgnis des Entstehens schädlicher Bodenveränderungen hervorgerufen wird. | BBodSchV, § 2 Nr. 2 |
| Einzelpersonen der Bevölkerung | Mitglieder der allgemeinen Bevölkerung, die nicht den arbeitsschutzrechtlichen Bestimmungen der Anlage unterliegen. | Nach StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Engineered-Geothermal-System (EGS) | Früher auch als Hot-Dry-Rock-Verfahren bezeichnet, gehört zu den petrothermalen Systemen und nutzt die im kristallinen Grundgebirge der oberen Erdkruste vorhandenen Klüfte zur Erzeugung eines Gesteins-Wärmetauschers. Dabei wird über eine Injektionsbohrung Wasser in das Klufsystem gepresst. Über eine Förderbohrung gelangt das durch das heiße Gestein aufgeheizte Wasser wieder an die Erdoberfläche. Die Zuflussbedingungen der Bohrung können künstlich verbessert werden, um die Wirtschaftlichkeit der Thermalwasserproduktion zu steigern (zum Beispiel durch Hydraulic-Fracturing oder Säurebehandlung). | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 100 |
| Entlassung von Rückständen aus der Überwachung | Überwachungsbedürftige Rückstände können zum Zwecke einer bestimmten Verwertung oder Beseitigung durch schriftlichen Bescheid durch die zuständige Behörde aus der Überwachung entlassen werden, wenn aufgrund der Umstände des Einzelfalls und der getroffenen Schutzmaßnahmen der erforderliche Schutz der Bevölkerung vor Strahlenexpositionen sichergestellt ist. Maßstab hierfür ist, dass als Richtwert hinsichtlich der durch die Beseitigung oder Verwertung bedingten Strahlenexposition von Einzelpersonen der Bevölkerung eine effektive Dosis von 1 Millisievert im Kalenderjahr auch ohne weitere Maßnahmen nicht überschritten wird. Eine abfallrechtliche Verwertung oder Beseitigung ohne Entlassung aus der Überwachung ist nicht zulässig. | StrSchV § 98 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|----------------------------------|---|--|
| Erdaufschlüsse | Arbeiten, die so tief in den Boden eindringen, dass sie sich unmittelbar oder mittelbar auf die Bewegung, die Höhe oder die Beschaffenheit des Grundwassers auswirken können. | WHG, § 49 Abs. 1 |
| Erdkruste / Erdrinde | Die Erdkruste oder Erdrinde ist die äußere, feste Schicht der Erde. Unter ihr liegen der feste bis zähplastische Erdmantel und 2900 km tiefer der großteils flüssige Erdkern. Im Schalenbau der Erde bildet die Erdkruste zusammen mit dem lithosphärischen Mantel die Lithosphäre. | Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 17.03.2011 |
| Erheblich veränderte Gewässer | Durch den Menschen in ihrem Wesen physikalisch erheblich veränderte oberirdische Gewässer oder Küstengewässer. | WHG, § 3 Abs. 5 |
| Erschütterungsmessung | Untersucht die Wirkung von Oberflächenwellen auf bauliche Einrichtungen bei einer seismischen Messung (zum Beispiel nach DIN 4150-3). | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 101 |
| Exposition, natürliche Strahlen- | Durch natürliche radioaktive Stoffe oder kosmische Strahlung hervorgerufene Strahlenexposition. Die Strahlenexposition ausgehend von natürlichen Quellen beträgt in Deutschland durchschnittlich etwa 2,1 mSv im Jahr (effektive » Dosis). Je nach Lebens- und Essgewohnheiten, nach Höhenlage, in der sich der Mensch aufhält, und nach geologischem Umfeld schwankt sie zwischen 1 und 10 mSv/a. Die natürliche Strahlenexposition entspricht etwa der "zivilisatorischen Strahlenexposition" (mittlere effektive Dosis: 2,0 mSv/a) aus medizinischen und technischen Anwendungen. | Glossar Strahlenschutz Forschungszentrum Jülich |
| Exposition, Strahlen- | Einwirkung ionisierender Strahlung auf den menschlichen Körper. Ganzkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender Strahlung auf den ganzen Körper, Teilkörperexposition ist die Einwirkung ionisierender Strahlung auf einzelne Organe, Gewebe oder Körperteile. Äußere Strahlenexposition ist die Einwirkung durch Strahlungsquellen außerhalb des Körpers, innere Strahlenexposition ist die Einwirkung durch Strahlungsquellen innerhalb des Körpers. | StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Expositionspfad | Mögliche Wege der radioaktiven Stoffe von der Ableitung aus einer Anlage oder Einrichtung über einen Ausbreitungs- oder Transportvorgang bis zu einer Strahlenexposition des Menschen. Expositionspfade werden als relevant bezeichnet wenn sie entweder durch Inkorporation (über Ernährungsketten), durch Inhalation oder durch externe Bestrahlung einen nennenswerten Beitrag zur Strahlenexposition eines Menschen liefern. | Glossar KONRAD BfS |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-------------------------------------|--|--|
| Feld | Ein Ausschnitt aus dem Erdkörper, der von geraden Linien an der Oberfläche und von lotrechten Ebenen nach der Tiefe begrenzt wird, soweit nicht die Grenzen des Geltungsbereichs des BBergG einen anderen Verlauf erfordern. | BBergG, § 4 Abs. 7 |
| Freigabe | Verwaltungsakt, der die Entlassung radioaktiver Stoffe sowie beweglicher Gegenstände, von Gebäuden, Bodenflächen, Anlagen oder Anlagenteilen, die aktiviert oder mit radioaktiven Stoffen kontaminiert sind und die aus Tätigkeiten nach StrSchV § 2 Abs. 1 Nr. 1 Buchstabe a, c oder d stammen, aus dem Regelungsbereich a) des Atomgesetzes und b) darauf beruhender Rechtsverordnungen sowie verwaltungsbehördlicher Entscheidungen zur Verwendung, Verwertung, Beseitigung, Innehabung oder zu deren Weitergabe an Dritte als nicht radioaktive Stoffe bewirkt. | StrlSchV §3, Abs. 2 Abs. 15 |
| Fündigkeitsversicherung | Ermöglicht die teilweise Abdeckung des Fündigkeitsrisikos durch Zahlung einer Versicherungsprämie auf der Grundlage eines konkreten Vertrags. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 101 |
| Gehobene wasserrechtliche Erlaubnis | Siehe hierzu: Wasserrechtliche Benutzungs- und Anlagenregelungen. | WHG, Landeswassergesetze |
| Geophone | Elektromechanische Wandler, die Bodenschwingungen in analoge Spannungssignale umwandeln. Sie registrieren reflektierte Wellen bei seismischen Untersuchungen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 101 |
| Geophysikalische Bohrlochmessungen | Bohrlochmesskampagnen, die der Charakterisierung des Reservoirs dienen, werden abschnittsweise im Open-Hole Bereich durchgeführt. Bei sog. Wireline-Messungen hängen die Sonden an einem Messkabel, über das der Datentransfer erfolgt. Neben dem klassischen Wireline-Logging kommen zunehmend LWD-Verfahren (Logging-While-Drilling) zum Einsatz. Beim LWD sind die Bohrlochmessgeräte in den Bohrstrang integriert und befinden sich unmittelbar hinter dem Bohrkopf. Dies ermöglicht eine Online-Vermessung der Formation. Die Technik ist im Vergleich zum Wireline-Logging erheblich teurer und kommt vor allem in stark geneigten bis horizontalen Bohrungen zum Einsatz. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 101 |
| Geothermale Nutzungssysteme | Technologien und Verfahren zur Nutzung von Erdwärme (z.B. EGS-Verfahren, Hydrothermale Doublette, tiefe Erdwärmesonde). | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 102 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|---------------------------|--|---|
| Geothermie | <p>Oberbegriff für die thermische Nutzung von Erdwärme. Oberflächennahe Geothermie bezeichnet die geothermische Nutzung des Baugrunds meist bis 150 m, max. bis 400 m Tiefe, Tiefe Geothermie die geothermische Nutzung des Untergrundes ab Tiefe 400 m und Temperaturen von mehr als 20°C, im eigentlichen Sinne aber erst bei Tiefen von über 1000 m und Temperaturen über 60 °C. Bei der Grenztiefe handelt es sich um eine verfahrenstechnische Festlegung.</p> <p>Die tiefe Geothermie umfasst Systeme, bei denen die geothermische Energie über Tiefbohrungen erschlossen wird und deren Energie direkt (d.h. ohne Niveauehebung). Siehe auch Hydrothermale System bzw. petrothermale Systeme.</p> | <p>VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 101</p> <p>PK Tiefe Geothermie: Definitionen 08.02.2007 (GeoSys ID 245)</p> |
| Geothermische Tiefenstufe | Vertikale Strecke, auf der eine Temperaturzunahme in der Erdkruste von einem Grad Celsius zu beobachten ist. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 102 |
| Geothermischer Gradient | Änderung der Bohrtemperatur mit der Tiefe. Der geothermische Gradient wird in K/m, K/100 m oder K/1000 m angegeben. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 102 |
| Gewässereigenschaften | Die auf die Wasserbeschaffenheit, die Wassermenge, die Gewässerökologie und die Hydromorphologie bezogenen Eigenschaften von Gewässern und Gewässerteilen. | WHG, § 3 Abs. 7 |
| Gewässerzustand | Die auf Wasserkörper bezogenen Gewässereigenschaften als ökologischer, chemischer oder mengenmäßiger Zustand eines Gewässers; bei als künstlich oder erheblich verändert eingestuftem Gewässern tritt an die Stelle des ökologischen Zustands das ökologische Potenzial. | WHG, § 3 Abs. 8 |
| Gewinnen (Gewinnung) | <p>Das Lösen oder Freisetzen von Bodenschätzen einschließlich der damit zusammenhängenden vorbereitenden, begleitenden und nachfolgenden Tätigkeiten; ausgenommen ist das Lösen oder Freisetzen von Bodenschätzen</p> <p>in einem Grundstück aus Anlass oder im Zusammenhang mit dessen baulicher oder sonstiger städtebaulicher Nutzung und</p> <p>in oder an einem Gewässer als Voraussetzung für dessen Ausbau oder Unterhaltung.</p> | BBergG, § 4 Abs. 2 |
| Gewinnungsbeziehung | Das Recht zur Gewinnung von bergfreien oder grundeigenen Bodenschätzen | BBergG, § 4 Abs. 6 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-----------------------------|--|--|
| Gewinnungsbetrieb | Einrichtungen zur Gewinnung von bergfreien und grundeigenen Bodenschätzen. | BergG, § 4 Abs. 8 |
| Gleichgewicht, radioaktives | Die Radionuklide einer Zerfallsreihe befinden sich im radioaktiven Gleichgewicht, wenn ihre Zerfallsrate (Aktivität) gleich ihrer Bildungsrate (Aktivität der Mutternuklide) ist. Ist die Halbwertszeit des Mutternuklides deutlich größer als die Halbwertszeit des Tochternuklides stellt sich in chemisch-physikalisch geschlossenen Systemen schnell ein radioaktives Gleichgewicht ein: Durch den Zerfall des Mutternuklides werden immer genau so viele Atome des Tochternuklides nachgebildet, wie im gleichen zeitlichen Betrachtungsraum Tochternuklidatome zerfallen (säkulare Gleichgewicht). | |
| Gleichgewicht, transientes | Gleichgewicht eines Gemisches von Mutter- und Tochternuklid, bei dem die Halbwertszeit des Mutternuklides größer, aber nicht beträchtlich größer als die des Tochternuklides ist. In der Folge erreicht die Aktivität des Tochternuklides ein Maximum und zerfällt dann parallel zum Mutternuklid ohne dessen Aktivität zu erreichen. | |
| Grundwasser | Das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht. | WHG, § 3 Abs. 3 |
| Heißwasser Aquifer | Aquifere (Grundwasserleiter) sind hochpermeable, gering mächtige Gesteinsschichten, die ausreichend durchlässige Bestandteile enthalten, um signifikante Mengen an Wasser zu speichern oder dem Gefälle entsprechend weiterzuleiten. Heißwasser Aquifere sind Grundwasserleiter mit einer Wassertemperatur ab 100 Grad Celsius. | Frick. S., et al, 2007: Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung |
| Hydraulic Fracturing | Einpressen eines Fracfluides in eine Bohrung mit dem Ziel, künstliche Risse zu erzeugen. Ziel ist es dabei, die Permeabilität in der Nähe dieser im Produktionsbereich zu erhöhen, wenn dies eine wirtschaftlichere Förderung der zu fördernden Ressource erlaubt oder gerade die Förderung erst ermöglicht. | Wikipedia |
| Hydraulische Leitfähigkeit | Siehe Durchlässigkeitsbeiwert | |
| Hydrothermale Doublette | Über eine Förderbohrung gelangt heißes Wasser aus einem tiefen Grundwasserleiter an die Erdoberfläche und gibt an einem Wärmetauscher die geothermale Energie ab. Das abgekühlte Wasser wird über eine Injektionsbohrung wieder in den ursprünglichen Grundwasserleiter zurückgegeben. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 102 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|---------------------------------|--|--|
| Hydrothermale Systeme | <p>Hydrothermale Systeme mit niedriger Enthalpie (Wärmeinhalt): Überwiegende Nutzung des im Untergrund vorhandenen Fluids; sie erfolgt meist direkt (ggf. über Wärmetauscher), manchmal auch mit Wärmepumpen (aber nicht zwingend erforderlich), zur Speisung von Nah- und Fernwärmenetzen, zur landwirtschaftlichen oder industriellen Nutzung oder für balneologische Zwecke; ab ca. 100 °C ist eine Verstromung möglich. Beispiele sind Aquifere mit heißem (> 100 °C), warmem (60 -100 °C) oder thermalem (> 20 °C) Wasser und Störungen im gleichen Temperaturbereich (Potenzial abgeschätzt, Realisierung bisher nicht nachgewiesen).</p> <p>Hydrothermale Systeme mit hoher Enthalpie: Nutzung von Dampf- oder Zweiphasensystemen zur Stromerzeugung; in dieser Form in Deutschland nicht vorhanden.</p> | PK Tiefe Geothermie: Definitionen 08.02.2007 (GeoSys ID 245) |
| Ingestion | Aufnahme von (radioaktiven) Stoffen durch den Verdauungstrakt. | |
| Inhalation | Aufnahme von (radioaktiven) Stoffen durch Einatmen. | |
| Injektions- oder Schluckbohrung | Bohrung, durch die geothermales Wasser, dessen Energie genutzt worden ist, wieder in den ursprünglichen Grundwasserhorizont gelangt. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 102 |
| Inkorporation | Aufnahme von (radioaktiven) Stoffen in den Körper. | |
| Kalina-Kreisprozess | Dieses Wärmetauschverfahren ist um 1970 vom russischen Ingenieur Alexander Kalina beschrieben und patentiert worden. Es arbeitet unter Verwendung von Ammoniak-Wasser als Arbeitsmedium. Im Wesentlichen handelt es sich um Clausius-Rankine-Prozesse mit einem hohen Grad an interner Wärmerückgewinnung unter Verwendung zusätzlicher Separations- und Mischeinheiten. Es ist bei Temperaturniveaus ab ca. 90°C einsetzbar. Die Wärme des Thermalwassers wird an das Arbeitsmedium abgegeben. Der wesentliche Unterschied zum ORC-Verfahren ist die Verwendung eines Gemisches als Arbeitsfluid und dessen Konzentrationsänderungen durch die Wärmezufuhr bzw. Wärmeabfuhr. Der Kalina-Prozess erreicht eine signifikant bessere Wärmeübertragung von der Niedertemperaturquelle als das ORC-Verfahren, hat aber eine teurere Anlagenkonstruktion. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 102 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|----------------------------|--|---|
| Kalina-Verfahren | <p>Als Arbeitsmittel wird eine kostengünstige Mischung aus Ammoniak und Wasser eingesetzt. Durch die unterschiedlichen Siedepunkte der beiden Stoffe entstehen so ein Ammoniak-reicher Dampf und eine Ammoniak-arme Flüssigkeit. Der Dampf wird von der Flüssigkeit getrennt und einer Turbine zugeführt. Ein angeschlossener Generator dient der Stromerzeugung. Nach dem Turbinenaustritt werden die getrennten Stoffströme wieder zusammengeführt und vollständig kondensiert. Eine Pumpe befördert das Gemisch nun wieder an den Ausgangspunkt des Prozesses, zum Wärmeübertrager.</p> <p>Höherer Wirkungsgrad im Vergleich bspw. zum ORC-Prozess. Dem steht eine komplexe und teilweise kostenintensivere Anlagentechnik gegenüber.</p> | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Tiefe Geothermie in Deutschland |
| Kontamination | Als Kontamination wird eine Verunreinigung von Boden, Wasser oder Luft durch Schadstoffe bezeichnet. | |
| Kontamination, radioaktive | <p>Oberflächenkontamination:</p> <p>Verunreinigung einer Oberfläche mit radioaktiven Stoffen, die die nicht festhaftende, die festhaftende und die über die Oberfläche eingedrungene Aktivität umfasst. Die Einheit der Messgröße der Oberflächenkontamination ist die flächenbezogene Aktivität in Becquerel pro Quadratzentimeter.</p> | Nach StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Konversionstechnik | Konversion (lat. conversio „Umwendung“, „Umkehr“) Das heiße Thermalwasser aus dem Primärkreislauf überträgt seine Wärme an den Konversionskreislauf der Wärme-Kraft-Maschine. In dieser zirkuliert ein Arbeitsmittel (organischer Stoff beim ORC oder ein Ammoniak-Wasser-Gemisch beim Kalina-Cycle), welches verdampft wird und anschließend in einer Turbine Arbeit leistet. Dies führt zu einer erheblichen Steigerung des Wirkungsgrades. | Frick, S., Kaltschmitt, M. (2009): Ökologische Aspekte einer geothermischen Stromerzeugung - Analyse und Bewertung der Umwelteffekte im Lebensweg. - Erdöl, Erdgas, Kohle, 125, 1, 37-42. |
| Kooperationsprinzip | Das Kooperationsprinzip als eines der drei grundlegenden Umweltprinzipien (neben dem Vorsorgeprinzip und dem Verursacherprinzip) bezieht sich auf das Zusammenwirken von Staat und Gesellschaft, die bei der Erfüllung von Umweltaufgaben des Staates und Umweltpflichten des Einzelnen miteinander bzw. aufeinander bezogen arbeiten, soweit gesetzliche Vorschriften dies Vorsehen oder nicht entgegenstehen. | Storm, Umweltrecht, 2. Auflage 2010, Seite 25. |
| Machbarkeitsstudie | In einer Machbarkeitsstudie werden die Projekt-Grundlagen erarbeitet. Sie sind die Basis für transparente und nachvollziehbare Entscheidungen des Auftraggebers zur weiteren Vorgehensweise. Zu unterscheiden sind zwei | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 103 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|--|---|--|
| | große Bereiche: geologische und hydrogeologische Aspekte sowie energie- und versorgungstechnische Aspekte. | |
| Mammutpumpe (Druckluftheber, Airlift, Gaslift) | Vorrichtung zum Heben von Flüssigkeiten durch Einblasen von Luft unterhalb des Wasserspiegels eines in die Bohrung eingebrachten Förderrohrs. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 103 |
| Monitoring | Als Monitoring wird die Vorgehensweise zur Erfassung natürlicher Abbau- und Rückhaltprozesse an einem kontaminierten Standort über einen vorher definierten Untersuchungszeitraum (Langzeituntersuchungen) bezeichnet. Es gliedert sich in eine Startuntersuchung, ein Verlaufsmoitoring zur Überprüfung der prognostizierten Entwicklung der Schadstoffgehalte und eine Abschlussuntersuchung. | |
| Natürlicher Schadstoffabbau und -rückhalt | Der Begriff bezeichnet physikalische, chemische und biologische Prozesse, die ohne menschliches Eingreifen zu einer Verringerung der Masse, der Toxizität, der Mobilität, des Volumens oder der Konzentration eines Stoffes im Boden und Grundwasser führen. | |
| NORM | Naturally Occuring Radioactive Material. Sie werden natürlichen Stoffen, die stets gleichfalls natürliche Radionuklide enthalten gegenüber abgegrenzt, wenn die spezifische Aktivität geogene Hintergrundwerte übersteigt und u.U. ein Expositionsrisiko von Beschäftigten bei Arbeiten mit NORM oder der Bevölkerung (z.B. im Rahmen der Verwertung oder Beseitigung von NORM) besteht. | |
| Nachhaltigkeit | Entwicklung zukunftsfähig (nachhaltig) zu machen, heißt, dass die gegenwärtige Generation ihre Bedürfnisse befriedigt, ohne die Fähigkeit der zukünftigen Generation zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse befriedigen zu können. | Brundland-Bericht 1987 - UN Kommission für Umwelt und Entwicklung |
| Nuklidvektor | Beschreibung eines Gemisches von Radionuklide, wobei für jedes einzelne Nuklid das Verhältnis seiner Aktivität zur Gesamtaktivität des Gemisches angegeben wird. $\mu_i = \frac{A_i}{\sum A_i}$ | |
| Oberirdische Gewässer | Ständig oder zeitweilig in Betten fließende oder stehende oder aus Quellen wild abfließende Wasser. | WHG, § 3 Abs. 1 |
| öffentliche Wasserversorgung | Die der Allgemeinheit dienende Wasserversorgung. | WHG, § 50 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|--------------------------------------|---|---|
| ORC-Verfahren | <p>ORC – Organic Rankine Cycle</p> <p>Beim ORC-Prozess, kommt an Stelle des Wassers ein organisches Arbeitsmittel zum Einsatz, das bereits ab Temperaturen von ca. 30 °C verdampft. Anschließend wird das Arbeitsmittel einer Dampfturbine zugeführt. Hier wird die thermische Energie in Rotationsenergie umgesetzt. Das Arbeitsmittel wird daraufhin in einem sog. Kondensator wieder verflüssigt und zum Wärmeübertrager gepumpt. Dort beginnt der Kreislauf erneut.</p> | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) Tiefe Geothermie in Deutschland |
| Organic Rankine Cycle (ORC) | <p>Das Verfahren wurde Mitte des 19. Jahrhunderts vom schottischen Ingenieur William John Macquorn Rankine entwickelt. Es ersetzt das Arbeitsmittel Wasserdampf durch eine organische Flüssigkeit mit niedriger Verdampfungstemperatur, die eine Dampfturbine antreibt. Je nach verwendetem Arbeitsfluid ist das Verfahren bei Temperaturniveaus ab ca. 100°C wirtschaftlich einsetzbar. Das ORC-Verfahren ist von der Funktionsweise dem herkömmlichen Wasserdampfkraftwerk ähnlich. Beides sind thermodynamische Kreisprozesse, die im Wesentlichen wie folgt ablaufen: Das Arbeitsfluid wird mittels Wärmezufuhr isotherm verdampft. Der Druck wird in der Dampfturbine abgebaut. Die Turbine treibt mit oder ohne Getriebe einen Generator an, der die erzeugte elektrische Energie ins vorgelagerte Netz abgibt. Nach der Turbine wird das Arbeitsfluid über ein Kühlsystem kondensiert. Die Speisepumpe sorgt für die Umwälzung und die notwendige Druckerhöhung.</p> | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 103 |
| Ortsdosis | <p>Äquivalentdosis für Weichteilgewebe, gemessen an einem bestimmten Ort. Die Ortsdosis bei durchdringender Strahlung ist die Umgebungs-Äquivalentdosis $H^*(10)$, bei Strahlung geringer Eindringtiefe die</p> <p>→Richtungs-Äquivalentdosis $H'(0,07, \Omega)$. Die Ortsdosis ist bei durchdringender Strahlung ein Schätzwert für</p> <p>die effektive Dosis und die Organdosis tiefliegender Organe, bei Strahlung geringer Eindringtiefe ein Schätzwert für die Hautdosis einer Person, die sich am Messort aufhält.</p> | Lexikon der Kernenergie |
| Permeabilität | <p>Die Permeabilität wird in der Geotechnik zur Quantifizierung der Durchlässigkeit von Böden und Fels für Flüssigkeiten oder Gase (z. B. Grundwasser, Erdöl oder Erdgas) benutzt. Mit ihr sehr eng verbunden ist der „Durchlässigkeitsbeiwert“.</p> | Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 16.03.2011 |
| Person, beruflich strahlenexponierte | <p>Im Bereich der Arbeiten diejenige, für die die Abschätzung nach § 95 Abs. 1 der StrSchV ergeben hat, dass die effektive Dosis im Kalenderjahr 6 Millisievert überschreiten kann,</p> | StrSchV vom 20. Juli 2001 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-----------------------|--|---|
| | oder für die die Ermittlung nach § 103 Abs. 1 der StrSchV ergeben hat, dass die effektive Dosis im Kalenderjahr 1 Millisievert überschreiten kann. | |
| Petrothermale Systeme | <p>Überwiegende Nutzung der im Gestein gespeicherten Energie. Beispiele sind:</p> <p>Grundgebirge (auch tiefes dichtes Gestein): Energienutzung mit der Hot-Dry-Rock (HDR)-Technik, etwas umfassender auch als Enhanced Geothermal System (EGS) bezeichnet, meist zur Stromerzeugung.</p> <p>Beliebiges Gestein: Energienutzung ohne zusätzliche Stimulationsmaßnahmen mit geschlossenen tiefen Erdwärmesonden, nur zur Wärmeversorgung.</p> | PK Tiefe Geothermie: Definitionen 08.02.2007 (GeoSys ID 245) |
| Processing | In der seismischen Exploration wird zwischen Daten-Akquisition, Processing und (geologischer) Interpretation unterschieden. Das Processing ist die Bearbeitung seismischer Daten zur Reduktion von Störsignalen, Verstärkung der seismischen Nutz-Signale und Verschiebung der seismischen Ereignisse an ihren wahren Ort im dreidimensionalen Raum mittels Software und Computer. Ergebnis ist ein interpretierbares seismisches Abbild des Untergrundes auf vertikalen und horizontalen Schnitten. | Glossar (Lexikon) auf der Seite des GtV - Bundesverband Geothermie e.V http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossarlexikon/p/processing.html , (Stand 16.03.2011) |
| Produktivität | Bezeichnet die Förderrate bzw. die Schüttung einer Bohrung in L/s. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 103 |
| Radioaktivität | <p>Spontaner Zerfall von Radionukliden unter Emission ionisierender Strahlung. Charakteristisch ist die beim Zerfall emittierte Art der Strahlung und ihre Energie.</p> <p>Natürliche Radioaktivität entsteht beim Zerfall in der Natur vorkommender Nuklide (z.B. Uran-238, Radon, Kalium-40).</p> <p>Induzierte Radioaktivität entsteht durch Beschuss einer Substanz mit Neutronen oder mit geladenen Teilchen in Teilchenbeschleunigern.</p> | Glossar Strahlenschutz des Forschungszentrum Jülich |
| Radionuklid | Instabiles Nuklid, das sich spontan und ohne Einwirkung von außen unter Strahlungsemission umwandelt. Radionuklide werden über ihre Halbwertszeit sowie die Art und Energie der ausgesendeten ionisierenden Strahlung charakterisiert. Nuklide sind Atomarten (Elemente), die sich in Ordnungszahl Z und Massenzahl A unterscheiden. Isotope sind Atomarten, die sich in ihren Massenzahlen A unterscheiden, nicht aber hinsichtlich ihrer chemischen Eigenschaften. | Glossar Strahlenschutz des Forschungszentrum Jülich und andere Quellen |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|----------------------------|--|--|
| Rekuperation / Rekuperator | In der Technik ist die Rekuperation (von lateinisch recuperare = wiedererlangen, wiedergewinnen) ursprünglich ein Verfahren zur Vorwärmung von Luft durch bereits warme Abgase, beispielsweise in Feuerungsanlagen. Heute wird der Begriff Rekuperation auch allgemein für technische Verfahren der Energierückgewinnung verwendet. In einer geothermischen Anlage entzieht ein Rekuperator dem Prozess vor Eintritt in den Kühler Wärme und gibt sie an den Systemvorlauf wieder ab. Rekuperatoren werden in der Regel dann eingesetzt, wenn es Restriktionen bezüglich der maximalen Auskühlung des Thermalwassers gibt. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 104 Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 16.03.2011 |
| Reprocessing | Reprocessing ist in der Seismik die Neubearbeitung alter Datensätze die zumeist bei der Kohlenwasserstoffexploration gewonnen wurden. | Glossar (Lexikon) auf der Seite des GtV - Bundesverband Geothermie e.V http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossarlexikon/r/reprocessing.html , (Stand 16.03.2011) |
| Reservoir | Allgemein: Speicher, Vorrat. Die Qualität eines geo-thermischen Reservoirs wird durch seine geologischen, geomechanischen, thermophysikalischen und hydraulischen Eigenschaften bestimmt. Der wichtigste Parameter für alle Nutzungsarten ist die Reservoirtemperatur. | |
| Richterskala | Eine nach oben offene Skala, die in der Seismologie zum Vergleich der Stärke von Beben genutzt wird. Sie basiert auf Amplitudenmessungen von Seismogrammaufzeichnungen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 104 |
| Risikomanagement | Projektbegleitender Prozess zur Identifikation von Risiken und zur Entwicklung und Umsetzung von Begegnungsstrategien. Ein gut strukturiertes Risiko-Management umfasst alle wesentlichen Risiken, die während der gesamten Projektlaufzeit negative Auswirkungen auf den Projektlauf bzw. die Projektkosten haben können. Zu den projektspezifischen Risiken gehören Erkundungs-, Bohr- und Fündigkeitsrisiken oder auch die bergrechtliche Haftung. Ein Teil der Risiken kann auf Versicherer übertragen werden. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 104 |
| Rotary-Druckspülverfahren | Standard-Bohrverfahren, bei dem die Bohrspülung in einem Kreislaufprozess im Bohrgestänge abwärts gepumpt wird, um nach dem Austritt durch den Bohrmeißel mit Bohrgut beladen im Ringraum zwischen Bohrgestänge und Bohrlochwandung aufzusteigen und über Tage auszutreten. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 104 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|------------------------------------|---|---|
| Rückstände | Materialien, die in den in Anlage XII Teil A der StrSchV genannten industriellen und bergbaulichen Prozessen anfallen und die dort genannten Voraussetzungen erfüllen. | StrSchV vom 20. Juli 2001 |
| Rückstände, sonstige | Rückstände, die nicht in Anlage XII Teil A der StrSchV genannt werden, für die aber die zuständige Behörde Maßnahmen anordnen, sofern dies aus radiologischen Gründen erforderlich ist. | StrSchV § 102 |
| Rückstände, überwachungsbedürftige | Überwachungsbedürftig sind Rückstände, wenn ein Radionuklid der Nuklidketten U-238 und Th-232 über 0,2 Bq/g liegt und die Überwachungsgrenzen nach Anlage XII StrSchV Teil B überschritten werden. | StrSchV § 97 |
| Sättigungszone | Unter der (wasser)gesättigten Bodenzone sind die Grundwasser führenden Bodenschichten zu verstehen. Sie sind durch die Grundwasseroberfläche nach oben und die Grundwassersohle nach unten begrenzt. Durch Spiegelgangschwankungen des Grundwassers (variierte Grundwasserstände) unterliegt die wassergesättigte Bodenzone einer räumlich-zeitlichen Dynamik. | |
| Schädliche Bodenveränderungen | Schädliche Bodenveränderungen im Sinne des BBodSchG sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen. | BBodSchG, § 2 Abs. 3 |
| Schädliche Gewässeränderungen | Veränderungen von Gewässereigenschaften, die das Wohl der Allgemeinheit, insbesondere die öffentliche Wasserversorgung, beeinträchtigen oder die nicht den Anforderungen entsprechen, die sich aus diesem Gesetz, aus auf Grund dieses Gesetzes erlassenen oder aus sonstigen wasserrechtlichen Vorschriften ergeben. | WHG, § 3 Abs. 10 |
| Schüttung (Hydrologie) | Das je Zeiteinheit aus einer Quelle/Bohrung austretende Wasservolumen. | Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 16.03.2011 |
| Seismik, Seismische Sektionen | Seismik ist eine Bezeichnung für Verfahren der Angewandten Geophysik, welche die Erdkruste mittels künstlich angeregter seismischer Wellen erforschen und grafisch abbilden. Durch die an der Oberfläche in einem bestimmten Bereich mit Vibratoren, Fallgewichten oder Sprengungen erzeugten Schallwellen, die im Untergrund an den verschiedenen Gesteinsschichten unterschiedlich reflektiert werden, können Aussagen über den Schichtenaufbau des Untergrunds gemacht werden. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 104 Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 17.03.2011 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|---|--|--|
| | <p>In der Seismik werden drei verschiedene Methoden unterschieden, die sich in der Datenerfassung, vor allem aber im Auswerteverfahren grundlegend unterscheiden:</p> <p>Reflexionsseismik: Messung und Interpretation der Energie und Laufzeiten von seismischen Wellen, die an Trennschichten im Untergrund reflektiert werden. Reflexionen treten auf, wenn sich die Impedanz im Untergrund ändert.</p> <p>Refraktionsseismik: Messung und Interpretation der Laufzeiten von seismischen Wellen, die an Trennschichten im Untergrund gebrochen (refraktiert) werden und sich dann als Kopfwellen entlang dieser Trennschichten fortpflanzen.</p> <p>Oberflächenwellenseismik: Messung und Interpretation der Dispersion, also der Abhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Frequenz, von seismischen Oberflächenwellen.</p> | |
| Sequestrierung von CO ₂ | <p>Unter CO₂-Sequestrierung versteht man die Deponierung von Kohlenstoffdioxid (CO₂), das beispielsweise in Kraftwerken entstanden ist. Die Sequestrierung ist Teil des CCS-Prozesses (Carbon Dioxide Capture and Storage) zur CO₂-armen Nutzung fossiler Rohstoffe bei der Stromerzeugung. CO₂ aus der Verbrennung fossiler Energieträger soll abgetrennt und danach eingelagert werden, um nicht in die Atmosphäre zu gelangen. Als Sequestrierung im eigentlichen Sinne bezeichnet man die Einlagerung des CO₂. Als mögliche CO₂-Speicher gelten u.a. geologische Formationen wie Erdöllagerstätten, Erdgaslagerstätten, salzhaltige Grundwasserleiter (sogenannte Aquifere) oder Kohleflöze.</p> | <p>Glossar (Lexikon) auf der Seite des GtV - Bundesverband Geothermie e.V. http://www.geothermie.de/wissenswelt/glossarlexikon/s/sequestrierung-von-co2.html, (Stand 17.03.2011)</p> |
| Sievert | <p>SI-Einheit der Äquivalentdosis und der effektiven Dosis 1 Sievert (Sv) = 100 Rem, 1 Sievert = 1 000 Millisievert (mSv) = 1 000 000 Mikrosievert (µSv).</p> | <p>Glossar Asse II BfS, http://www.endlager-asse.de/DE/0_Service/Glossar/</p> |
| Sole, Thermalsole | <p>Lösung eines Salzes in Wasser</p> | <p>VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105</p> |
| Speisepumpe | <p>Sie dient zur Aufrechterhaltung des Kreisprozesses nach der Kondensation im Kühlsystem und sorgt für die Umwälzung und notwendige Druckerhöhung.</p> | <p>VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 17 und 105</p> |
| Stand der allgemein anerkannten Regeln der Technik (unbestimmter Rechtsbegriff) | <p>Hierunter werden Techniken verstanden, die sich in der Praxis bewährt haben.</p> | <p>Peters, Umweltrecht, 4. Auflage 2010, Rn. 103</p> |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|---|--|--|
| Stand der Technik | Der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen in Luft, Wasser und Boden, zur Gewährleistung der Anlagensicherheit, zur Gewährleistung einer umweltverträglichen Abfallentsorgung oder sonst zur Vermeidung oder Verminderung von Auswirkungen auf die Umwelt zur Erreichung eines allgemein hohen Schutzniveaus für die Umwelt insgesamt gesichert erscheinen lässt; bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere die in der Anlage 1 des WHG aufgeführten Kriterien zu berücksichtigen. | WHG, § 3 Abs. 11 |
| Stand von Wissenschaft und Technik (unbestimmter Rechtsbegriff) | Dieser Maßstab ist an den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen orientiert, einer besonderen betrieblichen Erfahrung bedarf es nicht. | Peters, Umweltrecht, 4. Auflage 2010, Rn. 103 |
| Stilllegung | Endgültige Betriebseinstellung einer technischen Anlage. | |
| Störungssysteme | Risse und/oder Klüfte im Gestein, hervorgerufen zum Beispiel durch Dehnung/Stauchung der Erdkruste. Störungssysteme sind potentielle Wasserwegsamkeiten und damit Voraussetzung für die Nutzung Tiefer Geothermie. EGS erweitert natürliche oder schafft künstliche Störungssysteme. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105 |
| Strömungsmodell | Simulation der Fließbewegung von Fluiden im Untergrund. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105 |
| Subsidenz | Großräumige Senkungen der Erdoberfläche, hervorgerufen durch Volumenverlust im Untergrund. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105 |
| Suffosion | Umlagerung und/oder Abtransport feiner Bodenteilchen im Boden, durch die Strömungsbewegung von Wasser. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105 |
| Tätigkeiten | a) der Betrieb von Anlagen zur Erzeugung von ionisierenden Strahlen, b) der Zusatz von radioaktiven Stoffen bei der Herstellung bestimmter Produkte oder die Aktivierung dieser Produkte, c) sonstige Handlungen, die die Strahlenexposition oder Kontamination erhöhen können, aa) weil sie mit künstlich erzeugten radioaktiven Stoffen erfolgen oder | StrSchV vom 20. Juli 2001 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|----------------------------|---|---|
| | bb) weil sie mit natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen erfolgen, und diese Handlungen aufgrund der Radioaktivität dieser Stoffe oder zur Nutzung dieser Stoffe als Kernbrennstoff oder zur Erzeugung von Kernbrennstoff durchgeführt werden, | |
| TENORM | Materialien, die natürlich vorkommende Radionuklide enthalten, die durch technologische Prozesse eine Aufkonzentration im Aktivitätsgehalt erfahren haben. Der Begriff TENORM sollte nicht mehr verwendet werden und einheitlich durch den Begriff NORM ersetzt werden. | |
| Teufe | Bergmännischer Ausdruck für Tiefe oder Tiefenlage immer bezogen auf die Geländeoberkante. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105 |
| Thermalwassereigenschaften | Für den erfolgreichen Betrieb einer geothermischen Anlage ist die umfassende Kenntnis der Thermalwasserzusammensetzung entscheidend. Mit der Bestimmung der Wärmekapazität, die abhängig ist von den Thermalwasserinhaltsstoffen, kann die Wärmeleistung berechnet und die Auslegung der Wärmenutzung begonnen werden. Die Bestimmung der Wasserqualität und der Inhaltsstoffe erlaubt es, eine mögliche Mehrfachnutzung zu beurteilen, um so die Wirtschaftlichkeit der Geothermieanlage zu erhöhen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 105 f. |
| Thermische Leitfähigkeit | Siehe Wärmeleitfähigkeit. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 106 |
| Tiefbohrverordnung | <p>Bergrechtliche (landesrechtliche) Regelung zur Niederbringung von tiefen Bohrungen.</p> <p>Tiefbohrverordnungen (abgekürzt BVT oder BVOT) – im Langtitel jeweils als „Bergverordnung für Tiefbohrungen, Tiefspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen“ bezeichnet – sind bergrechtliche Verordnungen der deutschen Bundesländer.</p> <p>Als wichtigstes Bundesgesetz der in Art. 74 Abs. 1 Nr. 11 GG normierten konkurrierenden Gesetzgebungszuständigkeit im Bereich des Bergbaus ermächtigt das Bundesberggesetz (BBergG) u.a. in § 68 Abs. 1 die Landesregierungen zum Erlass von Rechtsverordnungen. So haben mehrere Länder Tiefbohrverordnungen erlassen.</p> | <p>VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 106</p> <p>Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 17.03.2011</p> |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-------------------------------|--|--|
| Tiefbohrverträge | Regeln innerhalb des Projekts die Leistungen mit den höchsten Kosten und den größten Risiken. Die Vertragsgestaltungen erfolgen selbst für vergleichbare Bedingungen sehr verschieden hinsichtlich der Rechte und Pflichten des Auftraggebers und des Tiefbohrunternehmens sowie der Verteilung von Risiken und Haftungen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 106 |
| Tiefe Erdwärmesonde | In dieser Sonde zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf langsam ein Wärmeträgermedium. Das geothermal erwärmte Fluid steigt an die Erdoberfläche, wo die Energie gewonnen werden kann. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 106 |
| TVD (True Vertical Depth) | Vertikale Tiefe einer Bohrung, gemessen in Metern. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 106 |
| Ungleichgewicht, radioaktives | Durch An- oder Abreicherungsprozesse können einzelne Nuklide aus der Zerfallsreihe erhöhte oder erniedrigte Aktivitäten aufweisen. Chemische und physikalische Eigenschaften sind für derartige Prozesse entscheidend. Typische Ungleichgewichte entstehen durch Unterschiede der Löslichkeiten (Radium ist unter reduzierenden Bedingungen löslich und daher in Lösungen enthalten, die Mutternuklid der Zerfallsreihen (Uran oder Thorium) jedoch immobil und daher nicht enthalten. Weitere Ungleichgewichte können z.B. durch Phasenunterschiede hervorgerufen werden: Radon kann als Edelgas den Ort seiner Entstehung verlassen und befindet sich daher in der Luft im vollkommenen Ungleichgewicht zu seinem Mutternuklid Radium. | |
| Verdachtsflächen | Verdachtsflächen im Sinne des BBodSchG sind Grundstücke, bei denen der Verdacht schädlicher Bodenveränderungen besteht. | BBodSchG, § 2 Abs. 4 |
| Verursacherprinzip | Das Verursacherprinzip als eines der drei grundlegenden Umweltprinzipien (neben dem Vorsorgeprinzip und dem Kooperationsprinzip) ist insbesondere als Grundsatz der Kostenzurechnung zu verstehen. Kosten zur Vermeidung, zur Beseitigung und zum Ausgleich von Umweltbeeinträchtigungen sollen demjenigen zugerechnet werden, der sie verursacht hat. | Storm, Umweltrecht, 2. Auflage 2010, Seite 21. |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|-----------------------------|---|--|
| Vorsorgeprinzip | Das Vorsorgeprinzip als eines der drei grundlegenden Umweltprinzipien (neben dem Verursacherprinzip und dem Kooperationsprinzip) ist das materielle Leitbild der Umweltpflege. Durch den frühzeitigen Einsatz entsprechender Maßnahmen soll über die präventive und repressive Abwehr von Gefahren und die Beseitigung von Schäden hinaus dem Entstehen potentieller Beeinträchtigungen der Umwelt möglichst an dessen Ursprung vor allem durch eine Minimierung von Risiken vorgebeugt (Risikovorsorge) und ein nachhaltiger, die Umwelt schonender Umweltnutzen (Umweltschonung) erreicht werden. | Storm, Umweltrecht, 2. Auflage 2010, Seite 15. |
| Wärmeleitfähigkeit | Die Wärmeleitfähigkeit ist eine materialspezifische und temperaturabhängige Materialeigenschaft, die angibt, wie groß in einem gegebenen Temperaturfeld der Wärmestrom durch eine Fläche in Richtung der Flächennormalen ist (nach DIN 1341). | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 107 |
| Wärmetauscher | Auch Wärmetauscher oder Wärmeüberträger - Vorrichtung zum Übertragen von Wärmeenergie des Thermalwassers auf Fernwärmenetze und Kraftwerke in Geothermieanlagen. Prinzipiell können Rohrbündel- oder Plattenwärmetauseher verwendet werden. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 106 |
| Wärmeträgermedium | Flüssigkeit oder Gas, das für die Wärmeaufnahme/-abgabe/-speicherung und den Wärmetransport geeignet ist. Siehe auch: Arbeitsmedium. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 107 |
| Wasserbeschaffenheit | Die physikalische, chemische oder biologische Beschaffenheit des Wassers eines oberirdischen Gewässers oder Küstengewässers sowie des Grundwassers. | WHG, § 3 Abs. 9 |
| Wasserhaushaltsgesetz (WHG) | Vollständiger Gesetzestitel: „Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts“. Das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bildet den Hauptteil des deutschen Wasserrechts. Es ist in der Fassung vom 31. Juli 2009 ein Gesetz in der konkurrierenden Gesetzgebungskompetenz des Bundes. Das WHG enthält Bestimmungen über den Schutz und die Nutzung von Oberflächengewässern und des Grundwassers, außerdem Vorschriften über den Ausbau von Gewässern und die wasserwirtschaftliche Planung sowie den Hochwasserschutz. Ursprünglich war das WHG ein Rahmengesetz des Bundes, das von den Wassergesetzen der Länder ausgefüllt wurde. Infolge der Föderalismusreform regelt der Bund das Wasserhaushaltsrecht abschließend. Die Länder dürfen – außer bei stoff- oder anlagenbezogenen Vorschriften – von den Regelungen des Bundes abweichen (Art. 72 Abs. 3 GG). Außerdem | Wikipedia (http://de.wikipedia.org), Stand: 17.03.2011 |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|--|---|--|
| | enthält das WHG Öffnungsklauseln für Regelungen der Länder. | |
| Wasserkörper | Einheitliche und bedeutende Abschnitte eines oberirdischen Gewässers oder Küstengewässers (Oberflächenwasserkörper) sowie abgegrenzte Grundwasservolumen innerhalb eines oder mehrerer Grundwasserleiter (Grundwasserkörper). | WHG, § 3 Abs. 6 |
| wasserrechtliche Benutzungs- und Anlagenregelungen | Zentrale Regelungen des Wasserrechts sind die über der Gewässerbenutzung der §§ 8 ff. WHG. Danach werden fast sämtliche Benutzungen der Gewässer durch Bürger, Unternehmen oder auch die öffentliche Hand Erlaubnis- oder Bewilligungsverfahren unterworfen. Daneben gibt es noch spezielle Vorschriften in den §§ 62 und 63 WHG über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. | Peters, Umweltrecht, 4. Auflage 2010, Rn. 576 |
| Wiedernutzbarmachung | Ordnungsgemäße Gestaltung der vom Bergbau in Anspruch genommenen Oberfläche unter Beachtung des öffentlichen Interesses. | BergG, § 4 Abs. 4 |
| Wirkungsgrad | Der Wirkungsgrad der Anlagen wird wie bei jedem Carnot-Prozess durch die Spreizung der beiden Temperaturniveaus im Arbeitskreislauf bestimmt. Ansatzpunkte für Wirkungsgradsteigerungen bieten sich zum Beispiel durch mehrstufige Anlagen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 107 |
| Wirkungsgrad | Der Wirkungsgrad ist allgemein das Verhältnis von abgegebener Leistung (P_{ab} = Nutzleistung) zu zugeführter Leistung (P_{zu}). | http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad |
| Zerfallsreihe, natürliche | Zerfallsreihen primordialer Nuklide, bei denen sich aus einer vorhandenen Menge eines instabilen Nuklids durch Zerfall ein Gemisch von Nuklide bildet, die ihm in der Zerfallsreihe folgen, bevor irgendwann alle Kerne die Reihe bis zum stabilen Endnuklid durchlaufen haben. In dem Gemisch sind Nuklide mit kurzer Halbwertszeit nur in geringer Menge vorhanden, während solche mit längerer Halbwertszeit sich entsprechend stärker ansammeln. Es gibt drei vollständig vorhandene natürliche Zerfallsreihen: Uran-Radium-Reihe: Ausgangsnuklid Uran-238, Endnuklid Blei-206; (4n+2-Reihe) Uran-Actinium-Reihe: Ausgangsnuklid Uran-235, bei der Verlängerung zu den künstlichen Transuranen ist Plutonium-239 die erste Vorgängerstufe von Uran-235, Endnuklid Blei-207; (4n+3-Reihe) Thorium-Reihe: Ausgangsnuklid Thorium-232, jedoch sind noch seine Vorgängernuklide bis | Wikipedia |

| Begriff | Erläuterung | Fundstelle |
|--------------|---|--|
| | <p>zum Plutonium-244 auf der Erde vorhanden[2], sodass die Reihe streng genommen schon dort beginnt. Endnuklid Blei-208; (4n-Reihe)</p> <p>Die 4. Zerfallsreihe kommt bis auf den letzten Schritt in der Natur nicht vor, da das langlebige, namensgebende und am Anfang stehende Neptunium-237 dieser Reihe praktisch vollständig zerfallen ist, und die meisten Zwischenprodukte kurze Halbwertszeiten haben. Nur das letzte Radionuklid dieser Reihe Bismut-209 ist wegen seiner extrem langen Halbwertszeit noch vorhanden und wurde deshalb sogar lange für das Endnuklid der Reihe gehalten, bis 2003 entdeckt wurde, dass es ein Alphastrahler mit 19 Trillionen Jahren Halbwertszeit ist.</p> <p>Neptunium-Reihe: Ausgangsnuklid ist nach dem Namen Neptunium-237. Oft wird jedoch Plutonium-241 als ihr Ausgangsnuklid betrachtet, Endnuklid Thallium-205; (4n+1-Reihe).</p> | |
| Zielhorizont | Eine definierte Tiefe oder geologische Schicht, bis zu der die Bohrung vordringen soll, um Tiefe Geothermie zu erschließen. | VBI-Leitfaden „Tiefe Geothermie“, Band 21 der VBI-Schriftenreihe, 1. Auflage Februar 2010, Seite 107 |

13 **Abbildungsverzeichnis**

| | | |
|-----------|--|----|
| Abb. 2.1 | Beispiele für unterschiedliche Nutzungen der geothermischen Energie /STO 11/ | 9 |
| Abb. 2.2 | Geothermische Regionen in Deutschland (nach /GEO 14/) | 11 |
| Abb. 2.3 | Tiefe Geothermie-Projekte in Deutschland (Quelle GtV Bundesverband Geothermie e.V., Stand November 2013) | 12 |
| Abb. 2.4 | Durchschnittliche Investitionskostenverteilung eines Geothermie-Projektes /IEU 07/ | 15 |
| Abb. 2.5 | Einzelne Kostenpunkte einer Tiefbohrung /LEG 03b/ | 16 |
| Abb. 3.1 | Verschiedene Bohrmeißel (rechts unten im Bild ist eine diamantbesetzte Bohrkronen dargestellt, die es erlaubt, Bohrkerne aus dem Gestein zu erbohren) /GUB 14/ | 24 |
| Abb. 3.2 | Schematische Darstellung des Rotary Bohrverfahrens /GDZ 14/ | 25 |
| Abb. 3.3 | Luftaufnahme (oben) und schematische Darstellung des Bohrplatzes der Geothermie-Bohrung in St. Gallen (verändert nach /GAL 12/) | 26 |
| Abb. 3.4 | Bohrplatz des Genesys-Projektes in Hannover /REC 11/ | 28 |
| Abb. 3.5 | Einteilung des Bohrplatzes in Wassergefährdungsbereiche /WEG 06a/ | 30 |
| Abb. 3.6 | Schematische Darstellung der verschiedenen Bohrspülungssysteme /ASM 04/ | 35 |
| Abb. 3.7 | Anforderungen an die Zusammensetzung Wasserbasierte Bohrspülungen in Abhängigkeit der Tiefe (verändert nach /OGP 09/) | 36 |
| Abb. 3.8 | Prozesse, die die Zusammensetzung der Bohrspülung beeinflussen (verändert nach /BLO 94/) | 37 |
| Abb. 3.9 | Schematische Darstellung eines geothermalen Wärmetauschers /BAS 04/ | 45 |
| Abb. 3.10 | System der zweckbezogenen Zuordnung der Stimulationsverfahren /WOL 12/ | 46 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb. 3.11 | Vereinfachte Darstellung des Kluft-Öffnungsprozesses - Um die Kluftweite nach Stimulationsende beizubehalten, kann dem Stimulationsfluid z. B. Sand zugemischt werden, der sich zwischen den Trennflächen ablagert /AND 12/..... | 50 |
| Abb. 3.12 | Verschiedene konzeptuelle Modelle von Forschungsvorhaben zur hydraulischen Verbindung einer Injektions- und Förderbohrung durch das natürliche vorhandene Kluftsystem /TEN 03/ - Von links nach rechts: Los Alamos (USA), Camborne (Großbritannien), Soultz-sous-Forêts (Frankreich) | 51 |
| Abb. 3.13 | Hydraulische Stimulationsmaßnahmen im Forschungsprojekt Groß Schönebeck /HUE 11/ | 60 |
| Abb. 3.14 | Anzahl von hydraulischen Stimulationen seit 1961 in Deutschland /EXX 10/ - auf der y-Achse ist die Anzahl der Fracking Maßnahmen angegeben..... | 62 |
| Abb. 3.15 | In unkonventionellen Lagerstätten eingesetzte bzw. einsetzbare Frackfluide und deren Einsatzmengen und Tiefenbereiche /MEI 12b/..... | 63 |
| Abb. 3.16 | Schematische Darstellung des Flowbacks (verändert nach /MEI 12a/)..... | 67 |
| Abb. 3.17 | Ablaufdiagramm und Fallunterscheidung zur Behandlung des Flowbacks (geändert nach /ROS 12/) | 68 |
| Abb. 3.18 | Bohrlochausbau der Geothermie-Bohrung für das Genesys-Projekt /BGR 13/..... | 71 |
| Abb. 3.19 | Zementierung mit dem Kontraktorverfahren /API 09/ | 76 |
| Abb. 4.1 | Modell eines geothermischen Reservoirs | 95 |
| Abb. 4.2 | Druckabhängigkeit der Löslichkeit von Kalzit bei verschiedenen Temperaturen in einer 1-Molal. NaCl-Lösung mit 0,01 m CO ₂ /DUA 08/ | 98 |
| Abb. 4.3 | Geothermische Regionen in Deutschland (nach /GEO 14/) | 104 |
| Abb. 4.4 | Geologische Struktur des Norddeutschen Beckens /SIP 06/..... | 105 |
| Abb. 4.5 | Wärmefluss im Norddeutschen Becken /HUR 02/..... | 107 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb. 4.6 | Temperaturgradienten an drei Geothermie-Standorten im Norddeutschen Becken /GEO 14/..... | 108 |
| Abb. 4.7 | Oberrhein graben – Geologisches Profil /ILL 14/ | 115 |
| Abb. 4.8 | Geologischer Schnitt der 150°C-Isotherme im Oberrhein graben /WAT 13/ | 116 |
| Abb. 4.9 | Temperaturen in 3 000 m Tiefe unter der Geländeoberfläche im Bereich des Oberrhein grabens /WAT 13/ | 118 |
| Abb. 4.10 | Wärme fluss im Oberrhein graben in mW/m ² – Daten aus: /HUR 02/, Bild erstellt mit gpsvisualizer.com, Karte erstellt mit google.maps..... | 119 |
| Abb. 4.11 | Temperaturgradienten an drei verschiedenen Standorten im Oberrhein graben /GEO 14/..... | 119 |
| Abb. 4.12 | Geologischer Nord-Süd-Schnitt im Bereich des Süddeutschen Molassebeckens /ZEI 10/..... | 125 |
| Abb. 4.13 | Hydraulische Durchlässigkeiten der Malm-Formation in verschiedenen Bereichen des Süddeutschen Molassenbeckens /ZEI 10/..... | 126 |
| Abb. 4.14 | Vertikalschnitt (WSW-ENE) durch das Süddeutsche Molassebecken. Die Isolinien gleicher Temperatur sind schwarz dargestellt. Die Grenze zum Hangenden der Malm-Formation ist mit einer hellblauen Linie markiert /GEO 14/..... | 127 |
| Abb. 4.15 | Wärme fluss im Molassebecken, in mW/m ² . Daten entnommen aus /HUR 02/, Bild erstellt mit gpsvisualizer.com, Karte erstellt mit google.maps..... | 128 |
| Abb. 5.1 | Prinzipschaltbild des Thermalwasserkreislaufs /BAU 11/..... | 140 |
| Abb. 5.2 | Prinzipschaltbild eines ORC-Kreislauf /MÜN 05/ -..... | 143 |
| Abb. 5.3 | Prinzipschaltbild eines Kalina-Kreislaufs /MÜN 05/ | 145 |
| Abb. 5.4 | Geothermie Anlagen drei verschiedener Standorte..... | 147 |
| Abb. 5.5 | Natürliche Zerfallsreihen U-238 und Th-232 | 165 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. 5.6 | Karte der Epizentren der in den Jahren 800 bis 2010 aufgetretenen Schadenbeben in der Bundesrepublik Deutschland und angrenzenden Gebieten. Dargestellt ist die Intensität im Epizentrum, abgekürzt mit I_0 /BGR 13/..... | 174 |
| Abb. 5.7 | Übersicht über das Geothermie-Projekt St. Gallen; Quelle: http://ksbg.educanet2.ch/algeografie11/images/000000290170.jpg | 175 |
| Abb. 5.8 | Prinzipskizze hydrothormaler (links) und petrothormaler Energiegewinnung im Rahmen von Geothermie-Projekten (aus /FOR 13/)..... | 177 |
| Abb. 5.9 | Prinzipskizze zur Wirkung einer Fluidverpressung | 181 |
| Abb. 5.10 | Magnituden-Zeit-Verteilung modellierter Seismizität | 185 |
| Abb. 5.11 | Induzierte seismische Ereignisse im Zusammenhang mit unterschiedlichen Maßnahmen (farbige Punkte; zum Vergleich tektonische Erdbeben: weiße Punkte) (aus /GRÜ 13/)..... | 187 |
| Abb. 5.12 | Natürliche tektonische Erdbeben in Deutschland und benachbarten Ländern in den Jahren 1000 – 2011 (aus /GRÜ 13/)..... | 187 |
| Abb. 5.13 | M_w und h der stärksten Ereignisse an Geothermie-Standorten (aus /GRÜ 13/) | 189 |
| Abb. 5.14 | Induzierte Seismizität an Standorten von Geothermie-Projekten (aus /GRÜ 13/) | 189 |
| Abb. 5.15 | Standorte in den USA und in Kanada, von denen induzierte Seismizität im Zusammenhang mit Energiegewinnung berichtet wird (aus /COM 13/); geothermische Energiegewinnung = grün..... | 190 |
| Abb. 5.16 | Geologischer West-Ost-Schnitt des Gebietes um Basel (CH)..... | 191 |
| Abb. 5.17 | Karte der acht wichtigsten, natürlichen Verwerfungen im Umfeld des durch ein Fadenkreuz markierten Geothermie-Standortes Basel (aus /BAI 09b/) | 195 |
| Abb. 5.18 | Simulation des Ausbaus des geothermischen Systems mit einem Computermodell | 197 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Abb. 5.19 | Beispiel für die relativen Veränderungen der Spannungen auf der größten Verwerfung aus Abb. 5.17 nach einem 30-jährigen Betrieb der Geothermieanlage | 199 |
| Abb. 5.20 | Modellierung der Wahrscheinlichkeit (probability of exceedance), Erdbebenintensitäten (Intensity) während der zwölf-tägigen Ausbauphase (oben: stimulation period) und innerhalb eines Jahres in der insgesamt dreißig-jährigen Betriebsphase (unten: circulation period) zu überschreiten | 200 |
| Abb. 5.21 | Risikobeurteilung nach der Störfallverordnung..... | 202 |
| Abb. 5.22 | Geologischer Schnitt durch den Oberrheingraben im Bereich Landau-Karlsruhe | 205 |
| Abb. 5.23 | Prinzipskizze einer geothermischen Dublette; Quelle: http://tu-freiberg.de/ze/geothermie/tg_grundlagen.html (12.03.2014)..... | 206 |
| Abb. 5.24 | Schematische Darstellung der Geothermie-Anlage Landau; Quelle: http://www.bine.info/themen/publikation/geothermische-stromerzeugung-in-landau/das-kraftwerk/ 14.03.2014 | 206 |
| Abb. 5.25 | Landau / Insheim - Seismizität von Mai 2009 bis November 2012 (gelb: Lage des Geothermie-Kraftwerkes Landau; grün: Insheim) (aus /GRO 12/)..... | 207 |
| Abb. 5.26 | Schematische geologische Karte des Oberrheingrabens mit Lage des Standortes Soultz-sous-Forêts; Quelle: http://data.geothermie-soultz.fr/doc.pdf/geologie_des_oberrheingrabens.pdf (12.03.2014) | 212 |
| Abb. 5.27 | Prinzipskizze der Geothermie-Anlage Soultz-sous-Forêts | 213 |
| Abb. 5.28 | Schematisches geologisches Querprofil am Geothermiestandort Soultz-sous-Forêts mit Lage der wichtigsten Bohrungen; Quelle: http://www.geothermie-soultz.fr/ (09.04.2013)..... | 214 |
| Abb. 5.29 | Drei Generationen von künstlich erzeugten Rissen ("Fracs") durch hydraulische Stimulation in unterschiedlichen Tiefenlagen am Standort Soultz-sous-Forêts..... | 216 |
| Abb. 5.30 | Nord-Süd-Schnitt durch das Voralpenland mit Lage des Geothermie-Projektes Unterhaching; Quelle: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu- | |

| | | |
|-----------|--|-----|
| | import/files/bilder/allgemein/image/pjpeg/pilot_geothermie_grafik.jpg (14.07.2013) | 218 |
| Abb. 5.31 | Erdbebenzonen und Epizentren seismischer Ereignisse in Sachsen im Zeitraum 1994 – 2008 sowie Vorzugsgebiete für Geothermie-Projekte (aus /LUL 11/) | 221 |
| Abb. 5.32 | Bohrungsverlauf im geologischen Modell des Geothermiestandortes Groß Schönebeck; Quelle: http://www.gfz-potsdam.de/forschung/ ueberblick/geoengineering-zentren/internationales- geothermiezentrum-icgr/projekte/abgeschlossene- projekte/machbarkeit/ | 223 |
| Abb. 5.33 | Grenzen des Ampelsystem in /BOM 06/ | 232 |
| Abb. 5.34 | Stufenplan bei der Überwachung induzierter Seismizität (aus /FRI 12/) | 233 |
| Abb. 5.35 | Ampel-System, basierend auf gemessenen maximalen Bodengeschwindigkeiten (PGV) und Rekurrenz innerhalb von 24 Stunden (aus /GEO 06/) | 235 |
| Abb. 5.36 | Reaktionsschema für mikroseismische Ereignisse (aus /GEO 07/) [in der Originalabbildung schließen sich oben regionale Behörden bzw. Entscheidungsträger an, die hier nicht dargestellt sind] | 235 |
| Abb. 5.37 | Beziehung der Grenzwerte basierend auf Bodengeschwindigkeiten zur Intensitätsskala EMS-98 (aus /GEO 06/) | 236 |
| Abb. 6.1 | Übersicht - System der räumlichen Planung in Deutschland | 291 |
| Abb. 7.1 | Phasen eines Geothermie-Projektes | 518 |
| Abb. 7.2 | Schutzgüter / Umweltgüter | 521 |
| Abb. 7.3 | Schematische Darstellung der Bewertung eines Wirkfaktors | 532 |
| Abb. 7.4 | Grundwasserstockwerke | 534 |
| Abb. 7.5 | Schematische Darstellung potentieller künstlicher und geologischer Fließpfade /MEI 12a/ | 535 |
| Abb. 7.6 | Das Verbundsystem Verrohrung-Zement-Gestein (verändert nach /FIC 08/) | 536 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Abb. 7.7 | Schematische Darstellung einer verrohrten und versiegelten Bohrung | 537 |
| Abb. 7.8 | Darstellung der unterschiedlichen Schadenmechanismen, welche die Bohrungsintegrität beeinflussen (verändert nach /STR 09/) | 538 |
| Abb. 7.9 | Verformung der Verrohrung im Falle einer Scherspannung | 543 |
| Abb. 7.10 | Linke Abbildung: Durch Zementschrumpfen können Risse im Zement entstehen (rote Kreise). Rechte Abbildung: Unzureichend entfernter Filterkuchen (Bereich zwischen den roten Kreisen) /CRE 06/ | 546 |
| Abb. 7.11 | Mechanische Prozesse die zum Versagen der Zementation führen (verändert nach /PET 03/) | 547 |
| Abb. 7.12 | Links: schematisches Spannungsprofil der Modellithologie. Rechts: simulierte räumliche Ausdehnung der Rissflächen - (Sicht von der horizontalen Injektionsbohrung aus) bei einer Injektion von 5.000 m ³ Wasser nach einer Fracking Maßnahme von knapp 14 Stunden. Dünne Ringe: äußere Begrenzung der Rissfläche nach jeweils einer Stunde Injektionsdauer. 1) Injektionsbohrung 2) berechnete Ausdehnung der Rissfläche nach rund drei Stunden Injektionsdauer bei einem bis dahin injizierten Volumen von rund 1.000 m ³ /AND 12/ | 552 |
| Abb. 7.13 | (A) Frequenz der Risslänge für künstlich erzeugte und natürlich entstandene Risse im tiefen Untergrund und (B) Wahrscheinlichkeit der Überschreitung von Risslängen (verändert nach /DAV 12/, /KOP 12/) | 553 |
| Abb. 7.14 | Bohrturm für tiefe Bohrungen der Firma Herrenknecht /VOL 14/ | 557 |
| Abb. 7.15 | Seismische Ereignisse während der einzelnen hydraulischen Stimulationsphasen am EGS-Standort in Soultz-sous-Forêts /MER 12/ | 588 |
| Abb. 7.16 | Seismische Erkundung durch Vibrotrucks | 601 |
| Abb. 8.1: | Vergleich deterministischer und probabilistischer Vorgehensweisen | 616 |
| Abb. 8.2 | Grundprinzip der Expositionsabschätzung | 629 |
| Abb. 8.3 | Häufigkeitsverteilung der Aktivitätskonzentration von Ra-226 und Ra-228 im gefördertem Thermalwasser der Anlage Neustadt-Glewe im Zeitraum 06/2004 – 06/2008 (nach /DEG 09/) | 644 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Abb. 8.4 | Histogramm der Ra-226 Aktivitätskonzentration in Rückständen der Erdöl- / Erdgasindustrie (gepoolte Analysen europäischer Felder) /GRS 10a/..... | 647 |
| Abb. 8.5 | Ablaufschema der probabilistischen Analyse | 650 |
| Abb. 8.6 | Häufigkeitsverteilung der berechneten Jahresdosen unter Berücksichtigung aller Szenarien | 651 |
| Abb. 8.7 | Summenhäufigkeiten der resultierenden Einzeldosen der Szenarien..... | 652 |
| Abb. 8.8: | Ergebnisse der SUSA- Sensitivitätsanalyse der probabilistischen Dosisabschätzung | 652 |
| Abb. 15.2.1 | Sulfates scales formed during cooling of the brine in Soultz (linear scale)..... | 826 |
| Abb. 15.2.2 | Sulfates scales formed during cooling of the brine in Soultz (logarithmic scale)..... | 826 |
| Abb. 15.2.3 | Sulfates scales formed during cooling of the brine in Groß-Schönebeck (linear scale)..... | 831 |
| Abb. 15.2.4 | Result of the mixing calculations for Soultz..... | 834 |
| Abb. 15.2.5 | Result of the mixing calculations for Soultz..... | 836 |

14 Tabellenverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----|
| Tab. 2.1 | Tiefengeothermie-Projekte (offenen Systeme) in Deutschland, Frankreich und der Schweiz | 13 |
| Tab. 2.2 | Erhöhung der Bohrkosten durch die Vergrößerung des Bohrdurchmessers /NÖV 05/ | 17 |
| Tab. 3.1 | Vergleich von konventionellen Erdöl/Erdgas- und Geothermie-Bohrungen /FIC 09/, /SAS 09/..... | 43 |
| Tab. 3.2 | Ausgewählte Stimulationsmaßnahmen in Deutschland bzw. Frankreich und der Schweiz (aus /EVA 11/ und /GTV 11/) | 58 |
| Tab. 3.3 | Vergleich der Stimulation geothermaler Lagerstätten und dem Fracking unkonventioneller Lagerstätten in der E&P-Industrie | 66 |
| Tab. 4.1 | Zuordnung von rheologischen Modellen zu Gesteinsbeispielen mit unterschiedlichem Verformungsverhalten | 90 |
| Tab. 4.2 | Wechselwirkungen in geothermischen Reservoiren: X-Prozesse beeinflussen Y-Prozesse /FOK 11/ | 94 |
| Tab. 4.3 | Vergleich von vier Rechenprogrammen für Reaktiven Stofftransport | 101 |
| Tab. 4.4 | Beispiele für Geothermieranlagen im Norddeutschen Becken mit ihren Reservoircharakteristika | 106 |
| Tab. 4.5 | Thermische Parameter unterschiedlicher Gesteinsarten an den Standorten von norddeutschen Geothermieranlagen | 109 |
| Tab. 4.6 | Allgemeine Zusammensetzung von Wässern aus dem Norddeutschen Becken /WOL 08/..... | 110 |
| Tab. 4.7 | Beispiele von Lösungszusammensetzungen aus Neustadt-Glewe /SCH 07/ und Groß-Schönebeck /REG 13/ (n. a. = nicht angegeben)..... | 111 |
| Tab. 4.8 | Allgemeine Zusammensetzung der Gase in Wässern des Norddeutschen Beckens in unterschiedlichen Tiefen /WOL 08/ | 112 |
| Tab. 4.9 | Gaszusammensetzungen aus den Tiefenwässern von Neustadt-Glewe /SCH 07/ und Groß-Schönebeck /REG 13/ | 112 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| Tab. 4.10 | Scale aus Anlagen im Norddeutschen Becken (Daten für Groß-Schönebeck aus /REG 13/ und /FEL 13/, für Neustadt-Glewe aus /WOL 11/ und für Groß-Buchholz aus /WOR 13/) | 114 |
| Tab. 4.11 | Hydraulische Eigenschaften von Reservoirgesteinen an den Standorten einiger Geothermieranlagen im Oberrheingraben | 117 |
| Tab. 4.12 | Geothermische Parameter für verschiedene Gesteinstypen im Oberrheingraben (Daten aus /BÄC 03/ und aus der Webseite der /ENG 14/) | 120 |
| Tab. 4.13 | Allgemeine Zusammensetzung von Wässern im Oberrheingraben aus einer Teufe von 2000 m und 3000 m (nach /WOL 08/) | 121 |
| Tab.4.14 | Chemische Zusammensetzung der Wässer an den Standorten von Geothermiekraftwerken im Oberrheingraben (n. a. = nicht angegeben)..... | 122 |
| Tab.4.15 | Mittlere Zusammensetzung von gelösten Gasen in Wässern des Oberrheingrabens aus einer Teufe von 2.000 m und 2.500 m nach /WOL 08/ | 123 |
| Tab.4.16 | Beispiel für die Zusammensetzung von gelösten Gasen in Wässern des Oberrheingrabens am Standort der Geothermiekraftwerke | 123 |
| Tab.4.17 | Beispiele für die Zusammensetzung von Scale, die an den Standorten der Geothermiekraftwerke im Oberrheingraben ermittelt wurden | 124 |
| Tab.4.18 | Zusammensetzung von Wässern in der Malm-Formation /WOL 08/ | 129 |
| Tab.4.19 | Allgemeine Zusammensetzung von – im Formationswasser – gelösten Gaskomponenten in der Malm-Formation im Molassebecken nach /WOL 08/ | 130 |
| Tab.4.20 | Beispiele für die Zusammensetzung von „scale“, wie sie für verschiedene Geothermiekraftwerke im Molassebecken ermittelt wurden /WOL 11/ – C/A = Calcite/Aragonite | 131 |
| Tab. 5.1 | Die stärksten Erdbebenmagnituden, die in petrothermalen Projekten bis heute beobachtet wurden (Angaben aus /BAI 09a/, /BAI 09b/). | 176 |
| Tab. 6.1 | Übersicht über zivilrechtliche und öffentlich-rechtliche Haftungstatbestände..... | 481 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab. 6.2 | Zielwerte Erneuerbare Energien (Stand: Oktober 2013) | 484 |
| Tab. 6.3 | Übersicht zur Bohrkostenförderung..... | 485 |
| Tab. 7.1 | Wirkmatrix für die Vorerkundung..... | 525 |
| Tab. 7.2 | Wirkmatrix für die Bohrphase..... | 526 |
| Tab. 7.3 | Wirkmatrix für die Stimulations- und Zirkulationsphase sowie für die Errichtung der Geothermieanlage | 527 |
| Tab. 7.4 | Wirkmatrix für die Betriebsphase | 529 |
| Tab. 7.5 | Wirkmatrix für die Rückbauphase | 530 |
| Tab. 7.6 | Abfallstatistik für die Geothermie-Bohrung in Kirchstockach | 562 |
| Tab. 7.7 | Vergleich zu erwartender Lärmwirkungen im Bohrbetrieb /FRK 07/ | 574 |
| Tab. 8.1 | Anwendungsfelder der PSA zur Bewertung der Sicherheit kerntechnischer Anlagen | 617 |
| Tab. 8.2 | Probabilistische Methoden der Kerntechnik | 619 |
| Tab. 8.3 | Betrachtete Szenarien mit Frequenz und Ereignisdauer | 632 |
| Tab. 8.4: | Relevanz der Expositionspfade in einzelnen Szenarien..... | 633 |
| Tab. 8.5 | Annahmen für Eingangsparmeter der Expositionsabschätzung | 634 |
| Tab. 8.6 | Nuklidspezifische Ingestionsdosiskoeffizienten..... | 639 |
| Tab. 8.7 | Nuklidspezifische Inhalationsdosiskoeffizienten..... | 639 |
| Tab. 8.8 | Charakteristische Verhältnisse der PAE (nach /SSK 02/)..... | 640 |
| Tab. 8.9 | Dosiskonversionsfaktoren Radon | 642 |
| Tab. 8.10 | Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide im Tiefenfluid (Zusammengestellt aus /DEG 09/, /DEG 10/, /DEG 11/)..... | 645 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tab. 8.11 | Aktivitätskonzentration [Bq/l] natürlicher Radionuklide im Thermalwasser einzelner Standorte | 645 |
| Tab. 8.12 | Nuklidvektoren verschiedenster Bausteile..... | 648 |
| Tab. 8.13 | Maximalkonztrationen in Rückständen aus publizierter Literatur..... | 648 |
| Tab. 15.1.1 | Stoffgruppen nach ihren Einsatzgebieten | 806 |
| Tab. 15.1.2 | Polymere in Bohrspülungen /BUJ 11/ | 813 |
| Tab. 15.1.3 | Auswahl verschiedener Säuren und ihre potentiellen Anwendungsgebiete /WOL 12 | 821 |
| Tab. 15.2.1 | Activities in the Soultz Brine /DEG 11/ | 825 |
| Tab. 15.2.2 | Composition of the brine used for the Soultz cooling calculation..... | 825 |
| Tab. 15.2.3 | Measured activities of the scales in Soultz /GEN 10/ | 829 |
| Tab. 15.2.4 | Activities in the Soultz Brine /DEG 11/ | 830 |
| Tab. 15.2.5 | Composition of the brine used for the Groß-Schönebeck cooling calculation..... | 830 |
| Tab. 15.2.6 | Brine compositon for the mixing calculation for Soultz | 833 |
| Tab. 15.2.7 | Brine compositon for the mixing calculation for Groß Schönebeck..... | 835 |

15 Anhänge

15.1 Stoffbeschreibung Erschließungsphase

15.1.1 Einführung

Eine Vorhersage über Art und Menge der eingesetzten Stoffe in der Erschließungsphase ist schwierig, da die Zusammensetzung der Prozessfluide abhängig ist von den lokalen hydrogeologischen und chemischen Bedingungen der durchteuften bzw. stimulierten Gesteinsschichten. Diese können für jedes Bohrvorhaben sehr unterschiedlich sein. Deshalb sind Aussagen über die Toxizität von Prozessfluiden nicht einheitlich durchzuführen. Dies liegt insbesondere an den vielen unterschiedlichen Additiven, von z. B. fertigen Bohrspülungsprodukten, da die Inhaltsstoffe häufig als Betriebsgeheimnis gelten. Zudem ist es schwierig aufgrund der ständigen Weiterentwicklung der Produkte die Gemische zu bewerten /EWE 12/.

In der Tab. 15.1.1 sind die Stoffgruppen anhand der Literatur für verschiedene Einsatzzwecke aufgeführt. Danach erfolgt eine allgemeine Beschreibung. Weiterführende Informationen sowie eine detaillierte Auflistung von möglichen Stoffen in Bohrspülungen und Stimulationsfluiden bietet die zitierte Literatur. Die ausführlichen Zitate finden sich im entsprechenden Kapitel des Schlussberichtes.

Tab. 15.1.1 Stoffgruppen nach ihren Einsatzgebieten

| Einsatzgebiet | Beschreibung | Literatur |
|----------------------------------|---|--|
| Viskositätskontrolle, Gelbildner | Durch das Quellen dieser Stoffe wird die Viskosität erhöht. Zudem bilden sie einen Filterkuchen | /CAE 11/ /LAS 10/ /SCB 09/ /SKA 11/ |
| pH-Wert Regulierung | Erhöhung bzw. Verringerung des pH-Wertes | /MEI 12b/ /POR 07/ /REI 96/ |
| Beschwerungsmittel | Stoffe die das spezifische Gewicht der Spülung erhöhen | /ASM 04/ /CAE 11/ /FRK 07/ |
| Lost Zirkulation Materials | Materialien die den Spülungsverlust verhindern | /FRK 07/ /REI 96/ |
| Korrosionsinhibitoren | Dienen bei Zugabe von Säuren dem Schutz der Anlagenteile vor Korrosion | /REI 96/ /SCR 09/ /HUE 04b/ |
| Scale-Inhibitoren | Verhinderung von Ablagerungen schwerlöslicher Minerale in der Lagerstätte und in Anlagenbauteilen | /HUE 04b/ /MEI 12b/ |
| Gelstabilisierer | Erhöhung der Viskosität von Polymeremulsionen durch Quervernetzung von Polymerketten | /FIN 12/ /MEI 12b/ |
| Verflüssiger | Lässt Ton aus der Suspension ausflocken und gibt dadurch Wasser frei | /ASM 04/ /SCB 09/ |
| Gelbrecher | Verringerung der Viskosität des Stimulationsfluides durch aufbrechen der Quervernetzung der Polymerketten | /MEI 12b/ |
| Toninhibitoren | Verhindern das Quellen von Tonen | /MEI 12b/ /REI 96/ |
| Aufsalzung | Verhindert die Lösung von Salzen aus Gesteinen und erhöht das spezifische Gewicht | /REI 96/ |
| Stützmittel | Offenhalten von Klüften und Spalten nach der Stimulation | /FRK 07/ /MEI 12b/ |
| Reibungsverminderer | Vermindert die Reibungsverluste zwischen dem Bohrgestänge und dem Bohrfluid bzw. der Bohrlochwand | /ASM 04/ /MEI 12b/ /REI 96/ |
| Reaktionsverzögerer | Sie verzögern die Reaktion von Säuren mit dem Speichergestein, damit die Säuren weiter in die Lagerstätte eindringen können | /POR 07/ /REI 96/ |
| Biozide | Verhinderung von bakterieller Zersetzung der Polymere und der Schwefelwasserstoffbildung durch die Sulfatreduktion | /HUE 04b/ /MEI 12b/ |
| Säuren | Reinigung der perforierten Abschnitte der Bohrung von Zement und Bohrschlamm, bzw. Säurestimulation der Lagerstätte | /POR 07/ /WOL 12/ |

15.1.2 Stoffbeschreibung für die Erschließungsphase

15.1.2.1 Gefährdungseinschätzung

Im Falle des Austretens eines Schadstoffes in die Umwelt, wird für eine Gefährdungsabschätzung die ausgetretene Stoffmenge und daraus resultierend die Stoffkonzentration im Medium (z. B. im Grundwasser, Luft) und die toxischen Eigenschaften benötigt. Die resultierenden Stoffkonzentrationen im Grundwasser hängen von lokalen geologischen, geochemischen und hydrogeologischen Randbedingungen ab.

Für die Gefährdungseinschätzung eines Stoffes oder Stoffgemisches, kann zum einen die Belastung von Grund- und Oberflächenwasser und damit die ökologischen Gefährdungen bzw. die indirekten Einwirkungen auf Mensch, Tier und Vegetation abgeschätzt werden (z. B. durch Verzehr von kontaminierten Wasser) und zum anderen Schäden die direkt an Gesundheit und Leben durch Brände, Explosionen und Betriebs- und Transportunfälle entstehen /EWE 12/.

Folgende gesetzliche Vorgaben können für Risikoeinschätzungen von Stoffen verwendet werden:

- Gefahrstoffkennzeichnung: Verordnung Nr. 1272/2008 des Europäischen Parlamentes und des Rates über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen vom 16.12.2006 (CLP-Verordnung). Anhang I, Teil 3 und 4.
- Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV) Vom 26. November 2010 (BGBl. I S 1643), geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S 1622).

Gefährlich im Sinne dieser Verordnungen sind Stoffe und Gemische, die eine oder mehrere der folgenden Eigenschaften aufweisen:

- explosionsgefährlich
- brandfördernd
- hochentzündlich, leichtentzündlich oder entzündlich
- sehr giftig, giftig oder gesundheitsschädlich

- ätzend, reizend oder sensibilisierend
- krebserzeugend (kanzerogen)
- fortpflanzungsgefährdend (reproduktionstoxisch)
- fruchtschädigend
- erbgutverändernd (mutagen)
- umweltgefährlich.

Stoffe oder Stoffgemische sind umweltgefährlich, wenn sie selbst oder ihre Umwandlungsprodukte geeignet sind, die Beschaffenheit des Naturhaushalts, von Wasser, Boden oder Luft, Klima, Tieren, Pflanzen oder Mikroorganismen derart zu verändern, dass dadurch sofort oder später Gefahren für die Umwelt herbeigeführt werden können (Definition der Gefahrstoffverordnung).

Informationen über toxikologische Eigenschaften von Stoffen oder Stoffgemischen, erhält man in folgenden Datenbanken:

- ESIS-Datenbank für Gefahrstoffkennzeichnung:
<http://esis.jrc.ec.europa.eu/clp/ghs/search.php>
- UBA, Stoff-Datenbank:
<http://webrigoletto.uba.de/rigoletto/public/searchRequest.do?event=request>
- US-EPA, ECOTOX-Datenbank: <http://cfpub.epa.gov/ecotox/>
- ECHA, ESIS-Datenbank: <http://esis.jrc.ec.europa.eu/>
- US-EPA, ECOSAR-Datenbank:
<http://www.epa.gov/oppt/newchems/tools/21ecosar.htm>

Zudem bieten die Sicherheitsdatenblätter der einzelnen Stoffe einen schnellen Überblick über mögliche Risiken die von den Stoffen ausgehen. Beurteilungskriterien für die Gefährdungsabschätzung von Stoffkonzentrationen, sind z. B.:

- Einstufung in eine Wassergefährdungsklasse
- Stoffgrenzwerte aus der Trinkwasser-Verordnung
- Toxikologische Einstufung in LC50, LD50, EC50, TD_{Lo}, IGC, IDLH

- Geringfügigkeitsschwellwerte für das Grundwasser von der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA)
- WHO-Trinkwasser-Leitwerte: humantoxikologisch begründete Beurteilungswerte für gesundheitsschädliche Stoffe im Trinkwasser.
- Einstufung in cmr-Stoffe: krebserzeugende, mutagene oder reproduktionstoxische Stoffe
- Der gesundheitliche Orientierungswert (GOW): gesundheitsbezogener Vorsorgewert für humantoxikologisch nur teil- oder nicht bewertbare trinkwassergängige Stoffe

Die Einstufung in Wassergefährdungsklassen dient sowohl dem vorsorglichen Schutz von Grund- und Oberflächenwasser als auch dem Schutz der menschlichen Gesundheit. Auch der Schutz des Bodens vor schädlichen Verunreinigungen durch den Umgang mit Stoffen und Gemischen in technischen Anlagen soll damit sichergestellt werden. Maßgeblich für die Einstufung eines Stoffes in eine Wassergefährdungsklasse sind folgende Kriterien /EWE 12/:

- Toxizität gegenüber Menschen und Säugetieren,
- Toxizität gegenüber Wasserorganismen,
- Beständigkeit/Abbauverhalten,
- Verteilungsverhalten (z. B. Anreicherung in Organismen, Mobilität in Boden und Grundwasser, Anreicherung im Sediment).

Die Gefährlichkeit (Toxizität) eines Schadstoffes, ist abhängig von der aufgenommenen Menge, der zeitlichen Exposition, wie schnell bzw. ob überhaupt ein Schadstoff im Organismus abgebaut werden kann (Abbaubarkeit vs. Persistenz) oder ob sich dieser Schadstoff im Organismus anreichern kann (Akkumulationsfähigkeit). Zudem können für eine Gefährdungsabschätzung auch die Langzeitfolgen eines Stoffes herangezogen werden, z. B. ob der Schadstoff krebserregend oder erbgutverändernd wirkt. Des Weiteren ist entscheidend, in welcher Mischung er mit anderen Stoffen eingesetzt wird. Unter konservativen Annahmen geht man von einer additiven Wirkung der Chemikalien im Gemisch aus. Aus diesen Faktoren kann eine Risikocharakterisierung des Stoffes oder eines Stoffgemisches erfolgen /SCJ 12/.

Laut Expertenstellungnahme im Abschlussbericht des Mediationsverfahrens „Tiefe Geothermie Vorderpfalz“ sind einige geogene Inhaltsstoffe des Thermalwassers „... *ein wesentlich größeres Problem als die Zusatzstoffe*“. Zudem ist die Zusammensetzung des jeweiligen Thermalwassers im Vorfeld nur schwer abschätzbar /HÜS 13/. Die eingesetzten Stoffe in der Betriebsphase einer Anlage können im Vorfeld bis auf den Scaleinhibitor genau festgelegt werden.

Im Folgenden erfolgt eine Beschreibung einzelner Stoffe anhand der Literatur und von Sicherheitsdatenblättern, die bei der Erschließung geothermaler Lagerstätten eingesetzt werden können. Eine einheitliche Bewertung kann aus Mangel an Daten (vor allem Menge und Konzentration) nicht durchgeführt werden.

15.1.3 Beschreibung der Stoffgruppen

15.1.3.1 Viskositätskontrolle, Gelbildner

Tone

Durch die Zugabe von Tonmineralen wie z. B. Bentonit, Sepiolith oder Attapulgit, werden die Viskosität und damit die Tragfähigkeit der Bohrspülung für einen besseren Bohrkleintransport verbessert. Der am häufigsten eingesetzte Ton bei Bohrspülungen ist der Bentonit. Bentonit ist ein Tongestein, das aus einer Mischung von verschiedenen Tonmineralien besteht. Das Hauptmineral ist Montmorillonit. Besonders der Natrium-Montmorillonit dominierte Bentonit hat ein sehr starkes Wasseraufnahme- und Quellvermögen (Volumenzunahme). Diese Tonminerale haben polare Eigenschaften, das heißt ihre Oberflächen weisen unterschiedliche Ladungen auf. Dadurch erhält die Bohrspülung thixotrope Eigenschaften. In Ruhe richten sich die polaren Tonminerale aus und verkitten sich, dadurch bildet sich ein Gel. Somit wird das Absinken von Bohrklein während Bohrbetriebspausen (z. B. Gestänge-Wechsel) verhindert. Wird das Gel in Bewegung gesetzt, wird dieser lockere Verband wieder aufgelöst und die Spülung verhält sich wie eine Flüssigkeit. Die Tonminerale bilden zudem einen Filterkuchen an der Bohrlochwand.

Es gibt keine entsprechenden Studien zur krebserzeugenden Wirkung von Bentonit. Als Feststoff oder als Suspension in Wasser sind Tone (Bentonit, Montmorillonit, Attapulgit und Sepiolith) völlig unbedenklich. Sie sollten aber nicht in oberflächliche Ge-

wässer eingeleitet werden, da die Tonminerale Fischkiemen verkleben können /WEB 11/.

Polymere

In manchen Fällen ist die Verwendung von Tonen nicht möglich. In diesem Fall werden für die Erhöhung der Stabilität und des Bohrkleintransportes der Bohrspülung Polymere (natürliche, halb- und synthetische) zugesetzt /LAS 10/. Zudem werden Polymere zur Viskositätserhöhung und zum besseren Transport von Stützmitteln in Stimulationsfluiden eingesetzt. Polymere sind so genannte Monomere, die sich untereinander zu langen Kettenmolekülen (Makromoleküle) verbinden können und somit die Viskosität der Spülung erhöhen. Durch die starke Wasseraufnahmefähigkeit der Polymere wird freies Wasser gebunden und die Viskosität der Spülung erhöht /LAS 10/.

Natürliche bzw. native Polymere (organische Substanzen) dienen als Nährstoffe für heterotrophe Bakterien, deren üblicherweise geringen Keimzahlen im Grundwasser durch die Zugabe organischer Nährstoffe deutlich erhöht werden. Die Bakterien können durch mikrobielle Zersetzung, die rheologischen Eigenschaften der Bohrspülung ungünstig beeinflussen. Zudem bilden sie korrosive Stoffwechselprodukte und fördern die Bildung von Ablagerungen (Scale) an Anlagenbauteilen oder im Speichergestein. Grundsätzlich ist deshalb keimarmes und hygienisch unbedenkliches Wasser zu verwenden /DVG 98b/. Polymeraktivierte Tonspülungen und Polymerspülungen werden in einem Mischungsverhältnis von 10 bis 30 kg Spülrohstoff auf 1 m³ Wasser angesetzt /SCB 09/.

XC-Polymere wie z. B. Xanthangum können in wässrigen Lösungen quellen und erhöhen dadurch die Viskosität des Mediums. Xanthangum wird eingesetzt, wenn das Quellen von Bentonit aus Zeit- oder Platzgründen nicht möglich ist, oder wenn Kleinstmengen hochviskos gemacht werden müssen (siehe Anlage 2.8 in /UTH 12/). XC-Polymere sind nur bis zu einer Temperatur bis 120 °C stabil. Bei höheren Temperaturen werden sie in korrosive Produkte umgewandelt und verlieren ihre viskositätssteigernden Eigenschaften /BUJ 11/.

Um eine Wasseraufnahme von durchbohrten Tongesteinen entgegen zu wirken, werden meist halbsynthetische Polymere wie CMC (Carboxy-Methyl-Cellulose) zugesetzt. Die Polymere überziehen die Tonoberfläche mit einer dünnen Schicht, dadurch wird das Eindringen von Wasser stark vermindert und das Quellen von Tonen weitgehend

unterbunden /WEB 11/. Die Spülung wird darüber hinaus vor gelösten Salzen geschützt und so ihre Verwendbarkeit sichergestellt, da bei der Anwesenheit von Salzen das Bentonit ausflocken könnte. CMC-Polymere sind temperaturbeständiger als XC-Polymere und sind bis etwa 140 – 160°C stabil. Polymere besitzen ein verstärktes Bestreben zur Bildung eines festen, undurchlässigen aber dünnen Filterkuchens, der vor dem Einbau der Verrohrung relativ einfach wieder entfernt werden kann. Bei Brunnenbohrungen würden Bentonite Poren und Klüfte dauerhaft verschließen, deshalb werden als Ersatz CMC-Polymere verwendet (siehe Anlage 2.8 in /UTH 12/). Synthetische Polymere sind bis zu 250 °C thermostabil. Zudem kann die Viskosität von Polymeremulsionen durch Quervernetzung von Polymerketten durch die Zugabe von Vernetzungsmitteln erhöht werden /FIN 12/.

In Stimulationsfluiden werden Polymere zur Steigerung der Viskosität benötigt, um bei einem Einsatz von Stützmitteln einen besseren Transport dieser sicherzustellen. Zudem kann durch eine Viskositätssteigerung der Frackdruck in der Lagerstätte erhöht werden.

Tab. 15.1.2 Polymere in Bohrspülungen /BUJ 11/

| Polymerhauptgruppe | Polymertyp | Funktion |
|---------------------------|---------------------|--|
| Native Polymere | XC Polymer | Viskositätsregulierung / Thixotropie |
| | Guar Gum | Viskositätsregulierung |
| | Stärke | Filtratreduzierung |
| Halbsynthetische Polymere | modifizierte Stärke | Filtratreduzierung |
| | NA-CMC | Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Schutzkolloid |
| | CMHEC | Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Schutzkolloid |
| | HEC | Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Schutzkolloid |
| Vollsynthetische Polymere | Polyacrylat | Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Dispergiermittel / Flockungsmittel |
| | Polyacrylamid | Viskositätsregulierung / Filtratreduzierung / Flockungsmittel / Toninhibierung |
| | Polyacrylnitril | Filtratreduzierung / Viskositätsstabilisierung / Dispergiermittel |
| | Polyvinylsulfate | Filtratreduzierung / Viskositätsstabilisierung |
| | Copolymere | Dispergiermittel |

Bio- sowie CMC-PAC-XC-Polymere und Guargum sind laut Sicherheitsdatenblätter unbedenklich. Einige dieser Biopolymere sind auch als Lebensmittelzusatzstoff zugelassen.

15.1.3.2 pH-Wert-Regulierung

Viele Additive benötigen ein basisches Milieu. Zur Erhöhung des pH-Wertes erfolgt eine Zugabe von Natriumkarbonat oder Calciumhydroxid (Löschkalk). Dadurch wird der pH-Wert des Wassers auf 9 – 9,5 angehoben. Ein hoher pH-Wert unterdrückt die Korrosionsrate der Bohrausrüstung, minimiert die Wasserstoffversprödung des Stahls bei Zutritt von Schwefelwasserstoff, senkt die Löslichkeit von Kalzium und Magnesium und erhöht die Löslichkeit von Additiven und optimiert zusätzlich die Quellung und die Wirksamkeit der Polymere /REI 96/.

Natriumkarbonat und Calciumhydroxid können nach Verschlucken Reizungen im Mund, Rachen, Speiseröhre und im Magen-Darmtrakt hervorrufen. Insbesondere das

Calciumhydroxid sollte nicht unverdünnt bzw. in größeren Mengen in das Grundwasser, in Gewässer oder in die Kanalisation gelangen, da größerer Mengen in Kanalisation oder Gewässer zur pH-Wert-Erhöhung führen. Ein hoher pH-Wert schädigt Wasserorganismen. Der Stoff ist als schwach wassergefährdend eingestuft (WGK 1). Die Entsorgung ist in Ländern und Gemeinden unterschiedlich geregelt, deshalb ist die Entsorgungsart bei den örtlichen Behörden zu erfragen.

15.1.3.3 Beschwerungsmittel

Beschwerungsmittel werden zur Erhöhung der Dichte der Bohrspülung eingesetzt. Umgekehrt kann die Dichte durch Schäumer oder durch die Zugabe von Hohlglas Partikel wieder verringert werden. Beschwerungsmittel werden auch als Additive in Ringraumzementen verwendet /CAE 11/. Durch die Erhöhung der Dichte der Spülung erhöht sich der hydrostatische Druck auf die Bohrlochwand, wodurch bei drückenden Formationsfluide deren Zutritt in den Ringraum vermieden wird /DVG 98b/. Es werden keine negativen Auswirkungen auf die Gesundheit von Arbeitern durch die Arbeit mit Beschwerungsmitteln in der Literatur gemeldet.

LCM-Materialien (Lost Zirkulation Materials)

Die Filtrationssteuerung der Bohrspülung in das umliegende Gestein ist ein wichtiger Prozess, insbesondere beim Bohren durch permeable Gesteine, in denen der hydrostatische Druck der Wassersäule in der Bohrung über dem Druck in der Gesteinschicht liegt. Das Bohrfluid muss in der Lage sein schnell einen Filterkuchen zu bilden, damit der Fluidverlust in das anstehende Gestein effektiv minimiert wird. Der Filterkuchen muss aber zudem dünn und erodierbar genug sein, um ihn nach dem Bohrvorgang wieder entfernen zu können, da ein direkter Kontakt zwischen anstehenden Gestein und Ringraumzement und der Verrohrung gewährleistet sein muss. Wenn während des Bohrvorgangs Bohrspülungsverluste auftreten, werden Spülungsverlustmaterialien zugesetzt, um die die Verlustzone zu schließen. Lost Zirkulation Materials sind nicht umwelt- oder gesundheitsgefährdend und werden somit als ungefährlich eingestuft.

15.1.3.4 Inhibitoren

Toninhibitoren

Tonstabilisatoren sollen die Quellung von Tonschichten im Untergrund bei Kontakt mit wässrigen Fluiden und der damit verbundenen Permeabilitätsreduzierung verhindern und einer Tonmineralverlagerung vorbeugen.

Da Tonspülungen nicht resistent gegen Elektrolyte (Salze, Laugen) sind, werden sie durch Zugabe von Polymeren geschützt. Dies soll die Tonminerale in Suspension halten, sonst würden sie ausflocken und die Bohrspülung würde ihre rheologischen Eigenschaften verlieren.

Scaleinhibitoren

Durch Prozessfluide kann Sauerstoff in die geothermische Lagerstätte eingebracht werden. Sauerstoff fördert die Ausfällung von Metallhydroxiden und -oxiden. Dies ist problematisch wenn diese im Porenraum der Lagerstätte ausfallen und dadurch die Permeabilität verringern. Um diesen Prozess zu unterbinden werden Sauerstoffinhibitoren eingesetzt /HUE 04b/.

Einige Minerale können nicht oder nur sehr schwer durch Säuren gelöst werden, wie z. B. Eisen. Um die Ausfällung von Eisen(II)-Ionen in der Lagerstätte zu unterdrücken, wird der pH-Wert des Stimulationsfluides durch die Zugabe von Komplexbildner (Säuren) abgesenkt. Zum Einsatz kommen in der Regel organische Säuren /REI 96/.

Korrosionsinhibitoren

Korrosion wird üblicherweise von gelösten Gasen in Prozessfluiden hervorgerufen. Zu den Gasen gehören Sauerstoff, Kohlendioxid oder Schwefelwasserstoff. Durch die Metallkorrosion kann das Bohrgestänge und die Verrohrung angegriffen werden, was im schlimmsten Falle zum Versagen führen kann. Bei der Säurestimulation werden ebenfalls Anlagenbauteile angegriffen. Um dies zu verhindern werden den Prozessfluiden häufig Korrosionsinhibitoren zugemischt.

Korrosionsinhibitoren werden folgendermaßen unterteilt:

- kathodische und anodische Inhibitoren
- anorganische und organische Korrosionsinhibitoren

15.1.3.5 Gelstabilisatoren (Vernetzungsmittel)

Durch die Zugabe von Vernetzungsmitteln (Cross-Linker) wird die vorzeitige Zersetzung von Polymeren bei hohen Temperaturen verhindert. Zudem halten die Vernetzungsmittel Stützmittel (z. B. Sand) in Suspension. Polymere werden häufig mit Metallionen zur Verbesserung ihrer Viskositätseigenschaften vernetzt. Um den Abbau vieler Polymere bei hohen Temperaturen zu verhindern, werden so genannte Stabilisatoren zugegeben /REI 96/.

15.1.3.6 Verflüssiger und Gelbrecher

Wenn die Viskosität der Bohrspülung verringert werden muss, kann dies durch die Zugabe von Wasser oder von so genannten Verflüssigern erfolgen. Die Verflüssiger bewirken ein Ausflocken der Spülungstone, wodurch Wasser freigesetzt wird welches die Viskosität erniedrigt /REI 96/, /SCB 09/. Durch die Zugabe von Verflüssiger in Zement wird die Abbindung verzögert (d. h. längere Verarbeitungszeit des angemischten Zements).

Wenn bei Stimulationsmaßnahmen Polymere eingesetzt wurden, kann am Ende der Stimulation ein Gelbrecher eingesetzt werden, um die Ablagerung der Stützmittel oder die Rückholung des Stimulationsfluides zu ermöglichen. Als Brecher werden häufig Peroxidisulfate verwendet.

15.1.3.7 Salze

Durch eine Aufsatzung der Bohrspülung mit Kaliumchlorid oder Kaliumcarbonat wird zum einen die Dichte der Bohrspülung erhöht und zum anderen werden durchteufte Tongesteine gegen Aufweichen und Auflösen durch die Bohrspülung geschützt. Außerdem wird durch die Aufsatzung gewährleistet, dass Salzhorizonte nicht gesohlt werden.

Bei einer Immission von hochmineralisierten Wässern an der Oberfläche oder in den Boden können schädliche Auswirkungen auf die Flora und Fauna entstehen. Salze, wie Natrium-oder Kaliumchlorid, werden oft den Prozessfluiden zugefügt, um die Fluideigenschaften zu optimieren. Die Salzkonzentration eines Bohrfluids kann sich zudem deutlich erhöhen, wenn durch einen Salzstock oder eine Gesteinsschicht mit hohen Salzkonzentrationen im Wasser gebohrt wird /REI 96/.

Wenn Süßwasser-Pflanzen Wasser mit zu hohen Salzkonzentrationen aufnehmen, werden das Zellwachstum und die Wasseraufnahme der Pflanzen beeinträchtigt. Zudem wird die mechanische Struktur (Porengefüge) des Bodens, die den Transport von Luft und Wasser beeinflusst gestört. Wasser mit Salzkonzentrationen unterhalb etwa 2.500 mg/l, hat minimale Auswirkungen auf die meisten Pflanzen. Thermalwässer können Mineralgehalte von 1.000 mg/l bis zu 300.000 mg/l aufweisen /SCR 09/. LC₅₀ – Grenzwerte für Salzkonzentrationen für Süßwasser-Organismen liegen in der Größenordnung von ca. 1.000 mg/l /REI 96/.

Calcium und Chlorid sind wesentliche Nährstoffe für den Menschen und eine tägliche Aufnahme der Ionen wird empfohlen. Die genetische Toxizität von Calciumchlorid ist im bakteriellen Mutationstest und im Chromosomenaberrationstest von Säugetieren negativ. Es wurde keine Reproduktionstoxizität berichtet. Kaliumchlorid ist als wesentlicher Bestandteil des Körpers für den intrazellulären und osmotischen Druckausgleich, zur Pufferung der Zellpermeabilität, dem Säure-Basen-Gleichgewicht, der Muskelkontraktion und Nervenfunktion zuständig. Natriumchlorid ist ein wichtiger Nährstoff für das normale Funktionieren des Körpers. Es ist wichtig für die Nervenleitung, Muskelkontraktion, das richtige osmotische Gleichgewicht der extrazellulären Flüssigkeit und die Aufnahme von anderen Nährstoffen /OGP 09/.

15.1.3.8 Metalle

Metalle werden aus mehreren Quellen in Prozessfluide eingetragen: Viele Metalle sind natürlicherweise in den meisten Formations- und Lagerstättenwässern enthalten und vermischen sich während dem Bohren oder der Stimulation mit Prozessfluiden. Metalle sind natürlicherweise auch in den meisten Gesteinen und Böden enthalten, diese Metalle können als Bohrklein an die Oberfläche gefördert werden und sich in Absetzbecken anreichern. Zudem werden dem Bohrfluid direkt Metalle als Additive zugegeben.

Natürlich vorkommende Metalle von besonderem Interesse sind Arsen, Barium, Cadmium, Chrom, Blei und Quecksilber.

Die am häufigsten gefundenen Metalle sind traditionell Barium aus Baryt (Beschwerungsmittel) und Chrom aus Chrom-Ligninsulfonat (Verflüssigungsmittel). Aufgrund seiner geringen Löslichkeit, wird in den Untergrund eingebrachtes Barium nicht vom Grundwasser ausgelaugt oder transportiert. Somit kann Barium nicht in Pflanzen und in die Nahrungskette gelangen /REI 96/.

Chrom ist ein weiterer wichtiger Bestandteil vieler Bohrspülungszusätze, wie z. B. Chrom-basierte Verflüssigungsmittel. Chrom in seiner toxischen sechswertigen Form wird als Gel-Inhibitor/Verdünner, Hochtemperatur-Stabilisator, Dispergiemittel, Biozid und als Korrosionsinhibitor verwendet. Es ist jedoch zu erwarten, dass die sechswertige Chrom-Spezies in der Bohrspülung schnell in seine relativ ungiftige, dreiwertige Form reduziert wird. Typische Chrom-Konzentrationen in Bohrspülungen liegen zwischen 100 und 1.000 mg/l /REI 96/.

Eine Reihe von anderen Metallen finden sich zudem in Bohrspülungszusätzen, wenngleich in geringeren Konzentrationen. Cadmium ist in einigen Gewindeabdichtungen enthalten. Das Mineral Schwerspat, kann hohe natürlich vorkommende Mengen von Cadmium und Quecksilber enthalten. Zink wird gelegentlich in Form von anorganischen Zinksalzen zur Dichte Steuerung oder als Schwefelwasserstoff-Absorber zur Verhinderung von Korrosion und zur Erhöhung der menschlichen Sicherheit verwendet.

In den hochmineralisierten Wässern können sich hohe Konzentrationen an „Schwermetallen“ befinden. Durch das Fehlen einer eindeutigen wissenschaftlich akzeptierten Definition des Begriffs Schwermetall gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen in der Literatur. Im umgangssprachlichen Bereich bezeichnet man mit einem Schwermetall meistens Elemente, denen eine toxische Wirkung zugeschrieben wird. Ob ein Schwermetall toxisch ist oder nicht, hängt aber häufig von der Stoffkonzentration bzw. der aufgenommenen Menge ab und nicht vom Stoff selber. Denn einige der sogenannten Schwermetalle werden vom Körper in geringen Mengen essentiell benötigt, diese werden als Spurenelemente bezeichnet (z. B. Chrom, Kobalt, Kupfer, Jod, Eisen, Mangan, Molybdän, Nickel, Selen, Silizium, Vanadium, Zinn und Zink). Deshalb wird hier der Begriff Schwermetall nicht mehr verwendet. Die Toxizität vieler Metalle besteht in ihrer Wechselwirkung mit Enzymen, die biochemische Prozesse in den Zellen beein-

flussen. Allgemeine Nebenwirkungen nach der Aufnahme zu hoher Konzentrationen sind Schäden an der Leber, Niere oder dem Nervensystem /REI 96/.

15.1.3.9 Gase

Bei Stimulationsmaßnahmen kann Kohlendioxid bei chemischen Verfahren durch die Reaktion der Säure mit dem Speichergestein entstehen. Zudem sieht ein Stimulationsverfahren vor, Kohlendioxid in die zu stimulierende Lagerstätte zu pumpen welches dann später nach der Zugabe von Wasser zu Kohlensäure reagiert, welche das Gestein löst.

Ein unkontrolliertes Ausströmen von Gasen aus dem Bohrkopf wird durch einen Blow-out Preventer verhindert. Zudem wird durch die permanente Überwachung der Umgebungsluft durch das Service Unternehmen ein unkontrollierter Gasaustritt ausgeschlossen. Sollte z. B. CO₂ aus dem Injektionsstrang in den Ringraum eintreten, wird das CO₂ mit dem Wasser Hydrogenkarbonat bilden und auf diese Weise aufgenommen werden. In diesem Fall sinkt der Kopfdruck und die CO₂ Injektion würde unterbrochen zu Gunsten einer Wasserinjektion. Das CO₂ das im Bereich des unverrohrten Bohrlochs bestimmungsgemäß in das Gebirge eintritt, wird dort mit Karbonat und Wasser reagieren und ebenfalls Hydrogenkarbonat bilden. Eine Kontamination des Grundwassers im Injektionsbereich oder in darüber liegenden Aquiferen ist damit ausgeschlossen /GEO 12/.

Bei Fördertests wird die Förderleistung aus der Lagerstätte getestet. In dem Thermalwasser können Gase (Schwefelwasserstoff, Kohlendioxid, Radon und Methan) enthalten sein. Diese werden vor dem Ausfließen in das Zwischenspeicherbecken durch Degasser vom Thermalwasser abgetrennt. Kommt es wiedererwarten trotzdem vor das Sauerstoffkonzentrationen von > 10 ppm an den Arbeitsplätzen auf der Bohrung auftreten, wird der Fördertest abgebrochen /GEO 12/.

15.1.3.10 Stützmittel

Nach hydraulischen Stimulationsmaßnahmen fällt der Fluiddruck im Speichergestein wieder ab. Es besteht die Gefahr, dass sich aufgeweitete Klüfte wieder schließen. Damit die Kluft offen bleibt können Feststoffe mit dem Stimulationsfluid in das Lagerstättengestein gepumpt werden, um die Kluft zu stützen und somit offen zu halten. Als

Stützmittel werden chemisch unbedenkliche Stoffe wie Quarzsand, Bauxit, Zirkonoxid, Oxidkeramik, Porzellanstützmittel, Keramik- und Metallbestandteile verwendet /REI 96/.

Während Stimulationsmaßnahmen in Groß Schönebeck wurde unbedenkliches Quarzsand als Stützmittel getestet. Bei stimulationsmaßnahmen im Oberrheingraben und im Molassebecken wurden bislang keine Stützmittel benötigt da die Gesteine kompetent genug sind, damit sich die erweiterten Klüfte nicht mehr von selber schließen können.

15.1.3.11 Reibungsverminderer

Während des Bohrens kann das Bohrgestänge ein sehr großes Drehmoment, aufgrund des Kontaktes mit der gering viskosen Bohrspülung oder der Bohrlochwand (HDD-Verfahren), entwickeln. Im schlimmsten Fall kann das Bohrgestänge verklemmen. Wenn dies geschieht, kann das Bohrgestänge nicht angehoben, abgesenkt oder gedreht werden. Faktoren, die zu dieser Situation führen sind u. a. Ablagerungen von Bohrklein im Bohrloch, ein unterbalanciertes Bohrloch, Einbetten eines Bohrgestänge Abschnitts in den Filterkuchen, unerwartete Differenzdrücke zwischen Bohrspülung und drückenden Formationsfluiden. Um die Reibung des Bohrgestänges zu vermindern werden Schmiermittel so genannte Reibungsverminderer eingesetzt.

Reibungsverminderer werden zudem zur Verringerung der Viskosität bei sog. Slick-Water-Fracks eingesetzt, um die Reibung innerhalb des Fluides zu verringern, um somit mit hohen Pumpraten arbeiten zu können /REI 96/.

15.1.3.12 Biozide

Um das Bakterienwachstum in der Bohrung und die Ausbildung von Biofilmen an Oberflächen von Behältern und Apparaturen zu unterbinden, kann dem Bohrfluid ein Bakterizid zugemischt werden. Viele Bohrspülungen enthalten Polymere auf Zuckerbasis, die eine effektive Nahrungsquelle für bakterielle Populationen bieten. Dies kann zu einem direkten Abbau von Bohrschlamm führen. Zusätzlich können die Bakterien durch Sulfatreduktion schädliche Stoffwechsel Produkte wie Schwefelwasserstoff (H_2S) im Bohrloch bilden. Schwefelwasserstoff beeinflusst die Stabilität des Bohrschlammes da die Polymere zersetzt werden, es führt zur Bildung von problematischen Feststoffen wie Eisensulfid. Zudem wirkt es korrosiv auf das Bohrgestänge, die Verrohrung und den

Ringraumzement. Schwefelwasserstoff ist ein toxisches Gas /CAE 11/. Mikrobielle Prozesse können zudem zur Ausfällung von Mineralen führen. Diese Minerale verschlechtern die Speichereigenschaft der Gesteine. Dies ist besonders unerwünscht in der geothermischen Lagerstätte.

Biozide werden zur Verhinderung des Bakterienwachstums und Abbaus der Polymergele eingesetzt. Die Trinkwasserverordnung setzt einen Grenzwert von 0,10 µg/l pro Wirkstoff und 0,50 µg/l für die Summe von bioziden Wirkstoffen fest.

15.1.3.13 Säuren

Zur Beseitigung von Ausfällungen im Speichergestein, von Ablagerungen in Rohren des Thermalwasserkreislaufes und zur Erweiterung von Klüften im Speichergestein können chemische Verfahren eingesetzt werden. Dazu werden Säuren in das Speichergestein gepumpt welche die unerwünschten Minerale bzw. das Speicherstein lösen.

Tab. 15.1.3 Auswahl verschiedener Säuren und ihre potentiellen Anwendungsgebiete
/WOL 12

| Minerale | Säurekonzentration | Aquifer |
|------------------------------------|--|--|
| Karbonat, Eisensulfide, Eisenoxide | HCl (15 %) | Sandstein, Karbonat |
| Ton, Silikate, SiO ₂ | HCl (12 %) / HF(3 %) | Sandstein (hoher Quarzanteil > 80 %) |
| Ton, Silikate, SiO ₂ | HCl (13,5 %) / HF (1,5 %) | Sandstein (hoher Feldspat oder Tonanteil > 20 %) |
| Ton, Silikate, SiO ₂ | HCl (6 %) / HF (1,5 %) | Sandstein, (Ton < 5 %, hoher Chloridgehalt) |
| Ton, Silikate, SiO ₂ | Tetrafluoroborsäure, Fluorborborsäure | Sandstein, Karbonat |
| Karbonate | Ameisensäure (9 %) | Sandstein |
| Karbonate | Essigsäure (10 %) | Sandstein, Karbonat |
| Karbonate | Ethylendiamintetraessigsäure | Sandstein, Karbonat |
| Gips | NH ₄ HCO ₃ , Na ₂ CO ₃ -NaOH | Sandstein, Karbonat |

Wenn Säure für Stimulationsmaßnahmen oder zur Beseitigung von Speicherschäden im bohrlochnahen Bereich verwendet wird, reagiert diese innerhalb von Stunden mit

dem Speichergestein und wird dadurch neutralisiert. Bei der Verwendung von HCl reagiert diese mit dem Kalkgestein und wird in die Endprodukte Wasser, Kalziumchlorid und CO₂ umgewandelt. Ein Säureaustritt in die Umwelt wird durch gesonderte Sicherheitsmaßnahmen des Service Unternehmens (Pumpensteuerung, Hochdruck Sicherheitsarmaturen) verhindert. Bei einer späteren möglichen Rückförderung (Fördertests) ist die Säure vollständig abreagiert /GEO 12/.

15.2 Modellierung geochemischer Prozesse⁷²⁷

In order to simulate the processes at work in geothermal reservoirs, several different chemical models must be built in order to take into account the reactions occurring in all of the parts of the plants. Indeed, it is particularly important to know how the water composition changes between the bottom of the production borehole and the bottom of the injection borehole: these changes condition the scaling processes occurring in the reservoir

As a consequence, the following phenomena are of particular interest and a reliable modeling is required for accurate predictions of the short and long-term changes in the reservoir and the different parts of geothermal plants:

- The rise of the fluid in the production borehole (change of the pressure from generally 500 bars to 20 bars without temperature changes). This leads to the exsolution of the gases dissolved in the brine, along with corrosion and precipitation phenomena on the borehole skin.
- The cooling of the fluid into the surface power plant (generally from about 160°C to 70°C), which leads to corrosion and precipitation phenomena in the different parts of the plant.
- The drop of the fluid in the injection borehole (pressure increase from 20 bar to 500 bars, at a constant temperature).

Of all those phenomena, the ones involving pressure changes are the most problematic, because they imply that the code used takes the pressure dependence of the chemical reactions into account, as well as the existence a chemical database that includes these sorts of effects. This database does not exist as of yet, and those calculations could not be made (for this work) as a consequence.

Also, the fact that GRS is in the process of building databases for the environment of geothermal reservoirs means that the database used for the calculations is temporary,

⁷²⁷ Der vorliegende Abschnitt wurde durch einen englischsprachigen Bearbeiter erstellt. Da der Anhang A.2 in englischer Sprache vorliegt, wird auch in den Tabellen englische Schreibweise (insb. Dezimal-PUNKT) verwendet

and does not contain all of the important elements involved in the geothermal power plants, as well as all of the gases. As a consequence, only a low number of chemical species has been modeled. This allows, however, an easy checking of the results against reality, and facilitates the understanding of the simulated processes.

The program used to make the necessary simulations was Chemapp, and the database is taken from the Geodat project. The following calculations were undertaken (for both the sites of Groß-Schönebeck and Soultz-sous-Forêts :

- Calculation of the cooling of the fluid in the power plant, for the strontium, barium and radium sulfates.
- Calculation of the mixing of the reservoir fluid (hot) and of the cooled fluid reinjected behind the power plant, for the strontium, barium and radium sulfates.

Cooling calculation

In order to model the cooling of the geothermal brine in the geothermal plants, geochemical batch calculations have been run. Their results are presented in this section.

Soultz

For this calculation, the liquid was supposed to have an initial temperature of 170°C, and a final temperature of 70°C. The pressure was set at 10 bars to prevent the evaporation of water during the simulation. The temperatures used are typical of geothermal power plants in Germany. The pressure, on the other hand, was chosen as low as possible (in order not to vaporize the solution), but not at the typical operating pressure of the existing plants (between 20 and 30 bars), because the database used is not polybaric.

The lead speciation calculation was not attempted because the most abundant solid phase is lead sulfide, which is not present in the current database, leaving only the sulfates scaling.

The simulation takes 1 kg of water, to which are added the right amounts of Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, Ba²⁺, Ra²⁺, Sr²⁺ and SO₄²⁻, for the brine composition to correspond to the measurements given in section reservoirs. The radium contents are calculated from the ac-

tivity measurements of the brine (the formula used for such calculation is given later in this section).

Tab. 15.2.1 Activities in the Soultz Brine /DEG 11/

| Nuclide | Activity of the brine (Bq/L) | ± |
|---------|------------------------------|-----|
| 226Ra | 29.1 | 1.3 |
| 210Pb | 6 | 1.7 |
| 228Ra | 20.5 | 0.9 |
| 224Ra | 19.9 | 1.1 |
| 40K | 96 | 6 |

The input composition is as follows:

Tab. 15.2.2 Composition of the brine used for the Soultz cooling calculation

| Species | Added number of moles |
|--|-----------------------|
| H ₂ O | 55.5 |
| Cl ⁻ (adjusted for charge balance) | 1.69 |
| Na ⁺ | 1.31 |
| Ca ²⁺ | 0.18 |
| SO ₄ ²⁻ | 2.17E-03 |
| Ba ²⁺ | 7.10E-05 |
| Sr ²⁺ | 5.39E-03 |
| Ra ²⁺ (calculated from activity measurements) | 3.88E-12 |
| H ⁺ (for pH adjustment) | 2.00E-05 |
| OH ⁻ (for pH adjustment) | 5.01E-10 |

The chemical equilibrium for this solution is then calculated for temperatures between 170°C and 70°C (10 steps).

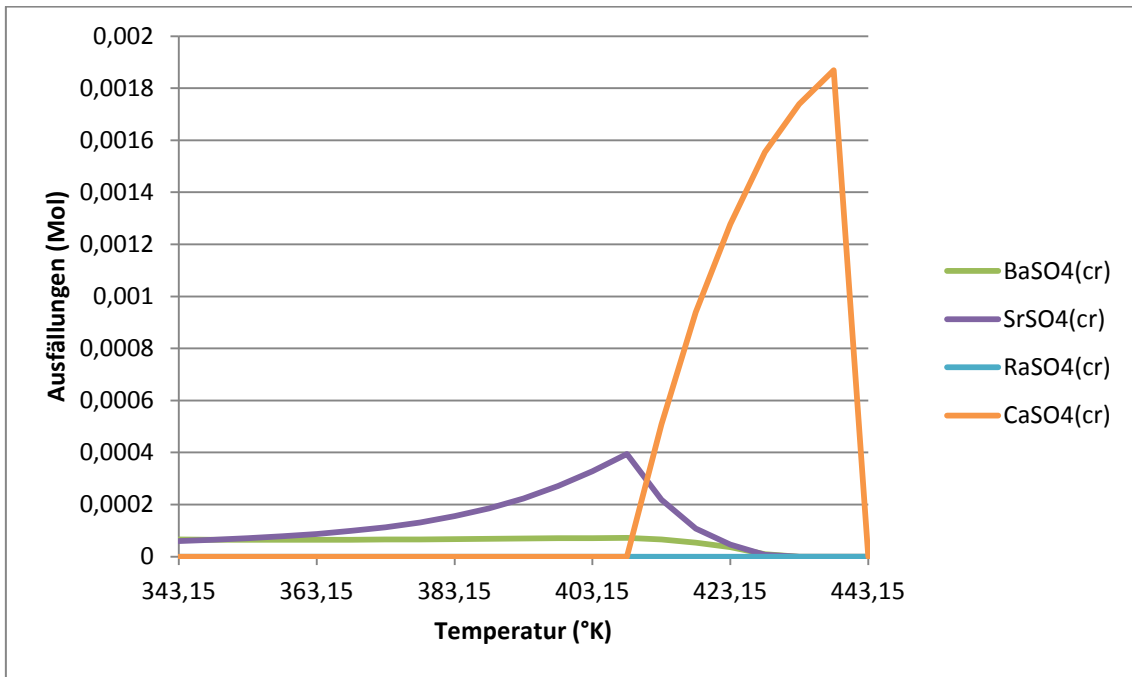


Abb. 15.2.1 Sulfates scales formed during cooling of the brine in Soultz (linear scale)

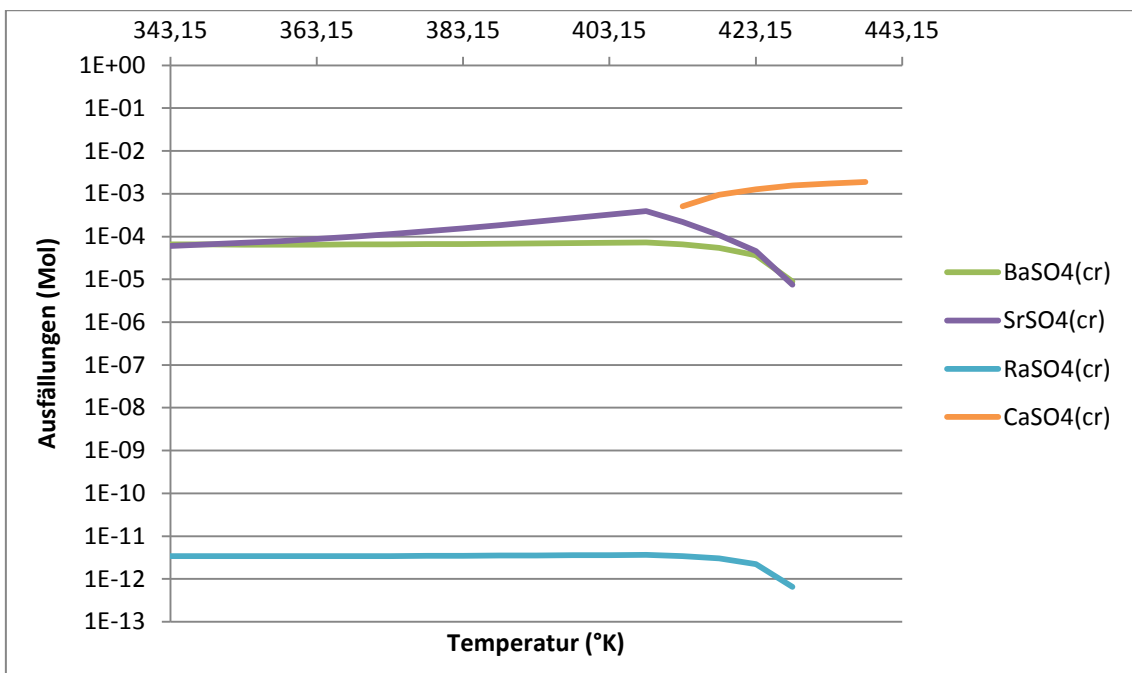


Abb. 15.2.2 Sulfates scales formed during cooling of the brine in Soultz (logarithmic scale)

It can be seen that the strontium sulfate shows a formation peak at 135°C. This peak can be explained by the precipitation of anhydrite at the highest temperatures. This precipitation does not correspond to reality, and is due to the fact that the temperature

functions for the sulfates used for the geochemical database are only valid up to 90°C for celestite, and 100°C for Anhydrite.

Moreover, in the scales found in the Soultz power plant the ratio between Barium and Strontium sulfate was measured /SCH 12/ to be 58 to 64% Ba, and 36 to 43 Sr. In those calculations, the ratio is reversed. There are several possibilities to account for this difference:

1. The Strontium sulfate does not have the same kinetics as the barium sulfate, and precipitate more slowly.
2. The database is not correct for Celestite.

In order to validate one of those hypotheses, several more calculations would have to be made, taking the kinetics into account.

Also, in order to confirm the need for taking kinetics into account, the amount of produced scales was calculated from the results given earlier. Considering a flow rate of 35L/s in the plant, and that the calculated amount of solution would represent a volume of approximately 1.2 l, 5,7 m³ of scales would be produced every year in the plant. This is obviously far too much, and means that there must be a strong influence of kinetics on the final results, and that further and more detailed calculations are necessary.

As for the amount of radium integrated in the scales, it can be compared to the amount of Ba and Sr in the scales. Using the scales activities found in /GEN 10/, the stoichiometric ratio of radium embedded in the scales can be calculated (in /GEN 10/, there are values for measurements in different parts of the plant, a mean value has been estimated combining all of those results). This ratio was evaluated assuming that the scales are composed (in terms of mass) of roughly 40% Celestite and 60% Barite, and calculated as follows:

$$R_{Ra} = \frac{C_{Ra} \cdot M_{RaSO_4}}{\sum_{i=Ra,Ba,Sr} C_i \cdot M_{iSO_4}}$$

with:

- C_i the concentration of the component i in the scales (in Mol.kg⁻¹).

- M_{iSO_4} the molar mass of the sulfate corresponding the component i in the scales (in g.Mol⁻¹).

The radium concentration can be calculated as follows (from the measured activities of the different isotopes):

$$C_{Ra} = \frac{1}{N_a} \left(\frac{A_{223}^{88}Ra}{\lambda_{223}^{88}Ra} + \frac{A_{224}^{88}Ra}{\lambda_{224}^{88}Ra} + \frac{A_{226}^{88}Ra}{\lambda_{226}^{88}Ra} + \frac{A_{227}^{88}Ra}{\lambda_{227}^{88}Ra} + \frac{A_{228}^{88}Ra}{\lambda_{228}^{88}Ra} \right)$$

with:

- $A_{22x}^{88}Ra$ the radioactive activity of $^{22x}_{88}Ra$ in the scales (in Bq.kg⁻¹)
- $\lambda_{22x}^{88}Ra$ the radioactivity constant of $^{22x}_{88}Ra$ (in s⁻¹)
- N_a the Avogadro constant ($\approx 6,02E23$ Mol⁻¹)

The $^{223}_{88}Ra$, $^{224}_{88}Ra$, $^{227}_{88}Ra$, can generally be neglected, because they have a very short half-life compared to the others, and because the fluid initially comes from a media in radioactive equilibrium: they have a relatively high activity, but a very low concentration.

The above mentioned activities have to be taken from measurements of the scales. However, the measured values cannot be used as is: the age of the considered scale must be taken into account, and the activities corrected (see section 0 for more details). The activities used for this calculation are given in chapter reservoirs.

Tab. 15.2.3 Measured activities of the scales in Soultz /GEN 10/

| Fam-ily | Iso-tope | Filter GPK2 (Bq/g) | Pump GPK2 (Bq/g) | Heat exchanger (Bq/g) | Filter GPK-4 (Bq/g) |
|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|-----------------------|---------------------|
| ²³⁸ U | ²²⁶ Ra | 689 | 1347 | 1015 | 1376 |
| | ²¹⁴ Pb | 556 | 1063 | 764 | 1014 |
| | ²¹⁴ Bi | 465 | 891 | 689 | 883 |
| ²³² Th | ²²⁸ Ra | 117 | 442 | 338 | 433 |
| | ²²⁸ Th | 208 | 459 | 230 | 355 |
| | ²²⁴ Ra | 214 | 384 | 220 | 323 |
| | ²¹² Pb | 185 | 323 | 181 | 273 |
| | ²¹² Bi | 165 | 281 | 175 | 243 |
| | ²⁰⁸ Tl | 55.6 | 90.7 | 55.3 | 76.5 |

After doing all of those preliminary calculations, the measured stoichiometric ratio between radium sulfate and other sulfate types was found to be equal to:

$$R_{Ra}^{meas} = 2,82 \cdot 10^{-8}$$

In the Chemapp calculation, the same ratio (at a temperature of 70°C, where the results are closest to the reality) was found to be:

$$R_{Ra}^{calc} = 2,71 \cdot 10^{-8}$$

These results are very close to each other, and this tends to confirm the validity of the database, with its modeling of radium sulfate in a solid solution with barium and strontium sulfate. It also means that, provided realistic kinetics parameters are used, it should be possible to accurately predict the radioactivity of the sulfate scales in a geothermal plant. This could be very useful for further radioprotection studies.

Groß-Schönebeck

For this calculation, the liquid was supposed to have an initial temperature of 160°C (at the top of the borehole the temperature is 150°C, but the calculation of the chemical equilibrium at higher temperatures gives an idea of the evolution of the aforesaid equi-

librium), and a final temperature of 70°C. The pressure was set at 10 bars to prevent the evaporation of water during the simulation.

The lead speciation calculation was not attempted because the most formed species is lead sulfide, and that it is not present in the current database, leaving only the sulfates scaling.

The simulation takes 1 kg of water, to which are added the right amounts of Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, Ba²⁺, Ra²⁺, Sr²⁺ and SO₄²⁻, for the brine composition to correspond to the measurements given in this report. The radium contents are calculated from the activity measurements of the brine.

Tab. 15.2.4 Activities in the Soultz Brine /DEG 11/

| Nuclide | Activity of the brine (Bq/L) | ± |
|---------|------------------------------|-----|
| 226Ra | 7.7 | 0.4 |
| 210Pb | 0.3 | NA |
| 228Ra | 9.3 | 0.2 |
| 224Ra | 8.1 | 0.6 |
| 40K | 20 | NA |

The input composition is as follows (as calculated using the measured data given in section reservoirs

Tab. 15.2.5 Composition of the brine used for the Groß-Schönebeck cooling calculation

| Species | Added number of moles |
|--|-----------------------|
| H ₂ O | 55.5 |
| Cl ⁻ (adjusted for charge balance) | 5.91 |
| Na ⁺ | 2.23 |
| Ca ²⁺ | 1.80 |
| SO ₄ ²⁻ | 1.95E-03 |
| Ba ²⁺ | 3.31E-04 |
| Sr ²⁺ | 3.81E-02 |
| Ra ²⁺ (calculated from activity measurements) | 3.88E-12 |

The chemical equilibrium for this solution is then calculated for temperatures between 170°C and 70°C (20 steps).

The results are shown in Abb. 15.2.3.

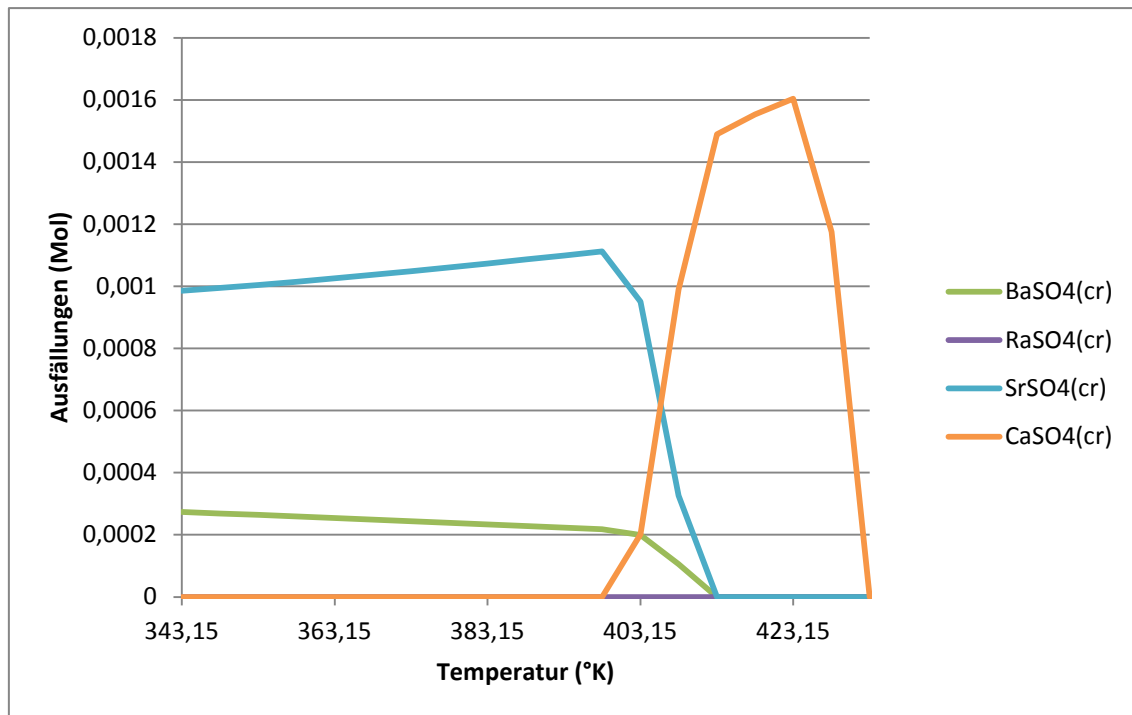


Abb. 15.2.3 Sulfates scales formed during cooling of the brine in Groß-Schönebeck (linear scale)

On the curves, it can be seen that at 150°C (423,15°K), the solution is not considered in equilibrium by chemapp, but oversaturated in Anhydrite. Evidently, this does not correspond to reality (150°C is the temperature found in the Groß-Schönebeck reservoir). This proves that the results calculated at temperatures over the validity range of the chemical database (which is, in our case, 120 °C) are not to be trusted.

Moreover, the precipitation of Celestite is more puzzling, because it has not been found in the plant. This tends, again, to show that the temperature functions in the database need to be extended to higher temperatures in order to give accurate results in the conditions found in geothermal plants.

Also, in order to confirm the need for taking kinetics into account, the amount of produced scales was calculated from the results given earlier. Considering a flow rate of

35 L/s in the plant, and that the calculated amount of solution would represent a volume of approximately 1.2 l, 54 m³ of scales would be produced every year in the plant. This is obviously far too much, and means that there is a strong influence of kinetics on the final results.

Mixing calculation

The mixing calculation, or the simulation of the scaling events occurring when the cool water reinjected into the injection borehole meets the hot water still in the reservoir.

When injected into the reservoir, the cold water is gradually diluted into the hot native water. In order to know how the scaling evolves, it is necessary to model this dilution process, and to get calculations done for different steps of the process. In order to do that, the calculation was done with a constant total mass, but a varying composition, using the following formula, for each chemical element i:

$$n_{Mix}^i = (x) \cdot n_{Cold}^i + (1 - x) \cdot n_{Hot}^i$$

with:

- n_{Mix}^i the number of moles of the element i to be added to the simulated mixture.
- n_{Cold}^i the number of moles of the element i contained in the amount of solution corresponding to 1kg water for the cooled brine.
- n_{Hot}^i the number of moles of the element i contained in the amount of solution corresponding to 1kg water for the hot brine.
- x the mass ratio of cooled water in the simulation: $\frac{m_{Cold}}{m_{Cold}+m_{Hot}}$

When the two solutions mix, the temperature of the cold water is heightened by the contact with the hot water. If we neglect the thermal influence of the rock matrix (this is not very realistic, but it will lead to the production of more scales, because the rock has a tendency to heat the fluid, but this can only be correctly calculated by a transport code), we can say that the final temperature of the fluid is proportional to the mass ratio between hot and cool fluid. This means that it is possible to calculate a final temperature that can be given directly to Chemapp, for it to make the calculation.

The final temperature is calculated as follows:

$$T_{Mix} = (x) \cdot T_{Cold} + (1 - x) \cdot T_{Hot}$$

For an exhaustive modeling, several calculations have to be done with values of x between 0 and 1. The composition of the hot water, is the initial composition used for the cooling calculation, and the composition of the cold water is the composition of the aqueous phase at the minimal temperature of the cooling calculation.

Soultz

For Soultz, the compositions of the cold and hot waters are summed up in section reservoirs.

Tab. 15.2.6 Brine composition for the mixing calculation for Soultz

| Water | Chemical Element | Number of Moles |
|-------|------------------|-----------------|
| Cold | H | 1112 |
| | O | 55.5 |
| | Na | 1.31 |
| | Ca | 0.184 |
| | Cl | 1.69 |
| | S | 0.00205 |
| | Ba | 0.0000143 |
| | Sr | 0.00533 |
| | Ra | 4.56E-13 |
| Hot | H | 111 |
| | O | 55.5 |
| | Na | 1.31 |
| | Ca | 0.184 |
| | Cl | 1.69 |
| | S | 0.00217 |
| | Ba | 0.0000710 |
| | Sr | 0.00539 |
| | Ra | 3.88E-12 |

The result of the calculation can be seen in Abb. 15.2.4.

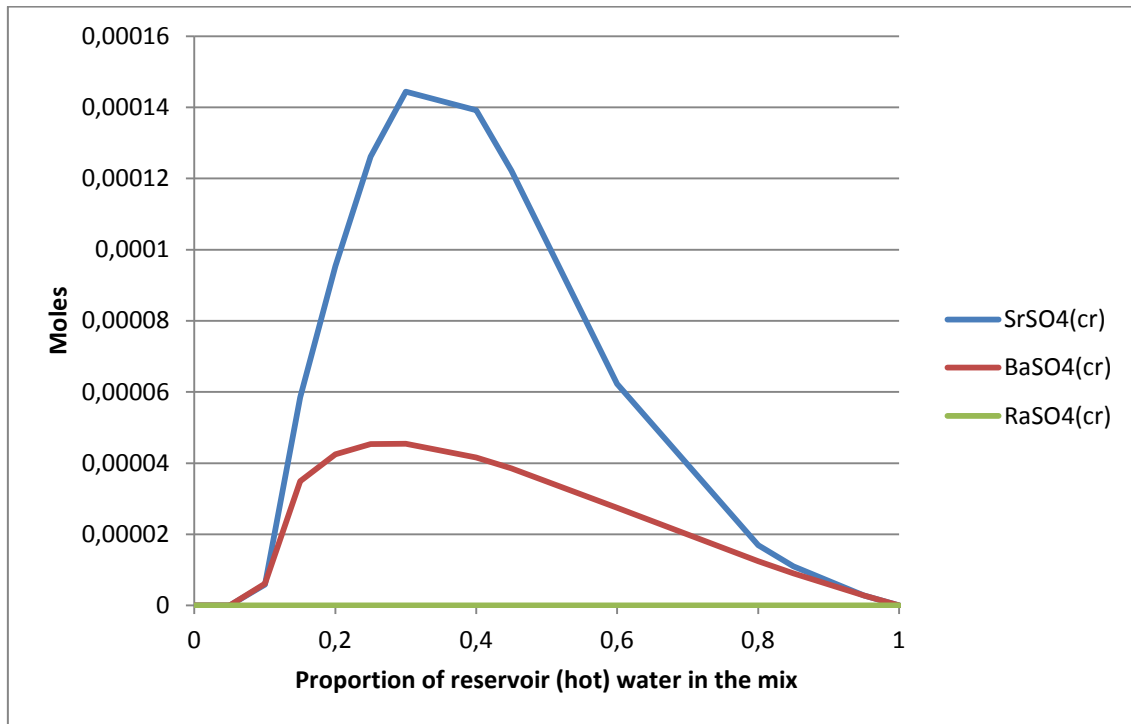


Abb. 15.2.4 Result of the mixing calculations for Soultz

It can be seen on Abb. 15.2.4 that the amount of scales created depends on the ratio between cold and hot water, which can be linked to the distance between the sample and the borehole. As a consequence, it can be seen that the precipitation does not occur as soon as the reinjected water reenters the reservoir, but some distance away from the borehole. This precipitation front would then progress in the rock, as the reservoir water is progressively driven away by the injection of cooled water, and the environment rock cools down.

This calculation is, however, based on the assumption that the reinjected fluid is in chemical equilibrium, which is very probably not the case (due to kinetics not being taken into account in the cooling calculations). As a consequence, the fact that no scaling occurs in direct proximity to the borehole must be reconsidered, and is likely not to be consistent with what happens in reality. Also, the calculation presented in this section was made without taking pressure into account (the database not being polybaric). As a consequence, the fluid actually injected in the reservoir could also be different because of reactions occurring during the (hydrostatic) pressure increase in the injection borehole.

Most importantly, it is essential to be able to model this phenomenon with a reactive transport code, taking the kinetics into account. Indeed, since the precipitation can only

occur in intermediate states of the mixing between hot and cool water, the actual scaling might be delayed enough not to occur at all, when the mixing volume is small (in other words, when the mixing process is short). This would mean that, at first, no (or very little scale) would form into the reservoir, but that, time passing, the volume cooled down by the reinjected fluid would grow along with the mixing volume, finally allowing scales to form.

Groß-Schönebeck

For Groß-Schönebeck, the compositions of the cold and hot waters are summed up in Tab. 15.2.7.

Tab. 15.2.7 Brine composition for the mixing calculation for Groß Schönebeck

| Water | Chemical Element | Number of Moles |
|-------|------------------|-----------------|
| Cold | H | 111 |
| | O | 55.5 |
| | Na | 2.23 |
| | Ca | 1.80 |
| | Cl | 5.91 |
| | S | 6.72E-04 |
| | Ba | 5.63E-05 |
| | Sr | 3.71E-02 |
| | Ra | 1.77E-13 |
| Hot | H | 111 |
| | O | 55.5 |
| | Na | 2.23 |
| | Ca | 1.80 |
| | Cl | 5.91 |
| | S | 1.95E-03 |
| | Ba | 3.31E-04 |
| | Sr | 3.81E-02 |
| | Ra | 1.258E-12 |

The result of the calculation can be seen in Abb. 15.2.5

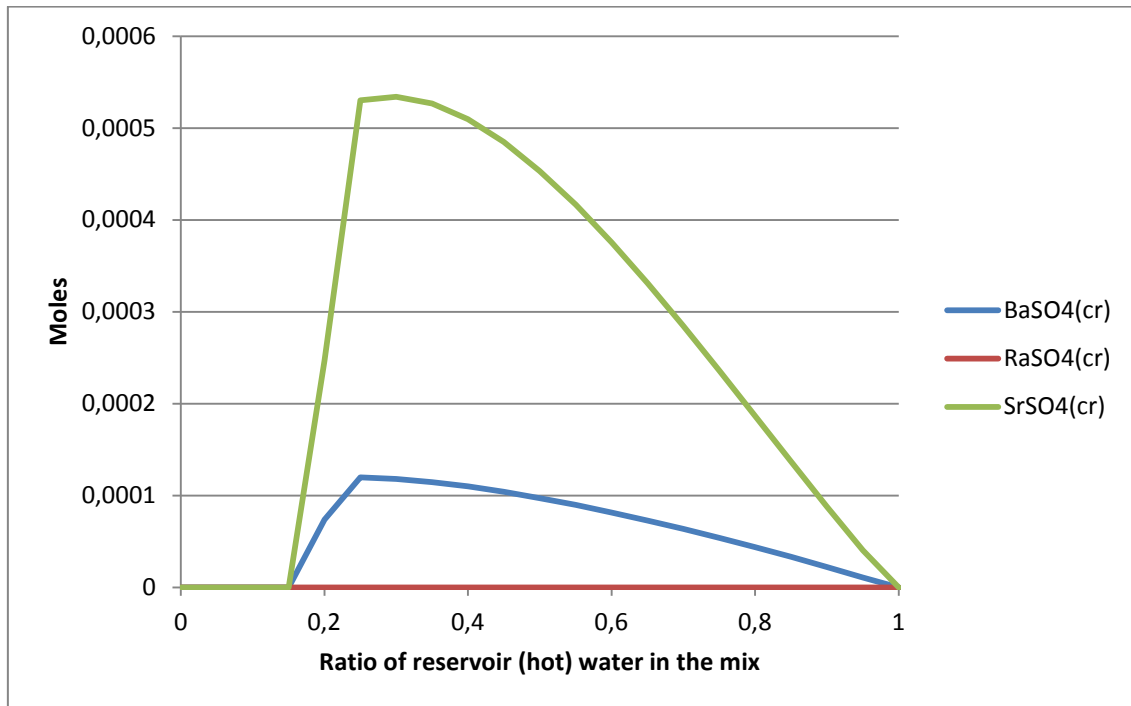


Abb. 15.2.5 Result of the mixing calculations for Soultz

The mixing calculation for Groß-Schönebeck gives very similar results compared to the same calculation for Soultz, except that it predicts a much higher amount of scale produced. Consequently, the conclusions and remarks made for the Soultz calculation stay valid for this calculation as well.

Calculation of the age and initial radium activities of a scale sample

The ^{232}Th decay chain contains two isotopes of radium that have very different half-lives (5.8 years for ^{228}Ra and 3.8 days for ^{224}Ra). Thus, in the scales, the ^{224}Ra captured during the precipitation of the mineral disappears rapidly, and its concentration depends, then, only on the initial concentration (or activity) of ^{228}Ra , and on the time since the precipitation.

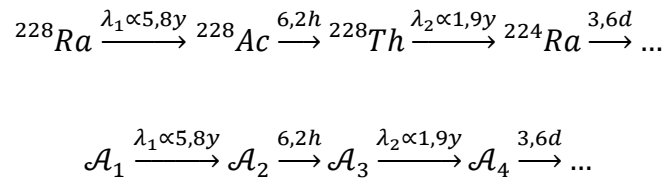
As a consequence, for any given scale sample, it is possible to evaluate its age, as well as the original activity of ^{228}Ra , provided that activity measurements of ^{228}Ra and ^{224}Ra are available.

Remark: It is not possible to do the same thing with the ^{238}U decay chain, because, we only have meaningful measurements for ^{226}Ra and ^{214}Pb , and the decay chain between those two elements contains the gas radon, which has a high probability of being re-

leased from the scale during the decay process, because of the gaseous nature of radon, and of its very low chemical reactivity.

Determination of the activities

The decay chain between ^{228}Ra and ^{224}Ra is as follows:



Given that the half-lives of ^{224}Ra and ^{228}Ac are very short compared to the ones of the previous isotopes of the chain, they can be considered in radioactive equilibrium with them. As a consequence, their activity is equal to the one of the aforementioned previous nuclides, and, it is only necessary to calculate two activities.

$$\frac{d\mathcal{A}_1}{dt} = -\lambda_1 \mathcal{A}_1$$

$$\mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_1$$

$$\frac{d\mathcal{A}_3}{dt} = \lambda_3(\mathcal{A}_1 - \mathcal{A}_3)$$

$$\mathcal{A}_4 = \mathcal{A}_3$$

If we suppose that the initial supply of ^{228}Ra is \mathcal{A}_1^0 , and that there is no ^{228}Th at first (which is true), we get the following analytical solution.

$$\mathcal{A}_1(t) = \mathcal{A}_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t}$$

$$\mathcal{A}_4(t) = \mathcal{A}_1^0 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t})$$

Determination of the age and initial ^{228}Ra activity

To get the age of the scale sample and its initial activity, the following system must be solved (the unknowns being t and \mathcal{A}_1^0):

$$\begin{cases} \mathcal{A}_1 = \mathcal{A}_1^0 \cdot e^{-\lambda_1 t} \\ \mathcal{A}_4 = \mathcal{A}_1^0 \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot (e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t}) \end{cases}$$

For the sake of simplification, we will define the following value:

$$Q_1 = \frac{\mathcal{A}_4}{\mathcal{A}_1} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_2}$$

After solving the system, we get:

$$t = \frac{\ln(Q_1 + 1)}{\lambda_1 - \lambda_2}$$

$$\mathcal{A}_1^0 = \mathcal{A}_1 e^{\lambda_1 t} = \mathcal{A}_1 e^{\frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \ln(Q_1 + 1)}$$

Determination of the initial ^{226}Ra activity

Once the age of the scale is known, the initial concentration of ^{226}Ra is very easy to calculate, since its parent nuclides are not present in the brine in sufficient quantities for their activities to be measured. Indeed, ^{230}Th (parent nuclide through an α disintegration) has a 75,000 years half-life, and its contribution to the changes of ^{226}Ra is negligible.

As a consequence, ^{226}Ra follows the normal decay law (\mathcal{A}^0 being the initial activity, λ the radioactive constant):

$$\mathcal{A}(t) = \mathcal{A}^0 \cdot e^{-\lambda t}$$

As a consequence, the initial activity is:

$$\mathcal{A}^0 = \frac{e^{-\lambda t}}{\mathcal{A}(t)}$$

Finally, the initial activity of ^{224}Ra can be considered equal to the activity of ^{228}Ra , because the fluid comes from a media in radioactive equilibrium. Since the half-life of ^{224}Ra is very short compared to the half-life of ^{228}Ra , the initial contribution of ^{224}Ra to the radium concentration in the scales can be considered negligible.

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de