

# Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager

Bericht zum Arbeitspaket 11

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Erstellt von:

**DBE**TEC  
DBE TECHNOLOGY GmbH

GRS

nse  
international

The logo for nse international, featuring the letters 'nse' in a bold, lowercase font, with 'international' in a smaller font below it. To the right of the text is a stylized graphic element consisting of two curved lines forming a shape similar to a DNA double helix or a stylized 'D'.



## **Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager**

Bericht zum Arbeitspaket 11

Vorläufige Sicherheitsanalyse  
für den Standort Gorleben

Thomas Beuth (GRS)  
Bruno Baltes  
Wilhelm Bollingerfehr (DBETEC)  
Dieter Buhmann (GRS)  
Frank Charlier (nse)  
Wolfgang Filbert (DBETEC)  
Klaus Fischer-Appelt (GRS)  
Jörg Mönig (GRS)  
Andre Rübel (GRS)  
Jens Wolf (GRS)

Juni 2012

Änderung der Vorbemerkung  
Dezember 2012

### **Anmerkung:**

Das FuE-Vorhaben UM10A03200 „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Auftragnehmer. Die hierin geäußerten Meinungen müssen nicht der Meinung des Auftraggebers entsprechen.

## **Vorbemerkung – veränderte Zielsetzungen des Projekts VSG (Stand: Dezember 2012)**

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Sie übernimmt die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des vom Bundesministerium geförderten Projektes und bearbeitet selbst den Hauptteil der Arbeitspakete.

### **Ursprüngliche Zielsetzung**

In seiner ursprünglichen Konzeption wurden mit dem Projekt VSG im Wesentlichen drei Ziele verfolgt. Das erste Ziel bestand in der Erarbeitung einer systematischen Zusammenfassung des Kenntnissstands zu Gorleben. Darauf aufbauend sollte als zweites Ziel eine vorläufige Eignungsprognose erarbeitet werden. Diese Prognose sollte die Frage beantworten, ob und ggf. unter welchen Voraussetzungen am Standort Gorleben ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle betrieben werden könnte. Die Vorläufigkeit einer solchen Prognose ergibt sich dabei unter anderem zwangsläufig aus dem Umstand, dass eine endgültige Eignungsaussage nur nach einer vollständigen untertägigen Erkundung möglich ist, die in Gorleben nicht gegeben ist. Die dritte Zielsetzung der VSG bestand schließlich in der Identifizierung des noch bestehenden Bedarfs an Forschung und Entwicklung, also der standortspezifischen und standortunabhängigen Fragestellungen, die noch geklärt werden müssen.

### **Aktualisierte Zielsetzung**

Nach Beginn des Projekts wurde im politischen Raum ein breiter Konsens darüber erzielt, dass der Standort eines zukünftigen Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle durch einen Vergleich verschiedener Standorte im Rahmen eines mehrstufigen Auswahlverfahrens gefunden werden soll. Aus dieser grundsätzlichen Entscheidung ergibt sich, dass die Frage der Eignung eines Standorts zukünftig nur noch im Vergleich mit anderen beantwortet werden kann. „Geeignet“ in diesem Sinn wird damit der Standort sein, der verschiedene grundsätzliche und vergleichsspezifische Kriterien erfüllt und sich damit als der im Hinblick auf die Sicherheit vergleichsweise beste Standort darstellt. Da diese Kriterien heute noch nicht feststehen, kann eine vorläufige Prognose einer so verstandenen Eignung für den Standort Gorleben im Rahmen der VSG nicht erarbeitet werden.

Vor diesem Hintergrund hat die GRS im Einvernehmen mit dem Bundesumweltministerium (BMU) als dem Zuwendungsgeber der VSG die Projektziele den veränderten Rahmenbedingungen angepasst. Danach bleiben die systematische Zusammenfassung des bisherigen Kenntnisstands zu Gorleben und die Identifizierung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs weiterhin Ziele der VSG. Die Änderungen betreffen die nachfolgenden Punkte:

- Die ursprünglich angestrebte vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben wird nicht erarbeitet. Es wird geprüft, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder einem hinsichtlich der geologischen Situation vergleichbaren Salzstandort aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU zu erfüllen.
- Ergänzt werden die bisherigen Projektziele um eine Untersuchung der Frage, welche methodischen Ansätze der VSG in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren sinnvoll zum Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung des zukünftigen Standortauswahlverfahrens ist bereits heute absehbar, dass es im Verlauf eines solchen Verfahrens immer wieder erforderlich sein wird, den bis zu einem bestimmten Verfahrensschritt erreichten Wissensstand zu den einzelnen Standorten systematisch zusammenzufassen und zu bewerten.

- Außerdem soll über die ursprünglichen Zielsetzungen hinaus untersucht werden, welche der in der VSG entwickelten technischen Konzepte zur Einlagerung der radioaktiven Abfälle und zum Verschluss des Endlagerbergwerks übertragbar auf Endlagersysteme an Standorten mit anderen geologischen Gegebenheiten sind.

### **Aktualisierte Projektplanung**

Durch den Ausstiegsbeschluss vom Mai 2011 hat sich die Prognose der zu erwartenden Gesamtmenge an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen gegenüber jener, die zu Beginn des Projekts im Sommer 2010 anzunehmen war, erheblich verändert. Dies führte dazu, dass ein wesentlicher Teil der bis Mai 2011 durchgeführten Konzeptentwicklungen und Modellrechnungen mit den neuen Daten erneut durchgeführt und teilweise bereits fertiggestellte Teilberichte entsprechend durch aktualisierte Fassungen ergänzt werden mussten. Dieser zusätzliche Aufwand und die oben erwähnten Ergänzungen in der Zielsetzung der VSG führen dazu, dass das Projekt nicht – wie ursprünglich vorgesehen – Ende 2012 sondern Ende März 2013 abgeschlossen werden kann.

### **Projektpartner**

Da für die Bearbeitung der VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig ist, sind neben der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Dazu zählen: Dr. Bruno Baltes, die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die DBE TECHNOLOGY GmbH (DBE TEC), das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC), das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal (TUC), das Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), das Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec), das Karlsruher Institut für Technologie/Institut für Nukleare Entsorgung (KIT/INE), die international nuclear safety engineering GmbH (nse; mehrere Institute der RWTH Aachen) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt.

### **Arbeitspakete**

Die Übersicht der Arbeitspakete (AP) der vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) umfasst:

- AP 1: Projektkoordination
- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und Mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept
- AP 5: Endlagerkonzept
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Analyse Freisetzungsszenarien
- AP 11: Bewertung Human Intrusion
- AP 12: Bewertung der Betriebssicherheit
- AP 13: Bewertung der Ergebnisse
- AP 14: Empfehlungen

**Deskriptoren:**

Aktivitäten, Endlager, Erkundungsbohrung, Fallunterscheidung, Human Intrusion, Kaverne, Menschliches Eindringen, Optimierung, Salzbergwerk

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Begriffsbestimmungen und regulatorische Vorgaben.....	3
2.2	Vorgehensweise .....	7
<b>3</b>	<b>Zukünftige menschliche Aktivitäten.....</b>	<b>13</b>
3.1	Menschliche Aktivitäten und Praktiken in der Endlagerregion .....	13
3.2	Regulatorische Grundlagen .....	14
3.3	Abteufen einer Bohrung.....	15
3.3.1	Allgemeines .....	18
3.3.2	Prospektion und Planung.....	20
3.3.3	Betrieb .....	21
3.3.4	Stilllegung.....	25
3.4	Anlegen einer Kaverne .....	29
3.4.1	Allgemeines .....	29
3.4.2	Prospektion.....	31
3.4.3	Planung und Konstruktion.....	32
3.4.4	Betrieb .....	34
3.4.5	Stilllegung/Endverwahrung .....	37
3.5	Auffahrung eines Bergwerkes.....	38
3.5.1	Allgemeines .....	38
3.5.2	Prospektion.....	39
3.5.3	Planung und Konstruktion.....	40

3.5.4	Betrieb .....	41
3.5.5	Stilllegung .....	42
<b>4</b>	<b>Identifizierung von Szenarien menschlichen Eindringens in das Endlager .....</b>	<b>43</b>
4.1	Erkundungsbohrung .....	45
4.1.1	Detektion eines Endlagers durch übertägige Untersuchungen.....	45
4.1.2	Detektion eines Endlagers beim Abteufen einer Bohrung .....	46
4.1.3	Ableitung eines stilisierten Szenariums zur Basisaktivität „Abteufen einer Bohrung“ .....	50
4.2	Kaverne .....	51
4.2.1	Detektion eines Endlagers durch übertägige Untersuchungen.....	52
4.2.2	Detektion eines Endlagers während der Errichtung und des Betriebs einer Kaverne .....	52
4.2.3	Ableitung eines stilisierten Szenariums zur Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ .....	56
4.3	Bergwerk .....	57
4.3.1	Detektion eines Endlagers durch übertägige Untersuchungen.....	58
4.3.2	Detektion eines Endlagers bei Auffahrung und Betrieb eines Bergwerks.....	58
4.3.3	Ableitung eines stilisierten Szenariums zur Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerks“ .....	63
<b>5</b>	<b>Optimierungsmaßnahmen.....</b>	<b>65</b>
5.1	Zusammenstellung möglicher Optimierungsmaßnahmen .....	66
5.2	Identifizierung von Optimierungsmaßnahmen für die stilisierten Szenarien .....	72
5.2.1	Erkundungsbohrung .....	72
5.2.2	Kaverne .....	73

5.2.3	Bergwerk .....	75
5.3	Bewertung der identifizierten Optimierungsmaßnahmen.....	78
5.3.1	Erkundungsbohrung .....	78
5.3.2	Kavernenerstellung.....	81
5.3.3	Bergwerkserrichtung.....	85
5.4	Quantitative Analyse der identifizierten Optimierungsmaßnahmen .....	88
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>91</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>95</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>101</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>103</b>
<b>A</b>	<b>Anhang A: Gesprächsnotizen.....</b>	<b>105</b>
A.1	Gesprächsnotiz vom 22.11.2004 bei der Fa. ITAG in Celle.....	105
A.2	Gesprächsnotiz vom 15.02.2011 bei der Fa. K+S AG in Kassel .....	110
A.3	Gesprächsnotiz vom 16.02.2011 bei der Fa. KBB Underground Technologies GmbH in Hannover .....	117
<b>B</b>	<b>Anhang B: Zusammenstellung möglicher Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf ein menschliches Eindringen in ein Endlager .....</b>	<b>123</b>



# 1 Einleitung

Mit der Frage der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems ist untrennbar die intensive fachliche Auseinandersetzung mit zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Standortes und des Endlagersystems z. B. durch klimatische, geologische, abfall- und endlagerinduzierte Abläufe verbunden. Dabei sind vor allem solche Entwicklungsmöglichkeiten zu betrachten, die das Potenzial aufweisen, den angestrebten, möglichst weitgehenden, sofortigen und dauerhaften Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem ausgewiesenen Bereich um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Salzgestein, der als einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) bezeichnet wird, zu beeinträchtigen.

Aus diesem Grund wird auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder entworfen. Dies geschieht mit Hilfe einer Szenarienentwicklung. Das Ziel ist die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von möglichen Szenarien zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit eines Endlagers nach dessen Stilllegung relevant sind. Szenarien stellen denkbare zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems dar. Sie können auch nur für einen bestimmten Zeitbereich in der Zukunft plausibel sein und nur einen Teil des Endlagersystems betreffen. Die Gesamtheit der in der Szenarienentwicklung abgeleiteten Szenarien soll die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems abdecken /BEU 12/.

Eine Sonderstellung bei der Szenarienentwicklung nehmen mögliche Entwicklungen durch zukünftige menschliche Aktivitäten am Standort ein. Im Hinblick auf die Entwicklung eines Endlagersystems sind dabei insbesondere solche Handlungen wie das menschliche Eindringen in den ewG zu berücksichtigen, die das Potenzial haben, den Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gefährden. Dazu hat der Arbeitskreis „Szenarienentwicklung“ das Positionspapier „Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ veröffentlicht /BEU 08/.

Die regulatorischen Rahmenbedingungen hinsichtlich menschlicher Einwirkungen auf ein Endlagersystem sind in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ verankert und bilden die Arbeitsgrundlage für die durchgeführten Untersuchungen.

Der vorliegende Bericht setzt sich mit der Thematik „Zukünftige menschliche Aktivitäten in der Nachverschlussphase eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle“ auseinander. Hierin werden die Grundlagen zur Bearbeitung und Behandlung der Thematik im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) dargelegt (Kapitel 2), die für ein Endlager aus heutiger Sicht relevanten menschlichen Aktivitäten aufgezeigt und beschrieben (Kapitel 3), die im Sinne der genannten Zielsetzung einzubeziehenden Szenarien auf der Basis menschlicher Aktivitäten festgelegt und untersucht (Kapitel 4) und Möglichkeiten und Grenzen von Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt und bewertet (Kapitel 5).

## **2 Grundlagen**

### **2.1 Begriffsbestimmungen und regulatorische Vorgaben**

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ fordern die Berücksichtigung zukünftiger menschlicher Aktivitäten. Die Betrachtung zukünftiger menschlicher Aktivitäten erfordert aufgrund des enormen Spektrums an möglichen menschlichen Handlungen, das sich einer wissenschaftlichen Prognose entzieht, eine Einengung auf im Sicherheitsnachweis zu behandelnde Aktivitäten durch vorab festgelegte Annahmen. Hierbei sind die entsprechenden Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/, insbesondere im Absatz 5.2, zu beachten:

*„Die Optimierung des Endlagers mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist nachrangig zu den oben aufgeführten Optimierungszielen durchzuführen. Da zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können, sind Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, denen derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde liegen, zu analysieren. Im Rahmen dieser Optimierung ist auf eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung hinzuwirken.“*

Zum besseren Verständnis und zur Einordnung der Ausführungen dieses Berichtes werden nachfolgend wesentliche Begriffe und ihre Definitionen bzw. Begriffsbestimmungen genannt und erläutert. Hierbei wird auch auf Definitionen und Begriffsbestimmungen zurückgegriffen, die aus /BEU 08/ stammen.

#### **Zukünftige menschliche Aktivitäten**

Im Hinblick auf die Auswirkungen zukünftiger menschlicher Handlungen auf das Barrierensystem des Endlagers wird unterschieden zwischen Aktivitäten, welche die Standortsituation und damit möglicherweise die Barrierenwirksamkeit verändern und solchen Aktivitäten, die das Barrierensystem des ewG zerstören oder direkt umgehen.

Zur erstgenannten Gruppe von Aktivitäten, die eine Veränderung der Barrierenwirksamkeit oder der Standortsituation bewirkt, gehören beispielsweise der Bau einer Tal Sperre, die Erstellung eines Tunnels oder die Errichtung einer Grundwassergewin-

nungsanlage. Die Konsequenz solcher Aktivitäten für das Einschlussvermögen des Endlagersystems wird aufgrund ihrer auf die oberflächennahen Bereiche beschränkten Wirkung als äußerst gering eingeschätzt. Solche Aktivitäten können oftmals mit den Einflüssen und Auswirkungen aus natürlichen Entwicklungen, die an der Erdoberfläche bzw. oberflächennah ablaufen, verglichen werden.

Die Aktivitäten, die sich auf die Zerstörung oder direkte Umgehung des Barrierensystems des Endlagers beziehen, werden als menschliches Eindringen („Human Intrusion“) verstanden. Beispiele für derartige Aktivitäten sind Tiefbohrungen, Solungen im Salinar oder die Errichtung von Gewinnungsbergwerken in unmittelbarer Nachbarschaft zum Endlager. In der weiteren Betrachtung liegt der Fokus gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ ausschließlich auf Aktivitäten, die sich auf das menschliche Eindringen beziehen.

### **Menschliches Eindringen (Human Intrusion)**

Unter „menschlichem Eindringen“ („Human Intrusion“ HI) werden alle menschlichen Aktivitäten nach Verschluss des Endlagerbergwerks verstanden, die die Barrieren innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes und/oder den ewG unmittelbar schädigen. Es wird unterschieden nach Handlungen, die im Wissen um das Endlager und sein Gefährdungspotenzial erfolgen und solchen, die unbeabsichtigt nach Verlust dieses Wissens durchgeführt werden.

### **Bewusstes menschliches Eindringen**

Ein bewusstes menschliches Eindringen ist dadurch gekennzeichnet, dass die Gesellschaft Kenntnis über das Endlager und sein Gefahrenpotenzial besitzt. International besteht breiter Konsens darüber /EUR 11/, dass die Konsequenzen aus den wissentlich durchgeführten Aktivitäten in die Verantwortung der handelnden Gesellschaft gestellt werden. Deshalb müssen zukünftige Generationen vor eigenen Entscheidungen, die im Bewusstsein möglicher Konsequenzen ihres Handelns getroffen wurden, nicht geschützt werden.

### **Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen**

Ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen ist dadurch gekennzeichnet, dass die Kenntnis über das Endlager und das Wissen um das Gefahrenpotenzial der eingelagerten Abfälle verloren gegangen sind.

## **Prognostizierbarkeit**

In Absatz 5.2 der Sicherheitsanforderungen wird ausgeführt, dass zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können (s. Seite 3). Es besteht international Konsens, dass es keine wissenschaftliche Grundlage für eine belastbare Prognose der menschlichen Gesellschaft, ihrer Handlungsweisen und ihrer technologischen Fähigkeiten über einen Zeitraum hinaus gibt, der mehr als ein paar Generationen umfasst /EUR 11/. Die langfristige Entwicklung der menschlichen Gesellschaft entzieht sich einer wissenschaftlich systematischen Behandlung.

Zum Umgang mit diesen Ungewissheiten werden daher, in Übereinstimmung mit /BMU 10/ sowie der Vorgehensweise in anderen Ländern, im Vorhaben VSG Verhaltensweisen der Gesellschaft und der Stand von Wissenschaft und Technik (WuT) entsprechend der heutigen und hiesigen Situation unterstellt und als stilisierte HI-Szenarien den Bewertungen zu Grunde gelegt.<sup>1</sup>

Nach dem Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 11/ spielen stilisierte Szenarien generell eine wichtige Rolle beim Umgang mit Ungewissheiten, die Entwicklungen betreffen, die kaum oder gar nicht zu prognostizieren sind. Solche Ungewissheiten können nicht im Rahmen einer systematischen Szenarientwicklung behandelt werden. Durch den Einsatz stilisierter Szenarien wird auf nachvollziehbare Weise festgelegt, wie mit diesen Ungewissheiten umgegangen wird.

## **HI-Szenarien**

Entwicklungen des Endlagersystems in Bezug auf ein menschliches Eindringen können aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Basis nicht systematisch im Rahmen einer Szenarientwicklung abgeleitet werden. Daher sind HI-Szenarien (s. o.) auf der Grundlage regulatorischer Vorgaben, wie z. B. hinsichtlich der Berücksichtigung heutiger gesellschaftlicher Bedingungen und des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik, festzulegen. Die HI-Szenarien haben sich an konkreten Endlagerkonzepten und Standortgegebenheiten auszurichten.

---

<sup>1</sup> In /BMU 10/ wird der Begriff Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen verwendet. Im Vorhaben VSG wird stattdessen durchgehend der Begriff HI-Szenarien verwendet, um eine Verwechslung mit den Referenzszenarien, die im Vorhaben VSG im Rahmen der systematischen Szenarientwicklung abgeleitet worden sind /BEU 12/, zu vermeiden.

## **Derzeit übliche menschliche Aktivitäten**

Gemäß Absatz 5.2 der Sicherheitsanforderungen sind nur derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde zu legen. Dies bedeutet, dass bei der Betrachtung menschlicher Aktivitäten heutige und hiesige Praktiken und Techniken zu berücksichtigen sind. Mit dieser Forderung soll vor allem möglichen Spekulationen über zukünftige Fähigkeiten und technische Möglichkeiten Einhalt geboten werden. Außerdem ist die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen hinsichtlich spekulativer bzw. nicht realer technischer Anwendungen wenig sinnföällig.

## **Primäre Optimierungsziele**

Die Sicherheitsanforderungen sehen es als eine iterative Aufgabe an, die Endlagerkonzeption und die Endlagerauslegung schrittweise unter Abwägung von vorgegebenen Optimierungszielen zu entwickeln. In den Sicherheitsanforderungen sind dabei folgende Optimierungsziele, die hier zur Abgrenzung zu den allgemeinen Optimierungszielen mit dem Attribut „primäre“ Optimierungsziele bezeichnet werden, genannt /BMU 10/:

- Strahlenschutz für Betriebsphase
- Langzeitsicherheit
- Betriebssicherheit des Endlagers
- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle
- Sicherheitsmanagement
- technische sowie finanzielle Realisierbarkeit

Die Optimierung des Endlagers gegen sich nachteilig auf die Sicherheit auswirkende zukünftige menschliche Aktivitäten ist nachrangig zu diesen primären Optimierungszielen durchzuführen. Die Sicherheitsanforderungen gehen inhaltlich auf die Bedeutung der Nachrangigkeit nicht näher ein, so dass die weitere Vorgehensweise durch folgende Interpretation konkretisiert wird:

Optimierungsmaßnahmen im Hinblick auf die Isolation der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre unter Berücksichtigung zukünftiger menschlicher Aktivitäten dürfen nicht in einem Zielkonflikt zu den o. g. primären Optimierungszielen stehen. So ist beispiels-

weise zu prüfen, ob die vorgesehenen Maßnahmen hinsichtlich menschlicher Aktivitäten Prozesse initiieren oder begünstigen oder Umstände hervorrufen können, die sich nachteilig auf die Langzeitsicherheit auswirken. Ggf. muss dann die betreffende Maßnahme modifiziert oder ganz auf sie verzichtet werden.

### **Allgemeine HI-Optimierungsziele**

Abschließend erfolgt in Absatz 5.2 der Sicherheitsanforderungen die Angabe von anzustrebenden Optimierungszielen als Ergebnis der Untersuchung von HI-Szenarien. Es werden zwei allgemeine Ziele formuliert, die sich auf die Reduzierung

- der Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens und
- der radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung

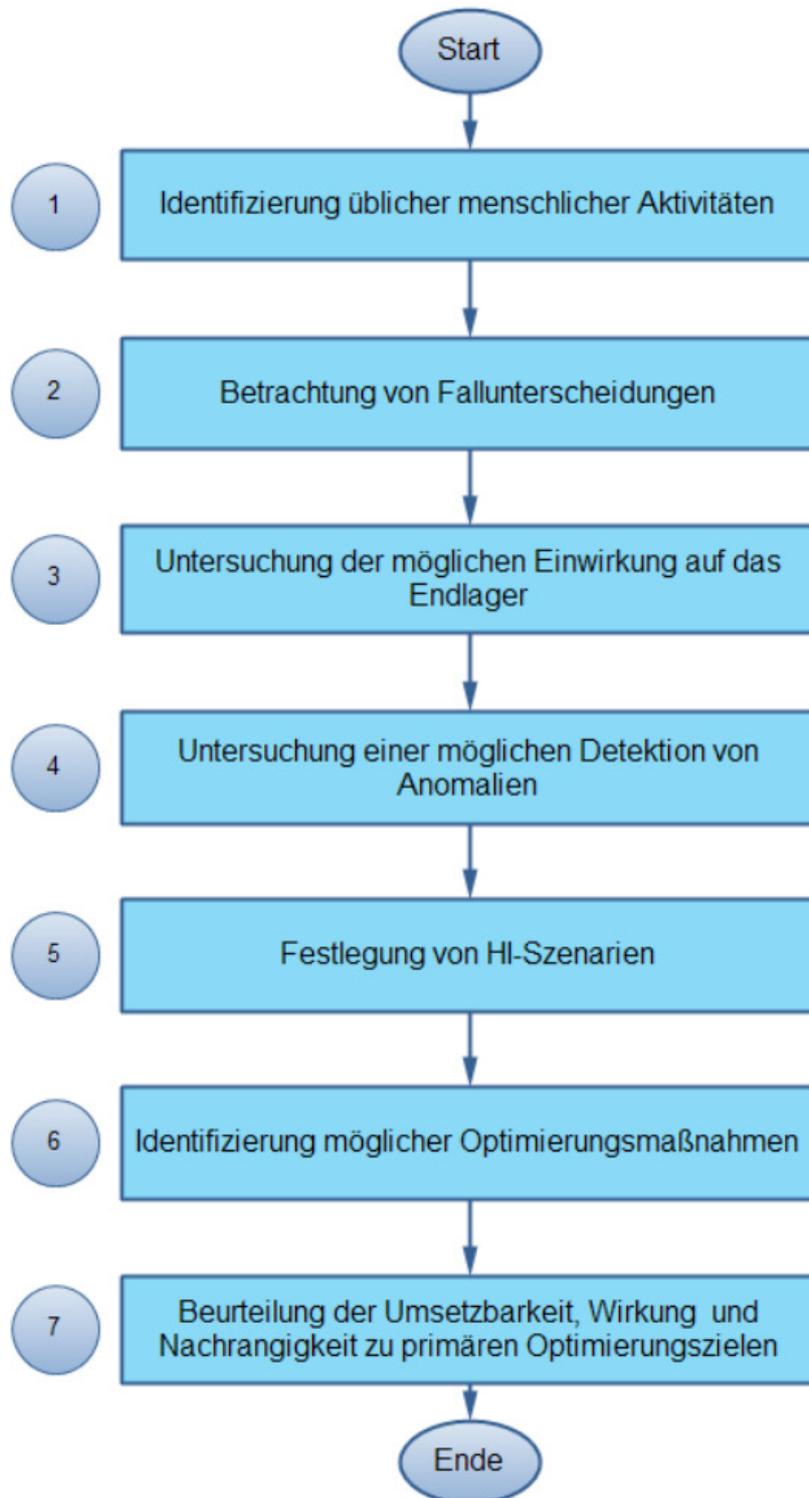
beziehen.

## **2.2 Vorgehensweise**

Aufgrund der o. g. Vorgaben wurde für die Untersuchungen zum unbeabsichtigten menschlichen Eindringen in ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle die folgende Vorgehensweise verfolgt (s. Abb. 2.1):

- (1) In einem ersten Arbeitsschritt wurden nach heutiger und hiesiger Praxis in der Standortregion menschliche Aktivitäten identifiziert, die in Bezug auf die damit verbundene Technik bzw. Handlungsabläufe und hinsichtlich der geplanten Endlagertiefe das Potenzial für ein Eindringen in das Endlager aufweisen.

Für die Zielsetzung der Ableitung von Optimierungsmaßnahmen im Zusammenhang mit zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist es essenziell, die derzeit üblichen menschlichen Aktivitäten in Bezug auf deren praktische Durchführung und Anwendung genau und umfassend zu kennen. Hierzu wurden Informationen und Fakten zusammengetragen und bei Bedarf Gespräche mit entsprechenden Fachleuten zur Klärung offener Punkte geführt.



**Abb. 2.1** Darstellung der durchgeführten Arbeitsschritte hinsichtlich der Untersuchung menschlicher Aktivitäten

(2) Nach Vorliegen der notwendigen Informationen und Kenntnisse zu derzeit üblichen menschlichen Aktivitäten aus 1) wurden mögliche Fallunterscheidungen betrachtet.

Die Fallunterscheidungen beziehen sich auf unterschiedliche Ansatzpunkte für z. B. vertikale Bohrungen, die somit unterschiedliche Bereiche des Endlagersystems betreffen können.

- (3) Unter Einbeziehung der in (2) aufgestellten Fallunterscheidungen wurden die daraus möglicherweise resultierenden Einwirkungen auf das Endlager diskutiert.
- (4) Dieser Schritt beinhaltet unter Einbeziehung der Fallunterscheidungen die Untersuchung, inwieweit auf der Basis der Handlungsabläufe der menschlichen Aktivität die Möglichkeit einer Wahrnehmung oder Detektion von vorliegenden Auffälligkeiten bzw. Anomalien – verursacht durch das Endlager und die eingelagerten radioaktiven Abfälle – besteht. Hierbei ist die zeitliche Entwicklung des Endlagers einzubeziehen.
- (5) Aus den Fällen, die sicherheitsrelevante Implikationen für das Endlager nach sich ziehen können, und aus der fallbezogenen Diskussion einer möglichen Wahrnehmung von endlager- und abfallinduzierten Auffälligkeiten wurden die HI-Szenarien für die weitere Untersuchung festgelegt.
- (6) In diesem Schritt wurden für die festgelegten HI-Szenarien mögliche Optimierungsmaßnahmen identifiziert, die insbesondere auf die geforderten Optimierungsziele der Reduzierung der Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens und der radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung abstellen.
- (7) Die aus dem vorangegangenen Schritt identifizierten möglichen Optimierungsmaßnahmen wurden abschließend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und möglicher Konflikte mit primären Optimierungszielen diskutiert. Besteht die Möglichkeit einer quantitativen Beurteilung des HI-Szenariums vor und nach der Berücksichtigung von Gegenmaßnahmen, ist der entsprechende Fall zu modellieren und zu analysieren.

Für die Durchführung der Arbeiten werden folgende Festlegungen getroffen:

- (a) HI-Szenarien und die daraus resultierenden Folgen sind nicht in Verbindung mit weniger wahrscheinlichen Alternativszenarien aus der systematischen Szenarientwicklung zu diskutieren bzw. zu kombinieren.
- (b) Es wird nur der Nordostflügel des Endlagers mit den wärmeentwickelnden Abfällen betrachtet.

- (c) HI-Szenarien sind unter Einbeziehung der Variante B1 (Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in selbstabschirmenden Endlagerbehältern in horizontalen Strecken) zu betrachten. Darüber hinaus soll im Sinne einer Differenzbetrachtung die Variante C (Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs)) einbezogen werden /BOL 11/, /BOL 12/.
- (d) Frühestens 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers sind unbeabsichtigte menschliche Aktivitäten am Standort zu unterstellen.
- (e) Konsequenzen in Folge eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in ein Endlager sind nicht an radiologischen Grenzwerten zu messen.

**Zu (a)** Da die HI-Szenarien aufgrund der fehlenden wissenschaftlichen Basis nicht systematisch im Rahmen einer Szenarienentwicklung abgeleitet werden können, ist es nicht zielführend, sie mit Szenarien aus der Szenarienentwicklung /BEU 12/ zu kombinieren, um daraus mögliche Optimierungsmaßnahmen abzuleiten. Aufgrund ihrer eigenen Natur müssen daher die stilisierten HI-Szenarien getrennt von den alternativen Entwicklungen, die durch die Szenarienentwicklung identifiziert wurden, behandelt werden. Die HI-Szenarien richten sich nach den Endlagerkonzepten und natürlichen Gegebenheiten am Standort Gorleben. Bei einer quantitativen Analyse von HI-Szenarien wird von einer wahrscheinlichen Entwicklung des Standortes und des Endlagersystems ausgegangen.

**Zu (b)** Die Sicherheitsanforderungen sind für wärmeentwickelnde Abfälle anzuwenden. Eine Optimierung des Endlagers gegen zukünftige menschliche Aktivitäten ist für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Südwestflügel des Endlagers nicht notwendig, wäre für eine umfassende Betrachtung aber wünschenswert. Da allerdings eine plausible Quantifizierung dieses Abfallstroms mit heutigem Kenntnisstand kaum möglich ist, sind auch Einlagerungskonzept und Konsequenzen (z. B. Gasbildung) äußerst spekulativ. Eine Diskussion von Optimierungsmaßnahmen gegen Human Intrusion wird daher aufgrund des gegenwärtigen Kenntnisstandes in Bezug auf Menge und Zusammensetzung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle zurückgestellt.

**Zu (c)** Neben der Kombination der Varianten A und B1 werden noch die Varianten C und B2 (Einlagerung aller wärmeentwickelnden Abfälle in Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern) betrachtet /BOL 12/. Bei der Variante A ist darauf

hinzuweisen, dass es sich bei diesem Konzept um eine Option handelt und eine Optimierung, aufgrund des vorliegenden unzureichenden Informations- und Kenntnisstandes der entsprechenden Abfälle (Art, Inhalt, Menge) und damit der relativ groben Ausgestaltung der Gebinde und Einlagerungsbereiche zu diesem Zeitpunkt, nur orientierenden Charakter haben kann. Die Variante A wird gemäß b) nicht betrachtet. Die Berücksichtigung der Variante B2 stellt durch die Zugrundelegung unterschiedlicher Transport- und Lagerbehälter nur eine geringe Abweichung zur Variante B1 dar, die sich auf die Optimierung hinsichtlich Human Intrusion nicht bzw. nur unbedeutend auswirken wird. Aus den genannten Gründen werden hier nur die Varianten B1 sowie C betrachtet.

**Zu (d)** Für den zeitlichen Rahmen von zukünftigen menschlichen Aktivitäten wird davon ausgegangen, dass für die Phase direkt nach dem Verschluss des Endlagers am Standort keine unbeabsichtigten menschlichen Handlungen, die zu einer Schädigung der Barrieren führen, zu betrachten sind. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Kenntnis um den Standort und das davon ausgehende Gefährdungspotenzial nicht instantan verloren geht und darüber hinaus gemäß den Sicherheitsanforderungen (/BMU 10/, Absatz 9.7 und 10.2) Maßnahmen zu ergreifen sind, die einen langfristigen Wissenserhalt ermöglichen sollen. Dieser langfristige Wissenserhalt ist jedoch aufgrund der fehlenden Prognostizierbarkeit des menschlichen Handelns befristet. Analog den Empfehlungen des Arbeitskreises „Szenarientwicklung“ /BEU 08/ wird für den Wissenserhalt ein Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers zugrunde gelegt. Innerhalb dieses festgelegten Zeitraums sind keine unbeabsichtigten menschlichen Aktivitäten am Standort zu berücksichtigen. Der genannte Zeitraum orientiert sich an der Zeitspanne aktiv betriebener Dokumentationen, z. B. aus deutschen Bergbauarchiven, die heute noch betrieben und genutzt werden.

**Zu (e)** Hinsichtlich des Umgangs mit möglichen Konsequenzen ist der Arbeitskreis „Szenarientwicklung“ /BEU 08/ der Auffassung, dass mit der Entscheidung für das Konzept des Konzentrierens und Isolierens der radioaktiven Abfälle in einem Endlager zwangsläufig die Möglichkeit akzeptiert werden muss, dass im Falle eines Eindringens in das Endlager die handelnden Personen hohe radiologische Belastungen erleiden können. Zudem können die mit menschlichem Eindringen verbundenen Konsequenzen aufgrund der fehlenden Prognostizierbarkeit der zu treffenden Annahmen und Randbedingungen nicht sinnvoll quantifiziert werden. Aus diesen Gründen sieht es der Ar-

beitskreis als nicht sinnvoll an, Konsequenzen für die eindringende Person bzw. Personengruppe an radiologischen Grenzwerten zu messen.

Diese Auffassung deckt sich mit den Sicherheitsanforderungen dahingehend, dass nach Absatz 6.5 /BMU 10/ für Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt ist.

### **3 Zukünftige menschliche Aktivitäten**

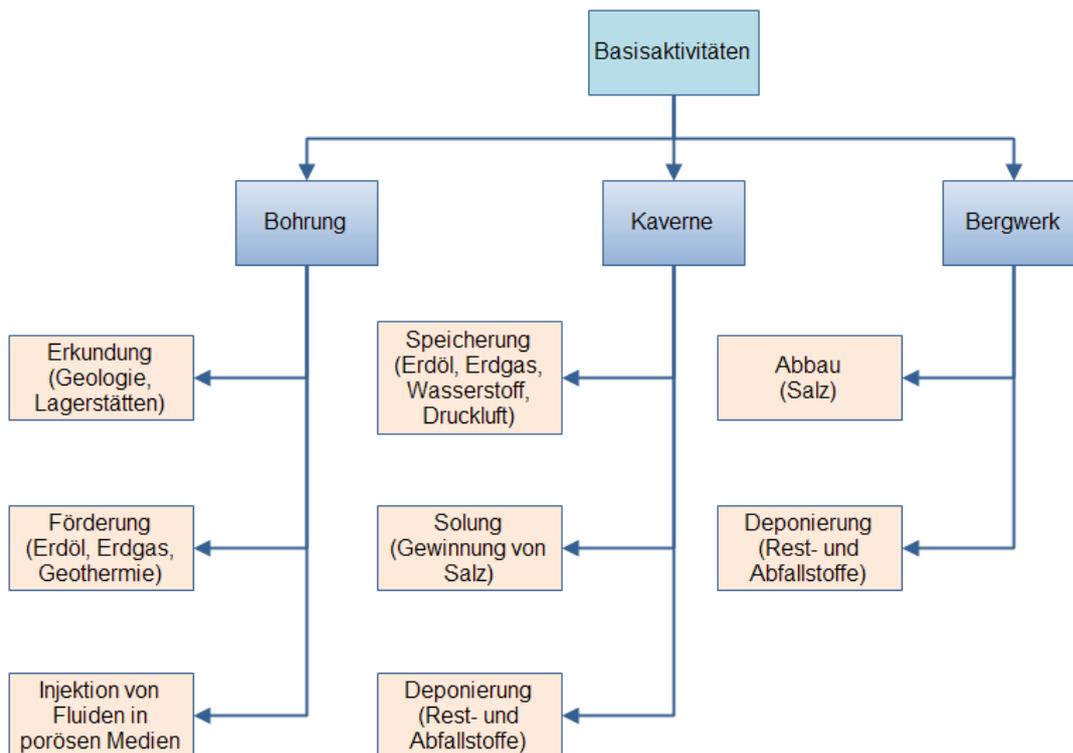
Die zukünftigen menschlichen Aktivitäten lassen sich unterscheiden nach Aktivitäten, die eine lokale bzw. eine regionale oder eine globale Veränderung bewirken. Menschliche Aktivitäten, die einen überregionalen Ursprung haben bzw. sich global auswirken, z. B. anthropogen bedingte Treibhausgasemissionen, und dann indirekt über Folgeprozesse und resultierende Mechanismen einen Einfluss auf das Endlagersystem ausüben (z. B. die mit einer Transgression verbundene Überflutung des Standortes), werden im Rahmen des vorliegenden Berichts nicht berücksichtigt. Derartige Aktivitäten werden in der Szenarientwicklung (/BEU 12/) zwar nicht direkt behandelt, jedoch erfolgt implizit eine Berücksichtigung über die Einbeziehung des Prozesses „Globale klimatische Veränderungen“ in der Szenarientwicklung. Im Weiteren werden daher nur diejenigen Aktivitäten berücksichtigt, die lokal bzw. regional ausgerichtet sind.

#### **3.1 Menschliche Aktivitäten und Praktiken in der Endlagerregion**

Ein Rückblick in die Vergangenheit belegt, dass menschliche Aktivitäten am Standort sowie in der näheren Umgebung und der Region stattgefunden haben, die auch den tieferen Untergrund betrafen.

Aufzeichnungen aus dem Bohrkataster /LBG 11a/ (Geodatenzentrum Hannover: Nibis Kartenserver) bestätigen, dass in der Vergangenheit eine Vielzahl von Bohrungen in der Standortregion niedergebracht worden sind. Die Bohrungen dienten z. B. zur Erdöl- und Erdgasexploration, zur Erkundung der hydrogeologischen, geologischen und geothermischen Situation. Die Bohrtiefen lagen dabei in einer Bandbreite von wenigen Metern bis mehreren 100 m.

Neben den Bohrungen sind weitere denkbare Aktivitäten in Verbindung mit Salzstöcken zu nennen, wie die Errichtung von Kavernen und Bergwerken, die in der Vergangenheit am Standort jedoch nicht stattgefunden haben. Aus der Analyse früherer menschlicher Aktivitäten in der Standortregion und in Bezug auf Salzstöcke, die bis in Endlagerteufe reichen können, lassen sich für die weitere Behandlung der Fragestellung sogenannte Basisaktivitäten (s. Abb. 3.1) ableiten.



**Abb. 3.1** Schematische Darstellung von Basisaktivitäten

Diese Basisaktivitäten bilden die Grundlage für die weitere Bearbeitung von HI-Szenarien, da sie das Potenzial besitzen, in den geplanten Teufenbereich des Endlagers einzugreifen und die Barrieren zu schädigen. In den folgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Basisaktivitäten „Abteufen einer Bohrung“, „Anlegen einer Kaverne“ und „Auffahrung eines Bergwerks“ und die damit verbundenen Handlungsabläufe eingegangen. Die Ausführungen erstrecken sich dabei über die einzelnen Entwicklungsphasen der Basisaktivitäten wie die Prospektion, Planung und Konstruktion sowie den Betrieb und Stilllegung. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass den Bohrungen eine besondere Bedeutung zukommt, da auch der Solung von Kavernen oder dem Auffahren eines Bergwerks Aufschluss- bzw. Explorationsbohrungen vorausgehen.

### 3.2 Regulatorische Grundlagen

Die GRS hat in der Vergangenheit im Zuge der Entwicklung von Sicherheitskriterien mit der Erhebung des Standes von Wissenschaft und Technik zu den oben aufgeführten Basisaktivitäten begonnen und in /BAL 05/ dokumentiert. In /BAL 05/ wird auf die regulatorischen Grundlagen verwiesen. Der gesetzliche Rahmen für die Basisaktivitäten und damit auch für die Erkundungsbohrung wird durch das Bundesberggesetz

(BBergG) /BBG 09/ und das Lagerstättengesetz /LAG 34/ aufgespannt. Das Bergrecht sowie das Lagerstättenrecht fallen in die Zuständigkeit der Bundesländer, die die behördliche Aufsicht und Einhaltung durch entsprechende Verordnungen landesspezifisch regeln. So haben die Bundesländer entsprechende Lagerstättenverordnungen und eine Reihe von Bergverordnungen, u. a. die Bergverordnung für Tiefbohrung, Tiefspeicher und für die Gewinnung von Bodenschätzen durch Bohrungen, erlassen. Aufgrund der länderspezifischen Regelungen sind ggf. weitere Gesetze, wie z. B. das niedersächsische Wassergesetz, zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist im Umweltinformationsgesetz u. a. das Recht über den freien Zugang zu den bei den Behörden vorhandenen Informationen über die Umwelt geregelt. Neben den Gesetzen und Verordnungen existieren noch eine Reihe von landesspezifischen Richtlinien, wie z. B. die „Richtlinie des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen auflässiger Bohrungen“ /OCZ 98/, die entsprechend beachtet werden müssen.

Im Rahmen der Untersuchungen zu den Basisaktivitäten, die auf heute üblichen menschlichen Aktivitäten und Techniken beruhen, sind neben den Arbeitsabläufen auch regulatorische Grundlagen zu berücksichtigen. Diese regulatorischen Grundlagen geben z. B. Aufschluss über den Umfang durchzuführender Untersuchungen bzw. einzureichender Unterlagen, die vor einem Unternehmen wie das Anlegen einer Kaverne den zuständigen Behörden vorzulegen sind. Darüber hinaus werden regulatorische Vorgaben gemacht, wie z. B. eine Bohrung zu verschließen und eine Kaverne stillzulegen ist. In den weiteren Untersuchungen der Basisaktivitäten wird davon ausgegangen, dass die gültigen Bestimmungen eingehalten werden.

### **3.3 Abteufen einer Bohrung**

In der Bohrungsdatenbank Niedersachsen /LBG 11a/ werden Bohrergebnisse aus 170 Jahren geologischer Erkundung vorgehalten. Sie liefert Informationen zu über 280.000 Bohrungen mit ca. 1,9 Mio. Datensätzen zu den einzelnen erbohrten Schichten. Die im Verzeichnis erfasste tiefste Bohrung erreicht 7.000 m unter NN. Die Teufen der Bohrungen richten sich nach dem Ziel der Prospektion. Wie der Datenbank des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) entnommen werden kann, wird der größte Anteil der Bohrungen mit dem Ziel der Erkundung der Hydrogeologie oder der Geotechnik abgeteuft. Ihre Endteufen sind kleiner als 100 m. Demgegenüber liegen die Tiefen von Bohrungen zur Kohlenwasserstoff-Exploration im Umfeld von Salzstöcken zwischen einigen 100 m und einigen 1.000 m.

Die Häufigkeit von Explorationsbohrungen und Erkundungsbohrungen ist abhängig von der Ressourcenhöflichkeit einer Region. In Norddeutschland ist in der Vergangenheit eine intensive Bohrtätigkeit zur Exploration von Kohlenwasserstoffvorkommen (Erdgas/Erdöl) zu verzeichnen gewesen. Die Tiefenbereiche der Lagerstätten für Erdöl liegen bei 1.000 m – 2.500 m und für Erdgas bei 3.000 m – 5.000 m. Bei einer entsprechenden Explorationsbohrung würde der geplante Teufenbereich von ca. 900 m eines Endlagers für radioaktive Abfälle überschritten. Die Datenbank des LBEG enthält Datenblätter von mehr als 30.000 Bohrungen zur Kohlenwasserstoff-Exploration /LBG 11b/. Neben Titeldaten werden Daten zu speziellen Sachgruppen wie geologische Profile, Kernstrecken (Bereiche der Bohrung, für die Kerne vorliegen), Speichergesteine oder ähnliches aufgenommen. Einen Überblick über abgeteuft Tiefbohrungen seit 1840 gibt die Abb. 3.2. Insgesamt ist ein Rückgang der Bohrtätigkeit zu verzeichnen /BMW 04/.

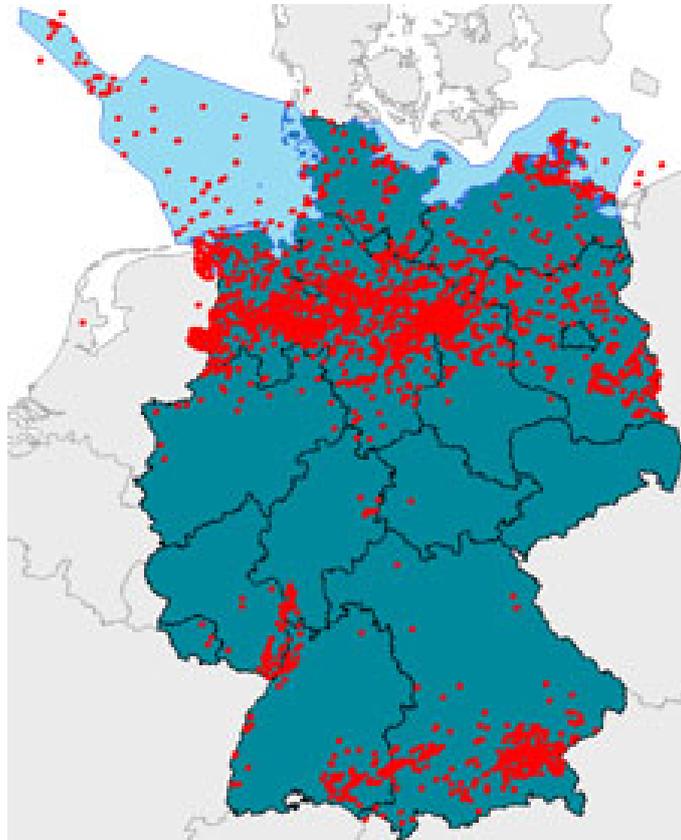
Immer häufiger werden Bohrungen auch zur Gewinnung geothermischer Energie abgeteuft. Im Hinblick auf die Tiefe, in der geothermische Energie genutzt wird, können grob unterteilt drei Nutzungsarten voneinander unterschieden werden:

- (a) Nutzung oberflächennaher Grundwasser- oder Erdwärmevorkommen (Wärmepumpen)
- (b) Geothermienutzung durch Erdwärmesonden
- (c) Anlagen zur geothermalen Stromerzeugung

Die unter (a) genannten Nutzungen betreffen Tiefen von einigen 10 m und sind daher für weitere Betrachtungen irrelevant.

Die Gewinnung von geothermischer Energie mittels Erdwärmesonden findet bis in Tiefen von einigen 100 m, in seltenen Fällen über 1.000 m statt. Aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit ist eine bevorzugte Nutzung von Salzstrukturen nicht auszuschließen. Daher kann diese Form der Geothermienutzung prinzipiell zur Ableitung von HI-Szenarien herangezogen werden. Allerdings handelt es sich bei diesen Anlagen um geschlossene Systeme, wobei ein Arbeitsmittel (Flüssigkeit, Direktverdampfer) im Kreislauf in einem geschlossenen Koaxialrohr zirkuliert. Eine Auflösung von Salzgesteinen oder der Zutritt kontaminierter Lösungen in das Erdwärmesondensystem ist daher ausgeschlossen. Entscheidend für eine potenzielle Schädigung ist daher weni-

ger der Betrieb einer derartigen Anlage, als ihre Errichtung, d. h. das Abteufen einer Bohrung, die später zur Geothermienutzung ausgebaut werden soll. Dieser Fall entspricht jedoch dem normalen Arbeitsablauf „Abteufen einer Erkundungsbohrung“.



**Abb. 3.2** Darstellung der Ansatzpunkte von Tiefbohrungen zur Kohlenwasserstoffexploration (Quelle: /LBG 11b/)<sup>2</sup>

Geothermieranlagen zur Stromerzeugung nutzen Tiefen von einigen 1.000 m, da sie auf Wassertemperaturen von mindestens 100 °C angewiesen sind. Generell vorstellbar ist, dass, sofern die Anlage relativ früh (bis 1.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers) errichtet wird, hier die durch das Endlager erzeugte Wärmeanomalie ggf. als Geothermie-Quelle auch oberhalb des o. g. typischen Teufenbereiches bevorzugt genutzt werden könnte. Vorstellbar ist auch, dass die Detektion eines Hot-Spots, der eine Anomalie darstellt, weitere Untersuchungen nach sich ziehen würde. Daraus resultierende

---

<sup>2</sup> Aus der Abbildung kann aufgrund der überproportional dargestellten Bohransatzpunkte keine Beziehung der erbohrten Flächenbereiche abgeleitet werden.

Reaktionen oder Schlussfolgerungen sowie Ergreifung von Maßnahmen für oder gegen eine Geothermianlage lassen sich nicht ableiten. Allerdings werden Geothermianlagen zur Stromerzeugung – sofern am Standort Gorleben kein hydrothermaler Aquifer genutzt werden kann – als Hot-Dry-Rock-Systeme betrieben. Hierbei wird in gering permeablen Gesteinsformationen durch eine Injektionsbohrung das Wärmeträgermedium (Wasser, CO<sub>2</sub>) unter hohem Druck oberhalb des in der jeweiligen Teufe vorliegenden lithostatischen Druckes eingepresst um hierdurch Fließwege aufzubrechen (Hydro-Frac-Verfahren). Hierdurch wird die Permeabilität des Gesteins erhöht. Das Wärmeträgermedium wird durch eine zweite Produktionsbohrung wieder zu Tage gefördert. Aufgrund der Betriebsart als offenes System verbietet sich die Nutzung geothermischer Energiegewinnung in Salzformationen, da die Gefahr unkalkulierbarer Aussolungen im Salzgestein besteht.

Aus den oben genannten Gründen kann auch diese Nutzungsform geothermischer Energie im Hinblick auf die Ableitung von HI-Szenarien auf den Fall „Abteufen einer Erkundungsbohrung“ (die später zu einer Injektionsbohrung ausgebaut würde) reduziert werden. Die folgenden Ausführungen zum Stand von Wissenschaft und Technik beziehen sich somit allein auf das Niederbringen einer Erkundungsbohrung.

### **3.3.1 Allgemeines**

Als Erkundungsbohrung oder auch Explorationsbohrung werden Bohrungen bezeichnet, die der Suche nach neuen Lagerstätten in der Tiefe dienen. Sie dienen in erster Linie der Prospektion, d. h. der Erkundung der geologischen Verhältnisse sowie der Lagerstätten erkundung, aber auch der Vorbereitung der Gewinnung bzw. Förderung z. B. von Kohlenwasserstoffen, Salz, Grundwasser oder geothermischer Energie.

Die Teufen der Bohrungen richten sich nach dem Ziel der Prospektion. So wird der größte Anteil der Bohrungen mit dem Ziel zur Erkundung der Hydrogeologie mit Endteufen kleiner als 100 m niedergebracht. Demgegenüber liegen die Explorationsbohrungen auf Kohlenwasserstoffe im Umfeld von Salzstöcken zwischen einigen 100 m und einigen 1.000 m.

Die Bohrungen können vertikal, horizontal oder auch abknickend ausgeführt werden. Als Bohrtechniken stehen schlagende, drehende, oder oszillierende Techniken zur Verfügung. Das in der Tiefbohrtechnik am häufigsten zur Anwendung kommende Ver-

fahren ist das Rotary-Verfahren, bei dem der Bohrmeißel verbunden mit dem Bohrgestänge von einem Kraftdrehkopf (top drive) in Rotationsbewegung versetzt wird (s. hierzu Abb. 3.3).



**Abb. 3.3** Seiten- und Vorderansicht eines im Rotary-Verfahren verwendeten Rollenmeißels (Quelle: FRE<sup>3</sup>)

Ein weiteres Bohrverfahren ist das Turbinenbohren, bei dem die antreibende Turbine unmittelbar über dem Bohrmeißel (down hole) sitzt. Das Verfahren wird vor allem bei Ablenkbohrungen eingesetzt.

Für Erkundungsbohrungen wird zunehmend die „slim hole drilling“ Technik verwendet. Hier werden durch die Wahl eines kleineren Durchmessers der Zeit- und Materialaufwand für die Bohrung verringert und damit die Bohrkosten gesenkt. Nach der Entscheidung zur Gewinnung bzw. Produktion wird die Erkundungsbohrung mit einem größeren Durchmesser überbohrt.

Weiterhin kommen in zunehmendem Maße die Horizontalbohrtechniken zur Erschließung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten zum Einsatz. Erfolgreich erprobt und immer mehr zur Anwendung kommt auch die Horizontalbohrtechnik in Kombination mit der Frac-Technik. Hierbei werden mittels hoher Drücke in einer gering durchlässigen La-

---

<sup>3</sup> Fachgruppe für Rohstoffe und Entsorgungstechnik (FRE) der RWTH Aachen (2004), Bilder zu Geothermiebohrung Projekt Super C

gerstättete Risse erzeugt, die einen größeren Gas- oder Ölzufuhr und damit eine höhere Produktion ermöglichen.

### **3.3.2      Prospektion und Planung**

Die zu treffenden technischen Maßnahmen vor, während und nach der Niederbringung einer Bohrung sind im sog. Bohrbetriebsplan und im Bohrprogramm durch den Auftraggeber bzw. durch einzuhalten Gesetze, Verordnungen und Richtlinien vorgegeben. Der Bohrbetriebsplan enthält Anweisungen, Rahmenbedingungen und Informationen zur Durchführung der Bohrung wie Bohransatzpunkt, Bohrbeginn, Liegenschaft, Spülung, Bohrverfahren, Überwachungseinrichtung usw. Im Bohrprogramm sind weitergehende Anweisungen zum Ablauf der Bohrarbeiten festgelegt. Die Auftraggeber, die vorrangig aus der Erdöl- und Erdgasindustrie sowie aus dem Bereich des Bergbaus kommen, bedienen sich in der Regel zur Durchführung des beabsichtigten Unternehmens entlang der Erkundungs-, Betriebs- und Abschlussphase einer Reihe von fachkundigen Dienstleistern wie geologische Dienste, Bohrfirmen und Labore. Ein erster Schritt zur Auffindung geeigneter Gebiete ist die Sichtung von geologischen Kartierungen und geologischen Aufschlüssen Übertage sowie die Recherche bereits durchgeführter Tiefbohrungen. Begleitend dazu erfolgen die Auswertung von Luftaufnahmen und die Untersuchung des Bodens der dadurch eingegrenzten Regionen.

Zur vorbereitenden Erkundung der geologischen Gegebenheiten des Untergrundes werden häufig verschiedene geophysikalische Messmethoden eingesetzt. Problematisch ist, dass die teufenabhängigen Gesteinseigenschaften nur indirekt bestimmt werden können, so dass zur Ableitung, z. B. geologischen Schichtabfolgen, immer Inversionsverfahren eingesetzt werden müssen. Daraus können erhebliche Unsicherheiten bei der Interpretation der gemessenen Phänomene resultieren. Einige wesentliche Methoden vor Durchführung einer Erkundungsbohrung, wie erdmagnetische, gravimetrische, geoelektrische und thermische Messungen sowie seismische Verfahren, werden im Folgenden kurz beschrieben /BEN 85/, /KNÖ 05/, /MIL 84/, /MIL 85/, /MIL 87/:

Mittels erdmagnetischer Messungen können Anomalien des natürlichen erdmagnetischen Feldes identifiziert sowie deren Ausprägung in Form und Tiefe bestimmt werden.

Ähnlich wie die Geomagnetik handelt es sich bei der Gravimetrie um ein Potentialverfahren, d. h., durch Einsatz von Drehwaagen oder Pendel werden Änderungen des

Erdschwerefeldes vermessen. Anhand der unterschiedlichen Stärke der Schwerebeschleunigung an verschiedenen Orten lassen sich (mittels Geländereduktion) Aussagen über die Verteilung der Massen in der Erdkruste und über die Gesteinsdichte treffen, womit z. B. Salzstöcke lokalisiert werden können.

Mittels geoelektrischer Messverfahren wird der Potentialverlauf, der von den Leitfähigkeitsstrukturen im Untergrund bestimmt wird, vermessen. Daraus lässt sich die räumliche Verteilung des spezifischen Widerstandes berechnen, die wiederum Rückschlüsse auf die geologische Situation zulässt.

Das Messprinzip thermischer Messungen zielt auf Abweichungen des Erdwärmeflusses ab. Mit zunehmender Tiefe nimmt die Temperatur aufgrund eines konstanten Erdwärmegradienten linear zu. Abweichungen davon lassen auf die Gesteinsänderungen unter Berücksichtigung spezifischer Wärmeleitfähigkeiten schließen.

Ein bedeutendes geophysikalisches Verfahren heutiger Zeit ist das seismische Verfahren und insbesondere die entwickelte 3D-Seismik, die sich durch eine den gestellten Anforderungen entsprechenden Genauigkeit der Wiedergabe der Untergrundstruktur auszeichnet. Das Messprinzip beruht auf durch Geophone aufgenommene und in elektrische Impulse umgewandelte reflektierte Schwingungen, die digital aufgezeichnet werden. Die Schwingungen werden durch Sprengungen, Vibrationen oder Luftpulse (im Wasser) ausgelöst. In Abhängigkeit von der Gesteinsart setzen sich die Schwingungen im Untergrund unterschiedlich schnell fort und werden an den Grenzflächen reflektiert oder abgelenkt. Aufgrund der umfangreichen Informationen lässt sich die Untergrundstruktur erst durch Aufbereitung und Weiterverarbeitung mittels rechnergestützter Werkzeuge abbilden.

### **3.3.3 Betrieb**

Zur Sicherung der Bohrlochwand während des Bohrvorganges und zur Beseitigung des Bohrkleins wird eine Spülflüssigkeit (meistens eine wässrige Ton- oder Schwespatlösung) durch das Bohrgestänge gepumpt, die durch den Ringraum mit dem Bohrklein zur Oberfläche wieder aufsteigt. Zur Langzeitabsicherung gegen Einsturz des Bohrloches können Stahlrohre einzementiert werden.

Während der Erstellungsphase des Bohrloches wird eine Reihe von begleitenden Untersuchungen und Überwachungen durchgeführt. Diese erstrecken sich über die geologisch-mineralogische Analyse des zu Tage geförderten Bohrkleins bzw. bei gekerneten Bohrungen der entnommenen Bohrkern, die Spülflüssigkeit, den Bohrvorgang, das Bohrloch bzw. die Bohrlochwand und die Bohrausrüstung wie Bohrmeißel, Antrieb und Gestänge. Entstehende Spülungsverluste werden registriert. Die Entnahme von Bohrkernen ist durch den Bohrbetriebsplan festgelegt. Anstelle der Kernentnahme werden auch häufig Televiever-Verfahren (optisch und akustisch) eingesetzt. Zur genauen Bestimmung der chemischen und mineralischen Zusammensetzung von Bohrsproben erfolgt die Analyse im Labor.

Im Bohrloch werden je nach Art der Prospektion eine Reihe weiterer geophysikalischer Parameter wie Temperatur, Widerstand, natürliche Radioaktivität, Leitfähigkeit, Dichte, Porosität etc. mittels Bohrlochsonden (Gamma-Log, Neutronen-Log, Sonic-Log usw.) aufgenommen /FRI 99/. Die Aufnahme von Messkurven (Logs) erfolgt nach Herablassen von speziellen Sonden in das Bohrloch durch Aufzeichnung und Messung verschiedener physikalischer Größen während einer gleichmäßigen Aufwärtsbewegung des Messinstruments an die Oberfläche. Hier wird zwischen passiven und aktiven Verfahren unterschieden, wobei passive Methoden auf natürliche Phänomene (das magnetische Feld, das elektrische Eigenpotential oder die natürliche Radioaktivität) reagieren und aktive Methoden durch Erzeugung von Signalen (seismische Wellen, nukleare Teilchen, elektrische Ströme) bestimmt sind. Neben der beschriebenen klassischen Technik des Loggings wurde in den letzten Jahren eine Technik „Logging while drilling“ (LWD) entwickelt, die es erlaubt, direkt während des Bohrvorganges Messungen durchzuführen.

Außer den genannten Messungen, die sich auf die Bohrlochumgebung beziehen, erfolgt weiterhin die Aufnahme von Daten zur Bohrlochgeometrie und zu den Eigenschaften der Bohrspülung. Eine Übersicht zu den einzelnen Methoden und den darin enthaltenen Messgrößen gibt die Abb. 3.4 wieder. Die Abb. 3.5 enthält eine Aufstellung der Einsatzmöglichkeit verschiedener geophysikalischer Verfahren im Zusammenhang mit der Ermittlung geologischer Eigenschaften und des Untergrundaufbaus betreffender Gegebenheiten. Auf eine Beschreibung der einzelnen Messprinzipien wird an dieser Stelle verzichtet. Es wird vielmehr auf die umfangreiche Fachliteratur wie z. B. /FRI 99/, /MIL 84/, /MIL 85/, /MIL 87/ zu diesem Thema verwiesen.

Neben den geophysikalischen Messungen wird kontinuierlich der Verschleiß der Bohrausrüstung, insbesondere des Bohrmeißels, geprüft. Ein Indikator für einen hohen Verschleiß oder veränderter Schichtenfolge ist durch die Überwachung des Bohrvortriebs gegeben.

Das während der Bohrung anfallende Bohrklein wird zunächst am Bohrplatz gelagert und später abhängig von der Art der verwendeten Spülung entsorgt. Analog zum Bohrklein werden anfallende Flüssigkeiten am Bohrplatz gesammelt und anschließend entsorgt.



**Abb. 3.4** Übersicht über die unterschiedlichen Messungen in einem Bohrloch (basierend auf /KNÖ 05/)

Bezug	Allgemeine Geologie						Lagerstätten-Geologie		Geochemie		Petrophysik					Seismik		
	Lithologie (allgemein)	spezielle Lithologie		Mineralbestand	stratigraph. Korrelation	Ablagerungsmilieu	Klüfte	Überdruck	Edukt	Reife	Porosität	Permeabilität	Ton-Gehalt	Salinität Formationswasser	Kohlenwasserstoff-Sättigung	Gas	Intervallgeschwindigkeit	akustische Impedanz
		Vulkanite	Evaporite															
Temperatur																		
Kaliber																		
Eigenpotenzial																		
elektrischer Widerstand																		
Gamma Ray																		
Spectral Gamma Ray																		
Sonic																		
Dichte																		
photoelektrischer Effekt																		
Neutronenporosität																		
Dipmeter																		dip
Image Logs																		dip

(im wesentlichen)  
qualitative Nutzung

Semi-quantitative und  
quantitative Nutzung

streng quantitative  
Nutzung

**Abb. 3.5** Übersicht der Einsatzmöglichkeit verschiedener geophysikalischer Verfahren zur Ermittlung bestimmter geologischer Eigenschaften (basierend auf /GEO 11/)

### 3.3.4 Stilllegung

Die Stilllegung (Verwahrung) auflässiger Bohrungen wird im Bundesberggesetz und den Tiefbohrverordnungen der Länder sowie entsprechenden Richtlinien der Bergämter (z. B. die Richtlinie zur Verfüllung auflässiger Bohrungen des Oberbergamtes Clausthal-Zellerfeld /OCZ 98/) geregelt. In allen Fällen wird gefordert, dass auflässige Bohrungen einerseits zum Schutz der Lagerstätten und andererseits zum Schutz der Grundwasserreservoirs und aus Standsicherheitsgründen durch geeignete Maßnahmen abzudichten bzw. zu verfüllen sind. Grundwasserspeicher- und Förderhorizonte sind gegenüber angrenzenden Schichten abzudichten und die Dichtheit durch entsprechende Kontrollmessungen nachzuweisen.

Die Richtlinie zur Verfüllung auflässiger Bohrungen des Bergamtes Clausthal-Zellerfeld /OCZ 98/ beinhaltet folgende generelle Anforderungen an die Verfüllung von Tiefbohrungen:

- „Das Bohrloch ist vollständig zu verfüllen. Dabei sind die Bereiche von nutzbaren Erdöl-, Erdgas- und Salzlagerstätten, von nutzbaren Speicher- und Wasserhorizonten sowie von druckstarken Horizonten mit Zuflüssen (in dieser Richtlinie zusammengefasst Lagerstätte genannt), Liner, Schnittstellen von Rohren und Ringräume sowie der Rohrschuh der tiefsten Rohrtour in einem teilweise unverrohrten Bohrloch und der Bereich unter der Erdoberfläche durch besondere Verfüllungsstrecken abzudichten.“
- „In Bereichen, in denen beim Bohren oder Fördern Schwierigkeiten aufgetreten sind, können zusätzlich besondere Verfüllungsstrecken erforderlich werden.“
- „Die besonderen Verfüllungsstrecken sind mit geeignetem Zement oder mit anderen geeigneten Feststoffen, gegebenenfalls in Verbindung mit mechanischen Abdichtungen, zu verfüllen. Durch geeignete Maßnahmen ist für eine gute Haftung der Feststoffe an der Rohr- bzw. Bohrlochwand zu sorgen.“
- „Die für die Verfüllung der übrigen Strecken verwendeten Stoffe dürfen das anstehende Gebirge, die Verrohrung sowie die Stoffe der besonderen Verfüllungsstrecken nicht angreifen.“

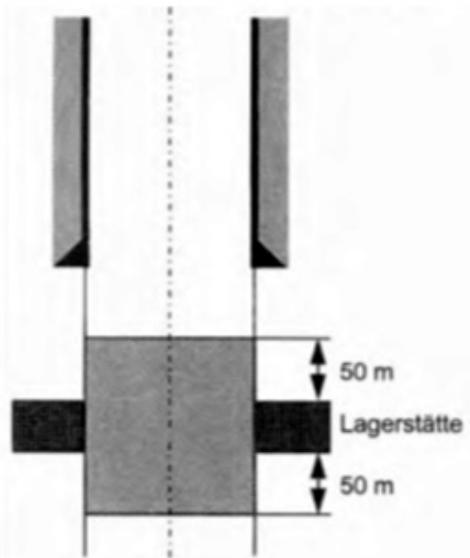
Im Speziellen wird in /OCZ 98/ gefordert:

- „Besondere Verfüllungsstrecken sollen von 50 m unterhalb bis 50 m oberhalb der Lagerstätte reichen“ (s. Abb. 3.6).
- „Perforationsstrecken mit Zufluss sollen durch eine Druckzementation abgesperrt werden. Wird dazu ein permanenter Zementierpacker verwendet, genügt über diesem für die besondere Verfüllungsstrecke eine Länge von 20 m. Ist eine Druckzementation [...] nicht oder nur unter schweren Bedingungen durchführbar, ist möglichst direkt oberhalb der Perforation eine mechanische Abdichtung mit einer besonderen Verfüllungsstrecke von mindestens 50 m darüber einzubringen“.
- „Bei tiefen Gasbohrungen kann eine mechanische Abdichtung mit einer besonderen Verfüllungsstrecke von mindestens 50 m darüber [...] als eine einer Druckzementation [...] technisch gleichwertige Abdichtung vorgenommen werden. Sofern die mechanische Abdichtung durch einen Stopfen im Produktionspacker erfolgt, ist

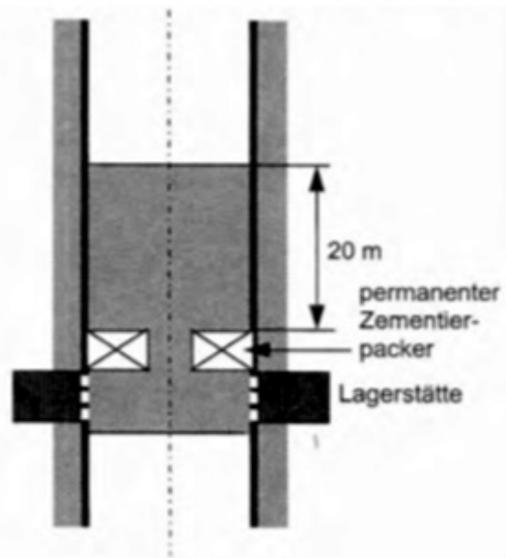
die Dichtheit der mechanischen Abdichtung vor Einbringen der besonderen Verfüllungsstrecke nachzuweisen“.

- „Im Verfüllungsbetriebsplan ist anzugeben, ob die Abdichtung [...] erfolgen soll; Abweichungen von diesen Regelungen sind im Betriebsplan zu begründen“.
- „Abweichend [...] kann innerhalb mächtiger Salzlagerstätten auf eine durchgehende besondere Verfüllungsstrecke verzichtet werden. Es müssen wenigstens im Hangenden und Liegenden besondere Verfüllungsstrecken von mindestens 100 m Länge im Salz und 50 m im Nebengestein eingebracht werden“ (s. Abb. 3.6).
- „Ist ein Bohrloch teilweise unverrohrt, so muss in die tiefste Rohrtour ab Rohrschuh eine besondere Verfüllungsstrecke von mindestens 100 m oder eine mechanische Abdichtung mit einer besonderen Verfüllungsstrecke von mindestens 50 m eingebracht werden“.

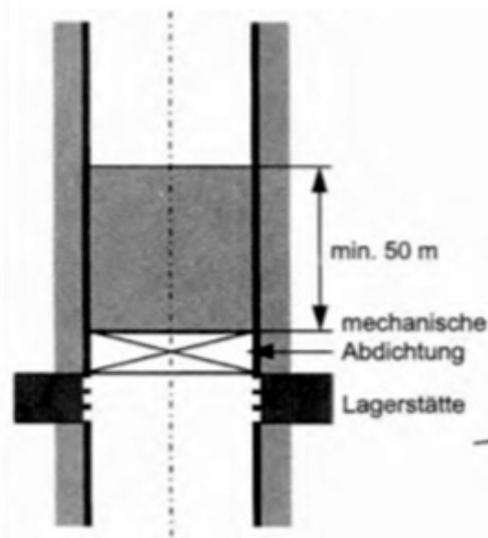
### Besondere Verfüllstrecken



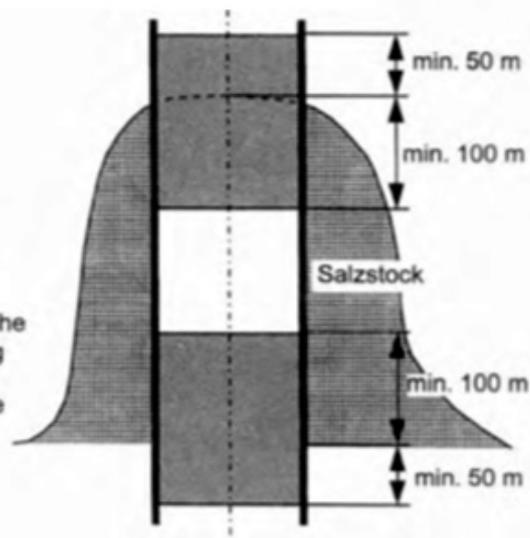
### Perforationsstrecken mit Zufluß



### Tiefe Gasbohrung



### Salzlagerstätten



**Abb. 3.6** Bildliche Darstellung von Verfüllstrecken (gemäß /OCZ 98/)

In der Regel wird das Bohrloch mit setzungsstabilem Material (z. B. Schotter) oder mit Zement verfüllt und nach oben hin mit einem Verschlussstopfen abgedichtet. Darüber hinaus wird das Bohrloch durch eine 0,25 m dicke Betonplatte, die sich mindestens 1 m unter der Oberfläche befindet, abgesichert /OCZ 98/. Eine Bohrung, die einen Grundwasserstauer durchörtert, der zwei Grundwasserstockwerke voneinander trennt,

wird derart verschlossen, dass der Kurzschluss beider Grundwasserstockwerke verhindert wird. Weiterhin sind Speicher- und Förderhorizonte gegenüber den angrenzenden Gesteinsschichten abzudichten. Verschlussmaterialien sind in der Regel Zemente.

Speziell Förder- und Speicherbohrungen sind

- am oberen Ende der Bohrung,
- im Bereich von Süßwasser-Aquiferen,
- im Bereich von „plastisch drückenden Steinsalzschiefern“,
- im Reservoir bis an die Deckschicht sowie
- im Bereich von Rohrverbindungsstellen

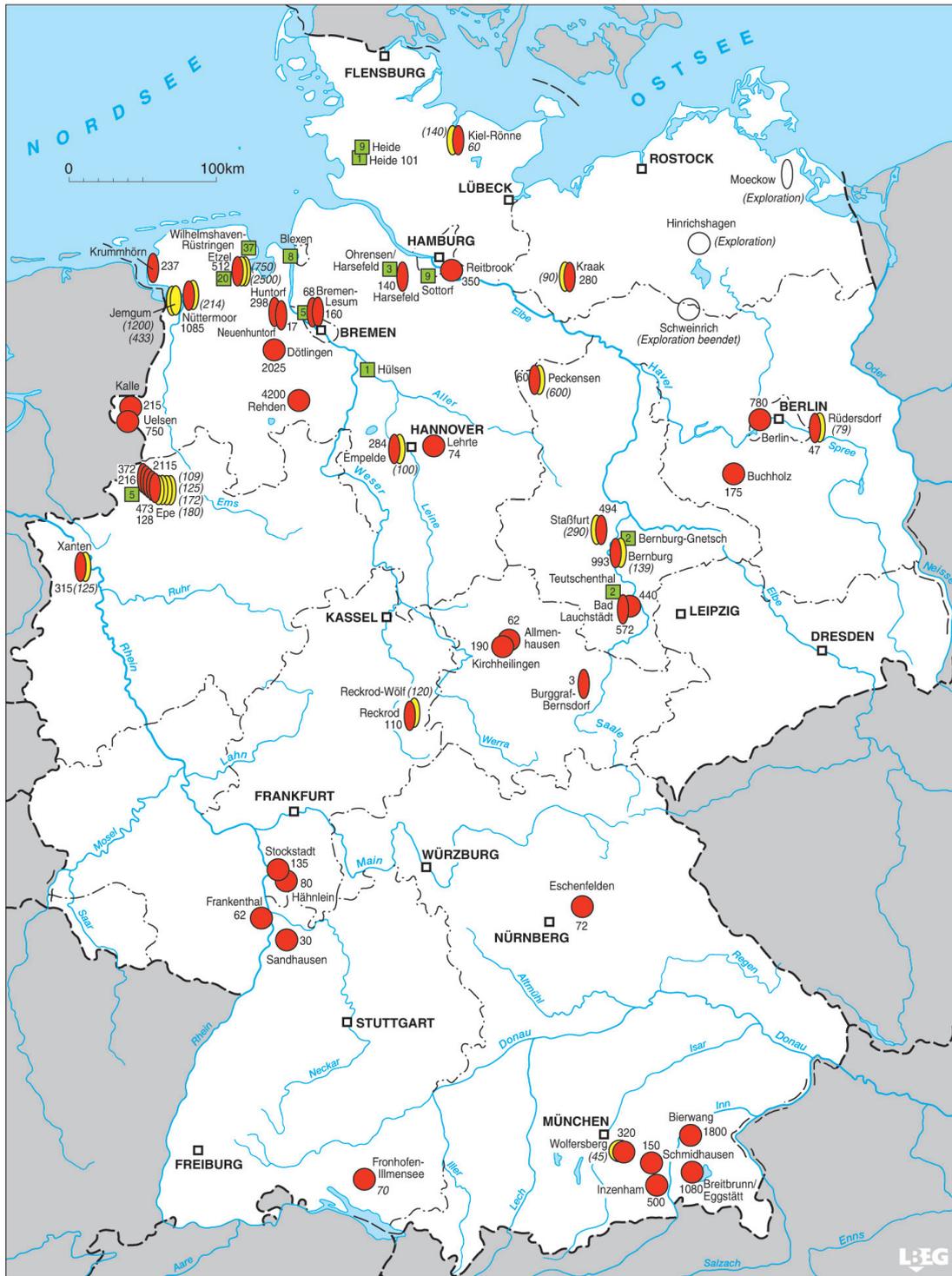
durch Zementbrücken zu verfüllen und zu sichern /SCH 11/.

Alternativ zu Zement wird (insbesondere bei CO<sub>2</sub>-Speicherbohrungen aufgrund der Korrosionsanfälligkeit von Zement) der Einsatz von Tonen (ggf. auch Polymer-Gel-Materialien) empfohlen /SCH 11/. Für die weiteren Betrachtungen ist davon auszugehen, dass eine auflässige Bohrung im Bereich einer Salzstruktur, ähnlich wie in /OCZ 98/ gefordert, im Hangenden und Liegenden durch besondere Verfüllungsstrecken abgedichtet wird, die entweder aus Zement oder aus abdichtendem bindigem Material, wie z. B. Tonen, bestehen.

### **3.4 Anlegen einer Kaverne**

#### **3.4.1 Allgemeines**

Im engeren Sinne werden als Kavernen alle aus einem Salzstock künstlich ausgespülten Hohlräume bezeichnet, z. B. zur Salzgewinnung und zur Lagerung von Erdöl oder Erdgas. In Deutschland gibt es etwa 250 solcher Kavernen, z. B. in der Nähe des wichtigsten Ölimporthafens Wilhelmshaven (Abb. 3.7). Die dortigen Kavernen liegen in über 1.000 m Tiefe und dienen neben der Gasspeicherung auch der Lagerung der im Erdölbevorratungsgesetz vorgeschriebenen Rohstoffreserve für Krisenzeiten, verwaltet vom Erdölbevorratungsverband. Die Abb. 3.7 zeigt die genutzten und in Planung befindlichen Kavernen- und Porenspeicher in Deutschland.



Stand: September 2008

Abb. 3.7 Speicherlokationen in Deutschland (aus /SED 09/)

### 3.4.2 Prospektion

Ausgehend von dem geologischen Kenntnisstand einer bekannten Salzstruktur wird mit Probebohrungen in der Planungsphase die Eignung eines Salzstockes als Lagerraum geprüft /BAD 01/. Bei positiven Ergebnissen erfolgt die Festlegung eines hexagonalen Bohrrasters. Anhand der Ergebnisse von gebirgsmechanischen Berechnungen wird der Bohrlochabstand (i. d. R. ca. 250 m – 300 m) festgelegt. Weitere Erkundungen erfolgen mittels moderner seismischer Methoden. So wird z. B. die Oberflächenseismik zur Beschreibung der Salzstockkontur eingesetzt.

Mit seismischen Methoden kann untersucht werden, ob eine Salzstruktur Überhänge besitzt. Die Salzstockflanken fallen bei diesen Strukturen zur Tiefe nach innen ein, so dass sie mit zunehmender Teufe einen geringeren Durchmesser aufweisen. Kartendarstellungen mit den auf die Tagesoberfläche projizierten Maximalumrissen von Salzstöcken sind daher nicht mit dem Nutzpotenzial gleichzusetzen. In vielen Fällen ist angesichts des sehr unterschiedlichen Kenntnisstandes eine weitere projektbezogene geophysikalische Erkundung erforderlich /SCÜ 01/.

Kleinere Salzstrukturen besitzen häufig einen komplizierten Innenbau, der aus der intensiven Internfaltung der am Strukturaufbau beteiligten salinaren Schichtenfolgen (Steinsalz, Kalisalze, Anhydrite, im Falle von Rotliegend-Salinar auch mächtigere Toneinschaltungen) abgeleitet werden kann und das geologische Risiko eines vergeblichen Bohransatzes erhöht.

Aufbauend auf dem Kenntnisstand über bestehende Kavernenfelder werden häufig weitere Kavernen angelegt. Dabei ist der Explorationsaufwand oft erheblich geringer als bei einer Neuanlage von Kavernen in einem noch nicht genutzten Salzstock. Allerdings kann der Nachweis der Solfähigkeit von Salzgebirgstteilen am Standort einer geplanten Kaverne nur durch die Kavernenbohrung erbracht werden /SCÜ 01/.

Bei der Standorterkundung und Standortwahl für die Errichtung von Kavernen in Salz wird ein möglichst homogenes, unverritztes und geringpermeables Salzgestein angestrebt, da die Kavernennutzung in der Regel auf eine Vorhaltung bzw. Speicherung von Druckluft, Erdgas, Wasserstoff, Methan oder Flüssigkeiten (z. B. Erdöl) ausgerichtet ist. Mögliche Wegsamkeiten aufgrund früheren Bergbaus können zu erheblichen Speicherverlusten und im Extremfall infolge unkontrollierbarer Solung während der Kavernenerstellung zu erheblichen Schäden an der Erdoberfläche führen und müssen daher

unbedingt ausgeschlossen werden. Daher wird heute bei der Exploration in jedem Fall überprüft, ob in der Nähe Altbergbau im Salz betrieben wurde. Auch für zukünftige Explorationen ist insbesondere angesichts des aus dem unterstellten markscheiderischen Kenntnisverlust resultierenden Restrisikos anzunehmen, dass entsprechende Untersuchungen vorgenommen werden, um einen Altbergbau auszuschließen.

Für die Anlage von Kavernen ist das Staßfurt-Steinsalz die bevorzugte Formation, weil das dabei genutzte Hauptsalz eine große Homogenität besitzt und bzgl. seines Löseverhaltens gut prognostizierbar ist. Das gilt insbesondere für die Bereiche, in denen die Salzfolge innerhalb von Salzstöcken breite Sattelstrukturen ohne Einfaltungen von leicht löslichen Kalisalzen aufweist. In dem Kavernenbereich sollten keine Kalisalze anstehen, da diese Salze gegenüber Steinsalz einen 5 – 7-fach größeren Lösungsfortschritt bei der Aussolung aufweisen und somit eine unkontrollierte unregelmäßige Kavernenentwicklung zur Folge haben können. Des Weiteren können eingeschaltete nicht solfähige Ton- und Anhydritgesteine die Kavernengestalt beeinträchtigen /SCÜ 01/.

### **3.4.3 Planung und Konstruktion**

#### **Auslegung und Dimensionierung**

Ausgehend von der Salzstockstruktur bzw. der vorliegenden Geologie wird über das zukünftige Kavernenfeld ein Bohrraster mit Lage der Bohransatzpunkte für die zu erstellenden Kavernen gelegt. Erst dann erfolgen sichtbare Aktivitäten. Straßen werden gebaut und Bohrplätze eingerichtet.

#### **Konstruktion**

Großbohranlagen, wie sie auch zur Erschließung von Erdöl- und Erdgaslagerstätten eingesetzt werden, bringen innerhalb von 8 bis 10 Wochen die Kavernenbohrung bis zur Endteufe nieder.

#### **Einbau der Rohrtouren**

Während der Bohrarbeiten werden zementierte Rohrtouren zur Stabilisierung oberflächennaher Schichten und als durchgängige Verbindung zum Salz eingebracht. Zur Vorbereitung des folgenden Solbetriebes werden mit der Bohranlage auch die variablen Rohrstränge eingebaut.

## **Solung**

Hierbei wird das Lösungsvermögen des Wassers gegenüber Salz genutzt. Auf dieser Grundlage läuft der sog. Solprozess in jeder Salzkaverne ab. Nach der Bohrung werden zwei variable Rohrtouren in das Bohrloch eingebaut. In eines der Rohre wird kontinuierlich Wasser eingepumpt, durch die andere Rohrtour wird die Sole ständig abgegeben. Das Wasser löst auf dem Weg zur ableitenden Rohrtour die Bohrlochwand auf und wird somit zur Salzlösung bzw. Sole. Durch entsprechendes Positionieren der beiden variablen Rohrtouren wird die Form und Größe der Kaverne gesteuert. Der Solprozess zur Erstellung einer Kaverne mit üblichen Abmessungen dauert ca. 2 – 4 Jahre. Als orientierende Größe für die anfallende Lösungsmenge können ca. 7,5 m<sup>3</sup> Sole (Sättigung 90 %) pro m<sup>3</sup> Hohlraumvolumen der Kaverne angesetzt werden /KBB 07/.

## **Überwachung und Messung**

Die Überwachung der Kavernenform erfolgt in solungsabhängigen Abständen durch Einfahren von Messsonden in die Kaverne. Diese Sonden haben dreh- und schwenkbare Ultraschallsensoren, die orientiert und kreiselstabilisiert verfahren. Das Hohlraumbild kann während der Vermessung am Computerbildschirm verfolgt werden. Dabei werden der Verlauf der Kavernenwand sowie die Schallsignalformen der Ultraschallantworten, Temperatur und Schallgeschwindigkeit, der Druck, die natürliche Gammastrahlung sowie der Verlauf der Verrohrung und die Lage der Schraubverbindungen aufgezeichnet /TRY 01/.

## **Planungs- und Errichtungsphase**

Grundsätzlich ist in der Planungs- und Errichtungsphase zwischen Speicher- und Solkavernen zu unterscheiden. Die Solkavernen weisen gegenüber den Speicherkavernen in der Regel höhere Volumina, reduzierte Sicherheitspfeiler zwischen den Kavernen und größere Querschnitte auf. Allgemein werden die Kavernen bevorzugt in einer Tiefe von 550 m – 2.000 m mittels Soltechnik erstellt. Die meisten Kavernen liegen tiefer als 1.000 m. Die üblichen Abmessungen von Kavernen können 40 m – 100 m im Durchmesser und Höhen von bis zu 600 m betragen. Die Volumina liegen üblicherweise zwischen 500.000 m<sup>3</sup> bis 1.000.000 m<sup>3</sup>.

Bei der Erstellung von Kavernen wird vorgesehen, Sicherheitspfeiler bzw. Sicherheitsabstände zu verschiedenen Objekten bzw. geologischen Strukturen einzuhalten. Zu

nennen sind hier die Abstände zu Nachbarkavernen, die das 2 bis 3-fache des Kaverendurchmessers betragen. Die Sicherheitsabstände zu den Salzstockflanken betragen üblicherweise 200 m – 300 m, zu Altbergwerken wegen der dort möglicherweise vorhandenen Erkundungsbohrungen 500 m, und einige 10 m Abstand zu potenziell durchlässigen Gesteinen und Strukturen (z. B. Anhydrit).

#### **3.4.4 Betrieb**

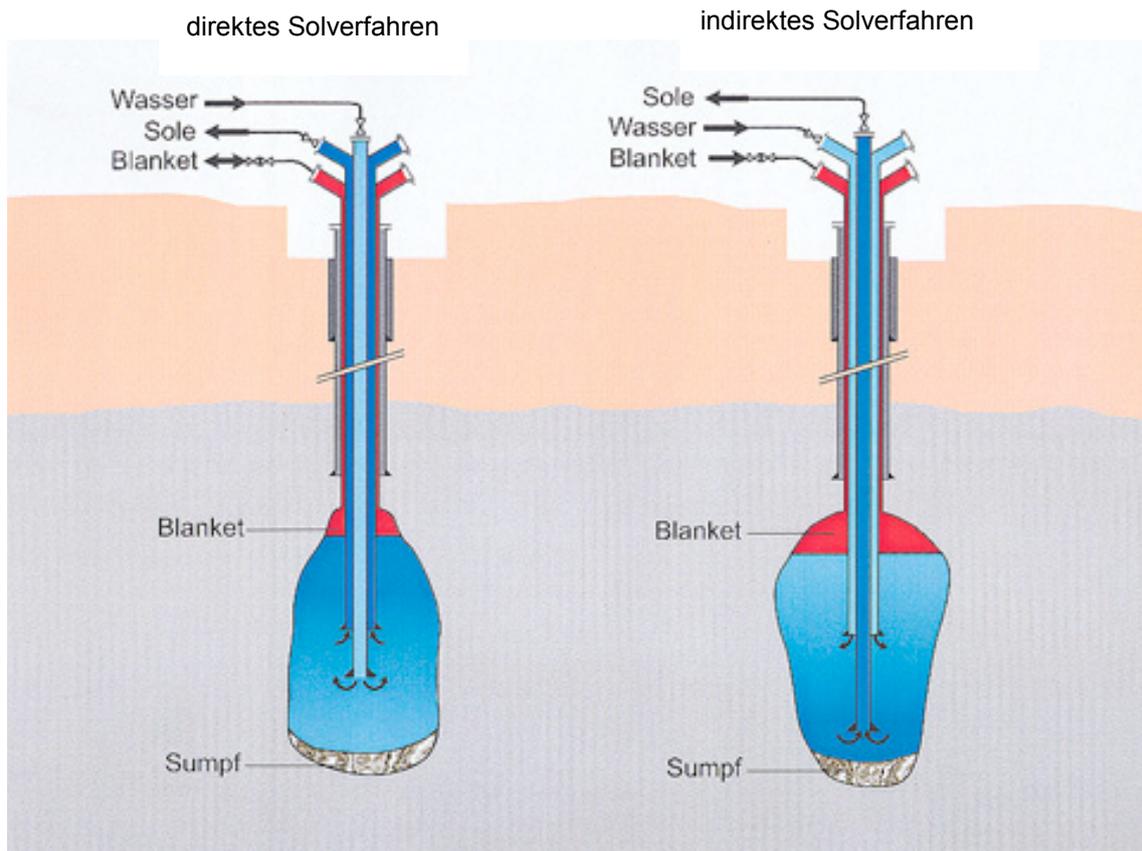
##### **Solbetrieb zur Errichtung von Kavernen**

Die gewünschte Ausdehnung und Geometrie, Kavernenform und -größe wird durch abwechselnde Anwendung des direkten und des indirekten Solverfahrens erzielt. Das unerwünschte Aussolen des Firstbereichs der Kaverne wird durch Regulierung eines Blankets, d. h. einer Schutzflüssigkeit bzw. eines Schutzgases (z. B. Öl oder Stickstoff) erreicht, welches leichter als Wasser bzw. Sole ist und auch das Salz nicht löst. Ein System von konzentrischen Rohrsträngen ermöglicht zwei Verfahren:

Im direkten Solverfahren wird Frisch- oder Seewasser (ca. 100 m<sup>3</sup>/h) durch den inneren Rohrstrang injiziert und die Sole durch den inneren Ringraum abgeleitet. Die Kaverne entwickelt sich dadurch schneller im unteren Bereich. Beim indirekten Solen wird das Wasser (ca. 250 – 300 m<sup>3</sup>/h) über den inneren Ringraum injiziert und die Sole mittels des inneren Rohrstranges abgeleitet. Die Kaverne entwickelt sich schneller im oberen Bereich. Die Teufen des inneren Rohrstrangs und des inneren Ringraums können dabei variabel gehalten werden /KBB 07/, /KBB 11/.

Je nach geplanter Verwendung der Kaverne wird mehr oder weniger tief in die Salzsichten verrohrt und anschließend die Bohrlochverrohrung zementiert. In die Bohrung werden zwei konzentrische Spülrohre eingehängt und Übertage verflanscht. Der Solprozess beginnt mit dem direkten Solverfahren. Dabei gelangt Süßwasser über das tiefer hängende Zentralrohr in das Bohrlochtiefste (Abb. 3.8). Die entstehende Salzsole wird dann gleichzeitig über die zweite äußere Spülrohrtour nach Übertage verdrängt. Im Laufe der Kavernenentwicklung wird der Spülkreislauf umgekehrt (indirektes Solverfahren). Hierbei gelangt das Süßwasser dann über den Ringraum in den Außenraum der Kaverne, sättigt sich auf dem Weg nach unten langsam auf und verlässt die Bohrung über das tiefer hängende Zentralrohr.

Um während der Aussolung die Entwicklung der Kavernenfirste zu steuern, wird durch den Ringraum zwischen Bohrlochverrohrung und zweiter Spülrohrtour eine Schutzflüssigkeit, das sog. Blanket, eingepresst. Wegen der geringeren Dichte schichtet sich diese über das Süßwasser und verhindert damit die vertikale Aussolung.



**Abb. 3.8** Solverfahren zur Kavernerstellung (Quelle: /KBB 11/)

Mit Hilfe eines Pipelinesystems erreicht die Sole die verarbeitenden Unternehmen. Sie dient zur Herstellung von Soda, Wasch- und Reinigungsmitteln sowie von Kunststoffen. Verwendung findet die Sole ebenso bei der Produktion von Arznei- und Futtermitteln, von Konservierungsmitteln und Chemikalien zur Wasseraufbereitung /KUR 07/.

### Einlagerung bei Speicherkavernen

Nach der Solung werden die Solrohr Touren ausgebaut sowie durch einen Befüllrohrstrang und einen Injektionswasserstrang für den Lagerbetrieb ersetzt. Die übliche Nutzung für den Speicherbetrieb einer Kaverne ist vorwiegend auf die Einlagerung von

Erdöl und Erdgas ausgerichtet, aber auch die Speicherung von Wasserstoff und Druckluft sind mögliche Anwendungsbereiche. Im Weiteren wird sowohl der Einlagerungs- als auch Auslagerungsvorgang am Beispiel einer Kaverne zur Speicherung von Erdöl beschrieben.

Eine „leere“ Kaverne ist zur Vermeidung von hohen Spannungen im Gebirge immer mit Sole gefüllt. Mit Hochdruckpumpen wird z. B. das Erdöl durch den Ringraum der letzten zementierten Rohrtour und der Befüllrohrtour in die Kaverne gepresst.

Bei der Befüllung der Kaverne mit Erdöl wird die in der Kaverne befindliche Sole unter Druck verdrängt und fließt durch den Befüllrohrstrang nach Übertage und wird abgeleitet. Weil sich die gesättigte Sole auf dem Weg nach oben abkühlt, kristallisiert ein Teil aus und kann dadurch das Rohr verstopfen. Um das zu verhindern, wird die Sole verdünnt. Dazu wird in den Injektionswasserstrang Süßwasser in die Sole eingespeist.

### **Auslagerung bei Speicherkavernen**

Bei dem Auslagerungsprozess wird der Dichteunterschied zwischen Wasser und Erdöl genutzt, um das „leichte“ Öl mit dem „schweren“ Wasser zu verdrängen. Mit geringem Druck wird das Wasser durch den Befüllrohrstrang in die Kaverne geleitet. Das leichte Öl schwimmt auf und es fließt aufgrund des Auftriebes zum Tanklager. Das Wasser kann dabei in begrenztem Umfang einen Solprozess auslösen und wird dabei mit Salz aufgesättigt, bevor es bei der nächsten Einlagerung in den Vorfluter abgeleitet wird.

### **Betriebsphase**

Aus heutiger Sicht wird von einer Betriebsdauer der Kavernen in der Größenordnung von ca. 100 Jahren ausgegangen. Betriebserfahrungen liegen über diesen Zeitraum allerdings nicht vor, da sich die Nutzung von Kavernen erst in den letzten 50 Jahren entwickelt hat.

Darüber hinaus hängen die Betriebsphase und die darin ablaufenden Arbeitsvorgänge von der Nutzungsart der Kavernen ab. Die Nutzung von Kavernen ist vornehmlich auf die Speicherung von z. B. Erdöl, Erdgas, Wasserstoff sowie Druckluft und Salzgewinnung ausgerichtet.

Die Betriebsdrücke liegen unterhalb des Gebirgsdrucks und führen daher nicht zu einer Kluft- oder Rissbildung im Gebirge.

Insbesondere aufgrund vorliegender günstiger gebirgsmechanischer Verhältnisse lassen sich relativ hohe Betriebsdrücke realisieren. So werden Kavernen als Erdgasspeicher primär dazu genutzt, um saisonale und tageszeitliche Verbrauchsspitzen auszugleichen. Für diesen Zweck wird eine hohe Anforderung an die Verfügbarkeit von Aus- und Einlagerungskapazitäten von Erdgas gestellt. Der Kavernenstandort in Epe zeigt beispielsweise, dass die einzelnen Gasspeicherkavernen mit einem maximalen Innendruck von bis zu 250 bar betrieben und somit entsprechend große Gasvolumina vorgehalten werden können /KUR 07/.

Bergbehördliche und gebirgsmechanische Vorgaben zur Größe, Form und Ausdehnung einer Kaverne erfordern nicht nur während der Solphase, sondern auch nach Abschluss und Fertigstellung der Kaverne Überwachungsmessungen, i. d. R. durch Ultraschallvermessung. Diese finden in regelmäßigen Abständen zur Überprüfung eventueller Veränderungen und zur Gewährleistung der Standsicherheit der Kaverne statt /TRY 01/.

### **3.4.5 Stilllegung/Endverwahrung**

Die Kaverne wird im Normalfall mit Süßwasser oder Sole bzw. nicht gesättigter Salzlösung geflutet. Dieser Prozess erfolgt äußerst sorgfältig, um große Temperaturunterschiede von Sole und Gebirge, die in der entsprechenden Teufe Spannungsänderungen hervorrufen können, zu vermeiden, und damit die Integrität der später verschlossenen Kaverne nicht zu gefährden. Alternativ ist auch ein Einbringen von Verfüllstoffen (flüssig/granular) möglich.

Nach vollendeter Flutung/Verfüllung und Temperatenausgleich wird das Bohrloch mit einem Verschluss versehen. Unter optimalen Bedingungen, abhängig von der Hohlraumgeometrie und Teufenlage bleibt ein langzeitstabiles Flüssigkeitsvolumen bzw. Verfüllvolumen erhalten.

Um die Differenztemperatur zwischen Frischwasser oder Sole und Gebirge gering zu halten, wird auch die Möglichkeit in Betracht gezogen, die einzubringende Flüssigkeit

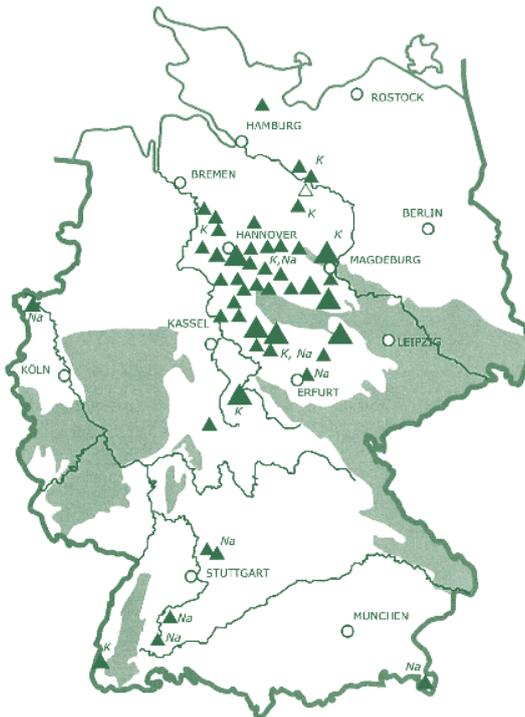
vorab zu erwärmen. Dies beinhaltet allerdings aufgrund der notwendigen Flüssigkeitsmengen einen erheblichen Einsatz von Energie.

Die Entwicklung von Verschlussystemen ist bislang noch nicht abgeschlossen. Prinzipiell gelten jedoch die gleichen Vorschriften wie bei der Verwahrung von Tiefbohrungen (s. Kapitel 3.3.4). Ein konkreter Ausführungsvorschlag ist beispielsweise /SCM 06/ zu entnehmen. Demnach ist die Verschlusskonstruktion so auszuführen, dass sie dauerhaft standsicher und dicht das Bohrloch sichert. Aus diesem Grund besteht jede Verschlusskonstruktion aus mindestens zwei Teilen: einem statischen Tragelement sowie einem Dichtelement. Die in /SCM 06/ vorgeschlagene Konstruktion stellt eine Variante aus vielen verschiedenen Möglichkeiten dar.

### **3.5           Auffahrung eines Bergwerkes**

#### **3.5.1        Allgemeines**

Entsprechend den verschiedenen Salzlagerstättenbildungen findet man heute in Deutschland Salzlagerstätten in einer Tiefe von 70 m bis über 1.000 m. Die verschiedenen Salzlagerstätten entstanden unter ariden Klimabedingungen, wie sie erdgeschichtlich in Mitteleuropa vor allem in Zeitabschnitten des Perm, des Mesozoikum und Tertiär vorherrschten. In Deutschland am weitesten verbreitet sind die Salzgesteine des Zechstein (Oberperm). Es handelt sich dabei um zyklische Abfolgen aus Tonen, Karbonaten, Sulfaten und Chloriden, wobei sieben Hauptzyklen (Z1 bis Z7) unterschieden werden können. Weitere auch wirtschaftlich genutzte Lagerstätten befinden sich im Bereich des Oberrheingrabens sowie alpidischen Raum (Berchtesgaden) (Abb. 3.9). Entweder wird Salz durch bergmännischen Abbau (trocken) oder durch Aussolung (nass) von unterirdischen Salzlagerstätten gewonnen. Die Salzproduktion liegt jährlich bei 14 Mio. Tonnen. Für die Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerks“ wird im Weiteren nur die trockene Gewinnung von Steinsalz betrachtet, während die solende Gewinnung durch die Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ mit erfasst ist.



**Abb. 3.9** Schematische Darstellung der Verteilung der Kali- und Steinsalzstandorte Deutschlands (aus /ZEI 06/)

### 3.5.2 Prospektion

Bei der überträgigen Erkundung von Salzlagerstätten werden generell folgende Messungen durchgeführt:

- Gravimetrische Messungen zur Detektion von Dichteunterschieden im Untergrund, die den Kontrast zwischen Salzvorkommen und den Deck- und Nebengesteinen auflösen sollen,
- Geoelektrik zur Detektion des Salzspiegels mit einer Tiefenauflösung von ca. 200 m – 300 m,
- Vibrationsseismik mit einer Tiefenauflösung von ca. 800 m – 900 m und
- Sprengseismik mit einer Tiefenauflösung von einigen 1.000 m.

Mit den genannten Methoden wird die Salzstockkontur inklusive der Randsenken erfasst. Nach den von Über tage ausgeführten Messverfahren wird bei entsprechendem Befund die Entscheidung zum Abteufen von Tiefbohrungen zur weiteren Erkundung getroffen. Hier ist die Festlegung eines Bohrrasters (z. B. 1 Bohrung/km<sup>2</sup>) über den

Salzstock üblich. Auch die Niederbringung einer Bohrung in den Salzstockkern ist gebräuchlich. Die Bohrungen werden im Bereich des Salzgesteins i. d. R. als Kernbohrungen ausgeführt. Im Hinblick auf Planung, Betrieb und Stilllegung einer Prospektionsbohrung und die eingesetzten Messverfahren sei auf die entsprechenden Ausführungen zur Basisaktivität „Abteufen einer Erkundungsbohrung“ in Kapitel 3.3 verwiesen. Bei Prospektionsbohrungen für Bergwerke im Salz wird allerdings eine Endteufe von 1.500 m nicht überschritten, weil unterhalb dieser Teufe aufgrund der hohen Umgebungstemperaturen und der Konvergenz sowie aufgrund von betrieblichen Temperaturlimits, z. B. für Elektronik, kein wirtschaftlicher Bergwerkbetrieb möglich ist.

### **3.5.3 Planung und Konstruktion**

Nach der Standorterkundung und der Entscheidung für die Errichtung eines Bergwerkes erfolgt in der Planungsphase neben einer Vielzahl weiterer Vorarbeiten die Festlegung von Schachtansatzpunkten. Es werden bergrechtlichen Vorschriften zufolge mindestens zwei Schächte eingeplant. Bei geringeren Abbauteufen ist auch die Entscheidung für die Errichtung einer Rampe möglich. Im Regelfall ist davon auszugehen, dass die Schachtansatzpunkte für die Salzförderung zentral zur Lagerstätte gewählt werden. Neben den genannten praktischen und sicherheitstechnischen Aspekten spielen vor allen Dingen auch die vorliegenden Standortgegebenheiten eine wesentliche Rolle. So können sich z. B. topografische und infrastrukturelle Randbedingungen oder vorliegende Schutzgebiete bzw. Schutzgüter auf die Wahl der Schachtansatzpunkte auswirken.

Vor Abteufen des Schachtes erfolgt in der Mitte des vorgesehenen Schachtquerschnittes eine Vorbohrung. Diese Schachtvorbohrung wird mit Ausnahme der ersten Bohrmeter als Kernbohrung ausgeführt. Neben der geologischen Ansprache des Bohrkerns werden in der Vorbohrung durch den möglichen Einsatz einer Multi-Shot-Sonde die Lage und der Verlauf der Bohrung ermittelt. Es erfolgt jedoch auf alle Fälle eine Abweichungsmessung und die Prüfung auf Feuchtstellen bzw. Wasserzutritte.

Nach positivem Befund der Untersuchungsergebnisse und der Vorbohrung werden die Schächte abgeteuft. Die Endteufe hängt von einer Reihe von Faktoren, u. a. vom Salzspiegel, der Festlegung einer Schutzschicht von ca. 200 m – 300 m und von dem zu fördernden Salz (Kalisalz oder Steinsalz), ab. Hier wird, wie oben ausgeführt, allerdings nur noch auf Steinsalz abgehoben. Allgemein gilt jedoch, dass aus Kostengründen ein

möglichst flacher Abbau von Salz angestrebt wird. So wurden z. B. als orientierende Kosten für die Schachterstellung ca. 10.000 €/m angegeben. Daneben ergeben sich natürlich mit zunehmender Betriebsdauer des Bergwerks deutlich höhere Kosten z. B. für den Transport des abgebauten Salzes bei einer größeren Abbauteufe im Vergleich zu einem flachen Abbau. Aus den genannten Gründen wird das Bergwerk in aller Regel von den oberen zu den unteren Abbauschichten hin entwickelt.

#### **3.5.4 Betrieb**

Um Salz bergmännisch zu gewinnen, werden u. a. aus sicherheitstechnischen Überlegungen (zweiter Fluchtweg) zur Erschließung der Lagerstätten mindestens zwei Schächte niedergebracht, die Untertage durch Strecken miteinander verbunden werden. Hiervon ausgehend erfolgt die Salzgewinnung durch Bohr- und Sprengarbeit bzw. mit schneidenden Verfahren.

Bei dem Abbau von Salz sind nach §224 ABVO (Allgemeine Bergverordnung, 1996) Sicherheitsabstände vorzusehen. So ist z. B. zu den Salzstockflanken ein Abstand von 150 m einzuhalten. Ein Sicherheitsabstand zu den Schächten ist nicht explizit festgelegt, jedoch werden auch hier ausreichende Distanzen (Schachtsicherheitspfeiler) zur Schachtsicherung eingehalten.

Der Salzabbau orientiert sich vorwiegend nach den vorliegenden homogenen Strukturen der Salzablagerungen und nach den genannten Sicherheitsabständen. Die Abbausteuerung wird in Abhängigkeit von betriebsbegleitenden geophysikalischen Messungen vorgenommen.

Im Salzbergbau Deutschlands ist insbesondere die Sprengtechnik etabliert. Zur Vorbereitung werden Bohrlöcher von ca. 7 m Länge in das Salz getrieben und mit Sprengladungen versehen. Zur Herstellung der Sprenglöcher dienen elektrohydraulisch arbeitende Bohrwagen. Der Sprengstoff (in der Regel Ammoniumnitratsprengstoff) wird in loser Form mit Hilfe von Sprengstoffladegeräten mit Druckluft in die Bohrlöcher eingebracht und dort elektrisch gezündet.

Bei jeder ausgelösten Sprengung fallen mehr als 400 t Salz an. Das gelöste Steinsalz wird entweder von dieselbetriebenen Frontschaufelfahrladern mit Nutzlasten bis 18 t oder mit Elektrohydraulik-Baggern in Kombination mit dieselbetriebenen Absetzmul-

den-Kippen mit Nutzlasten bis 50 t abgefahren. Das Steinsalz wird Untertage zerkleinert und dann über Förderbänder zum Förderschacht transportiert.

Bei der schneidenden Gewinnung werden elektrohydraulisch arbeitende Streckenvortriebsmaschinen, die mit zwei bzw. vier Schneidrotoren (sog. Continuous Miner oder Teilschnittmaschinen) und mit Schrämketten ausgerüstet sind, eingesetzt.

Das geförderte Steinsalz wird auf mechanischem Wege durch Brechen, Mahlen u. a. aufbereitet und so für die weitere Verarbeitung vorbereitet. Zur Qualitätssicherung werden Proben entnommen und im Labor analysiert. Es werden die für Salz üblichen qualitätssichernden Analyseverfahren eingesetzt. Hierzu gehören z. B. die optische Begutachtung auf Unreinheiten, die Bestimmung des NaCl-Gehaltes und der übrigen Mineralbestandteile. Im Zuge der Standarduntersuchungen wird jedoch nicht auf Radioaktivität geprüft.

### **3.5.5 Stilllegung**

Die Stilllegung von Salzbergwerken sieht in der Regel eine Nassverwahrung vor, bei der das Bergwerk geflutet wird (vorgeschrieben in Niedersachsen) und die Schächte durch komplexe Verschlussbauwerke verschlossen werden. Hydraulische Kurzschlüsse von Grundwasserstockwerken sind im Bereich der Grundwasserstauer durch geeignete Abdichtmaßnahmen (z. B. unter Einsatz von Zementen oder Tonen) zu unterbinden. Neben der Nassverwahrung besteht auch die Möglichkeit, ein Salzbergwerk trocken zu verwahren /KIß 08/. Ein Beispiel hierfür ist das ehemalige Kalibergwerk Salzdetfurth, bei dem entsprechende Schachtabdichtungen einen Zutritt von Lösungen in die Grube unterbinden. Die Kammern wurden verfüllt wohingegen die Strecken offen blieben /WIL 08/.

## **4 Identifizierung von Szenarien menschlichen Eindringens in das Endlager**

Wie oben ausgeführt, wird in den Sicherheitsanforderungen die Untersuchung zum menschlichen Eindringen in ein Endlager anhand stilisierter Szenarien (HI-Szenarien) gefordert. Die stilisierten Szenarien erheben nicht den Anspruch, umfassend und sicherheitstechnisch für alle möglichen Fälle menschlichen Eindringens abdeckend zu sein. Vielmehr werden unter Beachtung des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik und unter Zugrundelegung heutigen menschlichen Handelns typische menschliche Aktivitäten am Standort identifiziert, die das Potenzial des Eindringens in das Endlager haben. Dabei sollte das Spektrum der daraus festzulegenden HI-Szenarien sinnvoll begrenzt werden /BEU 09/, /BEU 10/.

Zur Identifizierung von HI-Szenarien für den Standort Gorleben werden die in Kapitel 1 beschriebenen Basisaktivitäten herangezogen und deren Eindringpotenzial in das Endlager analysiert. Hierzu werden die Indikatoren für eine mögliche Detektion des Endlagers bzw. der vom Endlager und dem Abfall induzierten Auffälligkeiten ermittelt.

Für die Untersuchung der Basisaktivitäten sind jeweils Fallunterscheidungen notwendig, die den möglichen unterschiedlichen Eindringorten und Nutzungsarten der jeweiligen Aktivität Rechnung tragen. Darüber hinaus werden Fallunterscheidungen unter Einbeziehung der zeitlichen Entwicklung des Endlagersystems durchgeführt. Es werden unterschiedliche Zeitpunkte für das Eintreten der Basisaktivität im Rahmen der Fallbetrachtung berücksichtigt. Weiterhin wird vorgegeben, dass das Wissen um den Endlagerstandort Gorleben 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers verlorengegangen ist.

Diejenigen Fälle, die unter Annahme heutiger Techniken ein Eindringpotenzial und damit mögliche Konsequenzen aufweisen, bilden die Grundmenge für die festzulegenden HI-Szenarien. Hierbei muss nicht zwingend jeder Fall der Grundmenge als HI-Szenarium betrachtet werden. So können z. B. abdeckende Fälle oder Fälle, die aufgrund ihrer Entwicklung ähnlich sind, als repräsentative Fälle für HI-Szenarien herangezogen werden.

Anhand der Basisaktivitäten werden die Möglichkeiten einer Detektion von Anomalien bzw. Auffälligkeiten diskutiert. Diese Diskussion wird bei der Ausformulierung der HI-

Szenarien einbezogen. Außerdem gibt sie Aufschluss über mögliche Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen.

Das Endlager in tiefen geologischen Schichten in der Nachverschlussphase bietet zwar an der Erdoberfläche keinen sichtbaren Hinweis auf seine Präsenz wie etwa ein Bauwerk, hinterlässt aber für die Nachwelt einige Spuren in Form etwa anomaler bzw. nicht zu erwartender Umgebungseigenschaften im tiefen Untergrund. Solche mit einem Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle verbundenen Anomalien sind:

- Porositäts-, Permeabilitäts- und Dichteunterschiede, hervorgerufen durch Auffahrarbeiten und das Einbringen von Versatz,
- radioaktive Direktstrahlung in unmittelbarer Umgebung der Abfallgebände,
- Temperaturerhöhung im Bereich der wärmeentwickelnden Abfälle über ca. 1.000 Jahre und
- Existenz von formationsfremdem Material wie Behälter, Kokillen, Beton, radioaktiver Abfall usw.

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die o. g. Anomalien bis auf den letzten Punkt zeitlich begrenzt und bei den ersten beiden Punkten wenig stark ausgeprägt sind. So sind beispielsweise die Porositäts-, Permeabilitäts- und Dichteunterschiede bei versetzten Strecken mit Salzgrus gegenüber dem umgebenden festen Steinsalz aufgrund des geringen Streckenquerschnittes nur schwer zu detektieren. Darüber hinaus werden sich die Eigenschaften des Salzgrusversatzes aufgrund der Konvergenzvorgänge denen des festen Steinsalzes rasch annähern, so dass für Zeiträume kleiner 1.000 Jahre /BEU 12/ die genannten Unterschiede nicht mehr vorhanden oder wahrnehmbar sind. Im Zusammenhang mit der radioaktiven Direktstrahlung ist nur die Gammastrahlung relevant, die nur in unmittelbarer Nähe der Abfallbehälter als Anomalie zu erkennen sein dürfte. Darüber hinaus nimmt die Gamma-Aktivität schon nach wenigen 100 Jahren deutlich ab.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwiefern aufgrund der mit den Basisaktivitäten verbundenen vorlaufenden Untersuchungen, technischen Abläufen und Verfahren entsprechende Anomalien grundsätzlich detektiert werden könnten.

Im Folgenden werden die Basisaktivitäten nach der oben beschriebenen Vorgehensweise untersucht.

## **4.1 Erkundungsbohrung**

Für den Standort Gorleben wird die Basisaktivität „Abteufen einer Bohrung“ unterstellt. Je nach Lokation des Bohransatzpunktes besteht hierbei die Möglichkeit des Eindringens in den ewG. Für Bohrungen, die außerhalb des ewG gestoßen werden, wird ein Einfluss auf den ewG nicht unterstellt bzw. sie werden in ihren Auswirkungen durch das Szenarium des direkten Anbohrens des ewG abgedeckt. Daher werden sie im weiteren Vorgehen nicht weiter betrachtet. Das Eindringen in den ewG birgt sicherheitliche Implikationen und wird weiter verfolgt.

### **4.1.1 Detektion eines Endlagers durch übertägige Untersuchungen**

Erkundungsbohrungen werden vorrangig im Zusammenhang mit der Prospektion auf Erdöl-, Erdgas- und Salzlagerstätten gesehen. Darüber hinaus stehen Erkundungsbohrungen mit der Kavernen- und Bergwerkserrichtung, Geothermie und Speichernutzung in Verbindung. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass Erkundungsbohrungen auch zu wissenschaftlichen Zwecken niedergebracht werden.

Die Suche nach geeigneten Standorten für die Gewinnung von Bodenschätzen und geothermischer Energie sowie die Nutzung des Speichervermögens bestimmter Gesteine ist mit einem hohen finanziellen Risiko und Aufwand verbunden. Zur Minimierung des Risikos werden vor der Entscheidung der Niederbringung von Erkundungsbohrungen umfangreiche Untersuchungen mit dem Ziel der Eingrenzung von lagerstätten- bzw. nutzungshöffigen Gebieten durchgeführt.

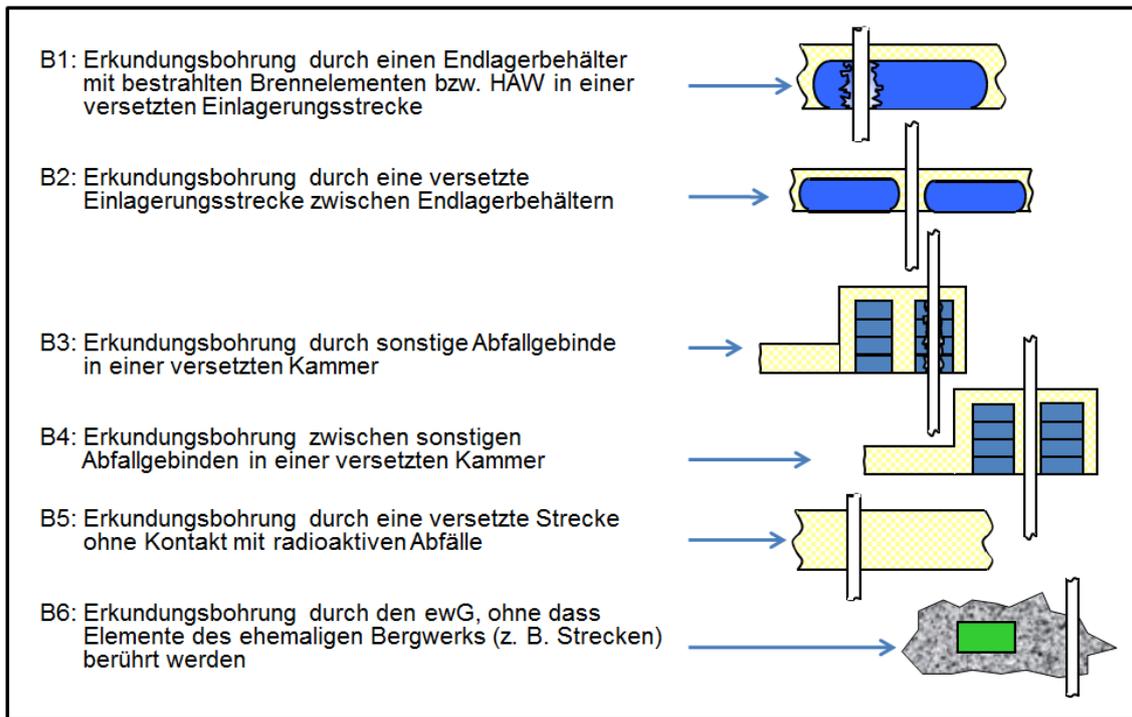
Ein erster Schritt zur Auffindung geeigneter Bohransatzpunkte ist die Sichtung von geologischen Aufzeichnungen, Karten und geologischen Aufschlüssen Übertage sowie die Recherche der Schichtenverzeichnisse bereits durchgeführter Tiefbohrungen. Begleitend dazu erfolgt die Auswertung von Luftaufnahmen. Zur Identifikation günstiger Untergrundstrukturen werden verschiedene geophysikalische Messmethoden eingesetzt, die in Kapitel 3.3.2 beschrieben wurden.

In der Diskussion mit Fachleuten aus der Industrie (s. Anhang A) und der Behörden über die Möglichkeit der Entdeckung des Endlagers wurde festgestellt, dass mit den genannten Methoden der übertägigen Erkundung die Salzstruktur inklusive der Randsenken erfasst würde. Jedoch würden das Endlager und insbesondere die Behälter

aufgrund der Tiefe und der damit einhergehenden Signaldämpfung durch überlagernde Schichten nicht als anthropogene Anomalie detektiert.

#### **4.1.2 Detektion eines Endlagers beim Abteufen einer Bohrung**

Im Folgenden wird der Frage nach einer möglichen Detektion der Anomalien beim Niederbringen einer Erkundungsbohrung nachgegangen. Dabei muss zur weiteren Bearbeitung der Fragestellung, ob die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Endlagers hoch ist bzw. welche Optimierungsmöglichkeiten bestehen, um die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu erhöhen, eine Fallunterscheidung vorgenommen werden. Aus der Vielzahl potenzieller Eindringorte in den ewG lassen sich im Hinblick auf die aus dem Eindringen resultierenden Konsequenzen im Wesentlichen sechs unterschiedliche Möglichkeiten ableiten. Diese sind in Abb. 4.1 schematisch dargestellt. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Fälle danach, ob ein Endlagerbehälter getroffen wird, ob die Bohrung in unmittelbarer Nähe von den Abfällen das Endlager durchteuft oder ob der ewG durchteuft wird, ohne dass Elemente des ehemaligen Bergwerks (z. B. Strecken) berührt werden. Im Prinzip können alle der dargestellten Fälle auftreten, es wird jedoch darauf verzichtet, eine relative Häufigkeit der Fälle unter Einbeziehung unterschiedlicher Flächenverhältnisse von Behältern, Einlagerungsstrecken, Strecken ohne Abfallbehälter und der Bereiche außerhalb von Strecken zu bestimmen. Aufgrund fehlender Prognosemöglichkeit sind alle Fälle hinsichtlich ihres Eintretens als gleichwertig zu betrachten.



**Abb. 4.1** Fallunterscheidungen (B1 bis B6) für die Basisaktivität „Abteufen einer Bohrung“

### Fallunterscheidungen

In der weiteren Bearbeitung zur Beantwortung der übergeordneten Fragestellung nach einer möglichen Detektion von Anomalien wurden Diskussionen mit Fachleuten aus der Industrie und der Behörde geführt, um den Stand von Wissenschaft und Technik bei der Ausführung von Erkundungsbohrungen zur eruieren (s. Kapitel 3.3).

Die Ergebnisse aus dem Gespräch mit Vertretern von Bergbauunternehmen, die in einem Gesprächsvermerk in abgestimmter Form festgehalten wurden, sind im Anhang A.1 wiedergegeben. Im Nachfolgenden werden die wesentlichen Aussagen zur Detektionswahrscheinlichkeit der vom Endlager ausgehenden Auffälligkeiten herausgestellt.

Aus den Fachgesprächen haben sich folgende Indikatoren herauskristallisiert, die zur Identifizierung von Auffälligkeiten genutzt werden können:

- (1) hoher Verschleiß an der Bohrausrüstung (Bohrkrone, Bohrmeißel), Änderung des Bohrvortriebs infolge Auftreffens auf einen Abfallbehälter,

- (2) Spülflüssigkeitsverlust,
- (3) Auffälligkeiten im Bohrklein, in Bohrkernen oder in der Spülflüssigkeit,
- (4) physikalische Anomalien in der Bohrlochumgebung (Dichte, Porosität, Temperatur, natürliche Radioaktivität, usw.) und
- (5) Untersuchung der Bohrlochgeometrie (lichte Weite, Neigung usw.).

Im Folgenden werden die Kernaussagen der Diskussion hinsichtlich der Detektion von Auffälligkeiten genutzt und auf die Fallunterscheidungen angewendet.

**Zu (1)** Bei Unterstellung von weitgehend intakten, dickwandigen Pollux-Behältern (Fall B1, Abb. 4.1) wird der Bohrmeißel bei dem Auftreffen auf die Behälterwand aus Stahl ab einer Wandstärke größer 2 cm entweder unbrauchbar gemacht oder stark abgelenkt. In jedem Fall erfolgt eine Unterbrechung bzw. eine erhebliche Verminderung des Bohrvortriebes. Beides würde umgehend registriert und entsprechende Untersuchungen (s. obige Liste Punkt (4) ggf. auch (3) nach sich ziehen. Dieser Fall gilt nicht beim Antreffen von dünnwandigen Behältern für vernachlässigbar wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (B3). Hier kann eher eine Beschleunigung des Bohrfortschrittes auf gering verdichtetes Material erhöhter Porosität hinweisen (s. obige Liste Punkt (2))

**Zu (2)** Im Prinzip ist mit dem Durchteufen einer Schicht mit erhöhter Porosität zusätzlich zu einem erhöhten Bohrfortschritt auch ein höherer Spülverlust verbunden. Bei einer versetzten Einlagerungsstrecke bzw. Kammer (B2, B4, B5) wird die Detektionswahrscheinlichkeit der Anomalie aufgrund von Spülverlusten als gering eingeschätzt, da zum Zeitpunkt  $t > 500$  Jahre die Kompaktion des Versatzes weit fortgeschritten ist. Hier gilt analog zur o. g. 3D-Seismik, dass die Detektionswahrscheinlichkeit mit fortschreitendem Konvergenzprozess des Einlagerungsbereiches weiter abnimmt. Das Anbohren einer Einlagerungsstrecke nur im versetzten Bereich, d. h. zwischen den Behältern (B2, B4), würde bei der Verwendung von Versatzmaterial mit gleicher Beschaffenheit wie dessen Umgebung sowie ähnlicher Dichte und Porosität vermutlich nicht bemerkt.

**Zu (3)** Beim Abteufen der Bohrung wird das ausgespülte Bohrklein regelmäßig von Geologen vor Ort bewertet. Artfremdes Material, wie es beim Anbohren von Abfallbehältern (B1, B3) oder technischen Bauwerken mit artfremdem Material angetroffen würde, würde mit großer Sicherheit bemerkt und die Hinweise auf eine Anomalie oder

anthropogene Tätigkeiten würden wahrgenommen. Das Gleiche gilt für die zu weiteren Untersuchungen entnommenen Bohrkerne (hierbei würde ebenfalls die Durchörterung von nicht vollständig kompaktiertem Versatz (B2, B4) bemerkt). Von einem Endlager ausgehendes artfremdes Material in den Bohrkernen würde mit hoher Wahrscheinlichkeit bemerkt und weitere Untersuchungen auf Herkunft eingeleitet. Das am Bohrplatz angesammelte Bohrklein wird auf eine Deponie verbracht. Bei der Deponieannahme werden Proben entnommen und die mineralogische Zusammensetzung im Labor untersucht. Die Identifizierung von bis dahin unentdecktem kontaminiertem Material wird als sehr wahrscheinlich angesehen. Gleiches gilt für die Verbringung der Spülflüssigkeit.

**Zu (4)** Von einem Endlager ausgehende Auffälligkeiten sind etwa Temperaturentwicklung, Gamma-Strahlung, Dichteänderung. So würde eine vorliegende ionisierende Strahlung durch das zur Standardmessung gehörende Gammalog identifiziert, wenn die Bohrung in unmittelbarer Nähe der Behälter steht. Ebenfalls würden erhöhte Temperaturen gegenüber der im Normalfall vorliegenden Umgebungstemperatur, erzeugt durch den wärmeentwickelnden Abfall, bemerkt, wenn der Zeitpunkt kleiner 1.000 Jahre nach Verschluss des Endlagers liegt. Weitere zum Standard gehörende Methoden wie Dichtelog, Soniclog und Widerstandslog können ebenfalls zur Detektion von Anomalien bzw. unerwarteten Eigenschaften beitragen. Es ist davon auszugehen, dass Anomalien in den Fällen B1 bis B4 durch die vorliegenden Auffälligkeiten in der Erkundungsbohrung detektiert werden.

Im Fall B6, bei dem die Bohrung abgeteuft wird, ohne dass Elemente des ehemaligen Bergwerks berührt werden, ist davon auszugehen, dass das Endlager als Anomalie nicht detektiert wird, da die Einlagerungsstrecken für eine Detektion durch geophysikalische Messungen zu weit entfernt sind und auch sonst keine Hinweise auf die Existenz von anthropogenen Einflüssen (z. B. erhöhte Porosität in versetzten Strecken) vorliegen.

**Zu (5)** Während des Abteufens einer Bohrung wird begleitend die Bohrlochneigung (Inklination) aufgenommen. Im Fall B1 ist von einer Ablenkung der Bohrung bei Unterstellung eines intakten Behälters auszugehen. Diese Auffälligkeit würde mit Sicherheit bemerkt. Für den Fall B3, ebenfalls bei Unterstellung von Behältern bzw. Gebinde die einen gewissen Widerstand darstellen, ist eine Ablenkung der Bohrung nicht auszuschließen. Aufgrund der geringen Behälterwandstärke und dem zu unterstellenden frühzeitigen Ausfall der Behälter aufgrund der Konvergenz des Steinsalzes ist eine

entsprechende Auffälligkeit nur schwach ausgeprägt bzw. für eine im Verhältnis zum Nachweiszeitraum geringe Zeitphase latent.

#### **4.1.3 Ableitung eines stilisierten Szenariums zur Basisaktivität „Abteufen einer Bohrung“**

Aus den Analysen der Bohr- und Untersuchungsaktivitäten im Rahmen einer Erkundungsbohrung kann festgestellt werden, dass beim Anbohren eines Abfallbehälters und anschließendem Gamma-Log das Endlager als Anomalie und Gefährdungspotenzial von den Handelnden erkannt wird. Gleiches gilt, wenn die Bohrung die Behälter lediglich tangiert. Die Registrierung der Temperaturanomalie ist auf einen Zeitraum von ca. 1.000 Jahren beschränkt. Eine ähnliche Zeitspanne gilt für die Erkennung des Versatzes aufgrund seiner, gemessen am intakten Salzgestein, höheren Porosität (Spülverlust, Dichteunterschied) in den Einlagerungsbereichen.

Zusammenfassend kann ein stilisiertes Szenarium „Erkundungsbohrung“ abgeleitet werden:

Es wird eine verrohrte Erkundungsbohrung durch die Salzstruktur Gorleben niedergebracht, die innerhalb des ewG liegt und nicht zur Entdeckung des Endlagers führt.

Das stilisierte Szenarium „Erkundungsbohrung“ fließt auch in die Behandlung der weiteren Basisaktivitäten ein (Kapitel 4.2 und 4.3). Die weitere Diskussion des HI-Szenariums orientiert sich an den Fällen B1 bis B6.

Bei einer zukünftigen Prospektion auf Kohlenwasserstoffe sind Erkundungsbohrungen, die in das Rotliegende unterhalb der Salzstockbasis abgeteuft werden könnten, denkbar. Im Bereich der Salzstruktur ist ein Ausbau der Bohrung erforderlich, um einem ungewollten Verschluss des Bohrlochs durch Konvergenz des Salzes zu begegnen. Das Salz wird dabei die Verrohrung von außen fest umschließen. Eine Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager während der Betriebszeit der Förderbohrung würde damit unterbunden. Selbst wenn man unterstellt, dass im Zuge der Stilllegung der Bohrung die Verrohrung gezogen würde, so müsste das Bohrloch gemäß /OCZ 98/ wenigstens im Hangenden und Liegenden der Salzstruktur mit besonderen Verfüllungstrecken von mindestens 100 m Länge im Salz und 50 m im Nebengestein versehen werden (s. Kapitel 3.3.4). Es müssen daher weder während des Betriebes noch nach Stilllegung der Bohrung langfristig wirkende Freisetzungen mit erheblichen Auswirkun-

gen unterstellt werden. Sicherheitsrelevante Szenarien ergeben sich somit nur für die Phase des Abteufens der Förderbohrung.

## **4.2 Kaverne**

Für den Standort Gorleben wird die Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ berücksichtigt. Eine Beeinträchtigung des ewG ist je nach Ansatzpunkt, geplanter Teufe und Abmessung einer Kaverne möglich. Je nach Nutzungsart (z. B. Speicherung und Salzgewinnung) der Kaverne kann der Einfluss auf das Endlagersystem unterschiedlich sein.

Bei einer geplanten Kaverne zur Deponierung von Rest- und Abfallstoffen bzw. zur Endlagerung radioaktiver oder chemisch toxischer Abfälle ist davon auszugehen, dass eine umfassende Standortuntersuchung erfolgt und dabei ein aus der Vergangenheit angelegtes Endlager entdeckt würde. Diese Nutzungsart der Kaverne wird daher nicht weiter betrachtet.

Darüber hinaus ist es durchaus üblich, an einem Standort mehrere Kavernen zu errichten. Für die hier zugrundeliegende Zielsetzung ist dieser Umstand nicht relevant, da sich durch die Betrachtung einer oder mehrerer Kavernen grundsätzlich keine unterschiedlichen möglichen Optimierungsmaßnahmen ergeben werden. Daher wird im Folgenden nur von einer Kaverne ausgegangen.

Bei der hier zu untersuchenden Basisaktivität bestehen prinzipiell zwei Möglichkeiten des Eindringens in den ewG: Einerseits durch Prospektionsbohrungen, die im Vorfeld der Standorterkundung abgeteuft werden. Sofern durch die Erkundungsbohrungen das Endlager nicht als Anomalie identifiziert wurde, besteht andererseits die Möglichkeit des Eindringens in den ewG im Zuge der Aussolung der Kaverne. Da die sicherheitsrelevanten Aspekte im Zusammenhang mit menschlichem Eindringen in das Endlagersystem durch Erkundungsbohrungen bereits umfassend in Kapitel 4.1 abgehandelt wurden, beschränken sich die weiteren Betrachtungen hauptsächlich auf den Aspekt des menschlichen Eindringens in den ewG durch das Anlegen, den Betrieb und die Stilllegung einer Kaverne innerhalb der Salzstruktur Gorleben.

#### **4.2.1 Detektion eines Endlagers durch übertägige Untersuchungen**

Die Aussage aus Kapitel 4.1.1 zu den Möglichkeiten einer Detektion des Endlagers durch übertägige Untersuchungen gelten entsprechend für Untersuchungen auf geeignete Kavernenstandorte. Zur Erforschung der geologischen Strukturen werden im Vorfeld der Erstellung von Kavernen standardmäßig gravimetrische, geoelektrische und seismische Messungen durchgeführt (vgl. Kapitel 3.4.2).

#### **4.2.2 Detektion eines Endlagers während der Errichtung und des Betriebs einer Kaverne**

In der weiteren Bearbeitung wird der Frage nach dem Eindringpotenzial und einer möglichen Detektion der durch das Endlager und den Abfall induzierten Anomalien bzw. Auffälligkeiten beim Anlegen und Betrieb einer Kaverne nachgegangen. Hinsichtlich der Klärung der Fragestellungen sind Fallunterscheidungen vorzunehmen. Im Hinblick auf die Einwirkung auf den ewG lassen sich verschiedene Grundtypen unterscheiden, die in Abb. 4.2 schematisch dargestellt sind. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Fälle danach, ob durch die Erstellung der Kaverne der ewG direkt (Fälle K1 – K3) betroffen ist oder indirekt (Fall K4) betroffen werden könnte.

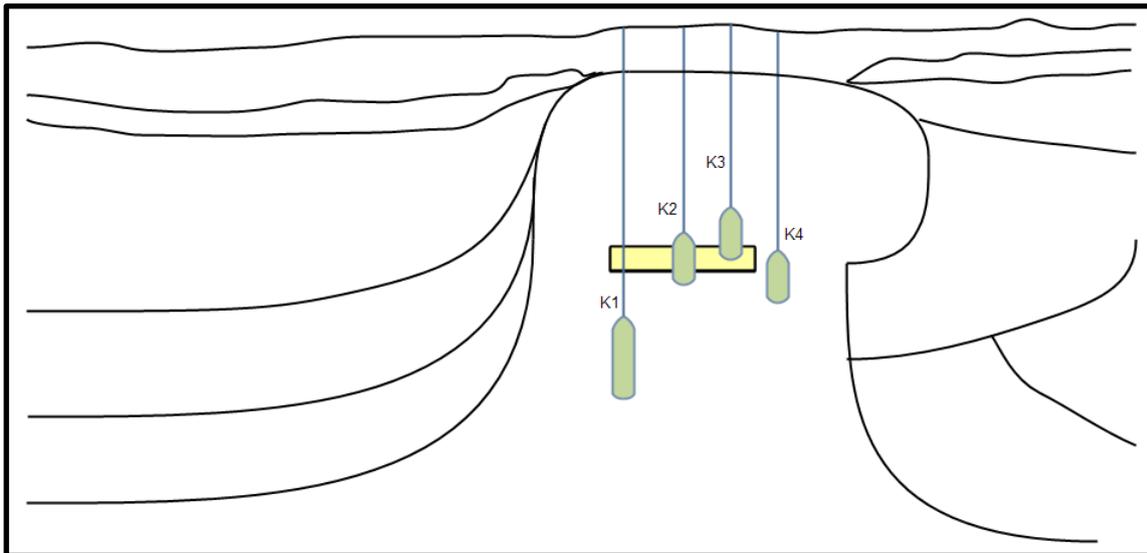
##### **Fallunterscheidungen**

Im **Fall K1** liegt zwar die Kaverne außerhalb des ewG, jedoch durchteuft die Zuleitung zur Kaverne den ewG. Dieser Fall ist mit den Fällen B2, B5 oder B6 in Bezug auf das Abteufen einer Erkundungsbohrung vergleichbar (s. Kapitel 4.1.2 und Abb. 4.1). Aufgrund der Analogie wird der Fall abdeckend durch das aufgestellte HI-Szenarium zu den Erkundungsbohrungen sowie die folgenden Fälle K2 bis K4 behandelt. Eine gesonderte Betrachtung des Falles K1 erübrigt sich daher.

Der **Fall K2** beschreibt die Erstellung einer Kaverne, die in vertikaler Richtung den gesamten ewG überstreicht. Dadurch könnten auch aufgrund der üblichen Abmessungen

von Kavernen und der geplanten Variante B1<sup>4</sup> /BOL 11/ mehrere Einlagerungsfelder betroffen sein.

Der **Fall K3** ist ähnlich wie der Fall K2 gelagert. Hier durchteuft die Kaverne jedoch nicht den gesamten ewG in vertikaler Richtung, sondern löst den ewG teilweise an, ohne sich auf die Einlagerungsfelder zu erstrecken. Aus der Sicht möglicher resultierender Konsequenzen wird der Fall K3 durch den Fall K2 abgedeckt.



**Abb. 4.2** Fallunterscheidungen (K1 bis K4) für die Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ (gelber Bereich symbolisiert den ewG)

Im **Fall K4** ergeben sich keine direkten sicherheitstechnischen Konsequenzen für das Endlagersystem, da kein Eingriff in den ewG erfolgt. Allerdings wird im Umfeld des ewG das weitere Wirtsgestein, welches eine zusätzliche Barriere darstellt, durch den Solprozess zur Kavernenerstellung beeinträchtigt. Die im Zuge einer Stilllegung der Kaverne üblicherweise vorgenommene Flutung mit Frischwasser oder ungesättigter Salzlösung führt darüber hinaus zu erheblichen Lösungsvorkommen im Umfeld des ewG. Darüber hinaus ist vorstellbar, dass es aufgrund von erstellungs-, betriebs- oder nachbetriebsbedingten Umständen zu einer Verbindung zwischen dem ewG und der Kaverne kommen kann. Da der Fall K4 aus sicherheitstechnischer Sicht durch den Fall

---

<sup>4</sup> Die Variante B1 (Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen in selbstabschirmenden Endlagerbehältern in horizontalen Strecken) ist nicht mit der Fallunterscheidung B1 der Erkundungsbohrung zu verwechseln.

K2, bei dem die Kaverne den ewG vollständig durchteuft, abgedeckt wird, bleibt der Fall K4 im Folgenden unberücksichtigt.

Der Fall, dass eine Kaverne den Bereich der Schächte des Endlagers erfasst, ist nicht zu unterstellen, da nach den Standortkriterien zur Erstellung einer Kaverne nur homogene Salzvorkommen (hier Hauptsalz der Staßfurtfolge) vorzusehen sind.

Aus den oben angeführten Gründen wird der Fall K2 abdeckend für die Fälle K1, K3 und K4 betrachtet.

In der weiteren Bearbeitung zur Beantwortung der o. g. Fragestellung nach einer möglichen Detektion von Auffälligkeiten beim Anlegen und Betrieb einer Kaverne wurden Diskussionen mit Fachleuten aus der Industrie und der Behörde geführt (s. Kapitel 3.4).

Die Ergebnisse aus dem Gespräch mit Vertretern des Kavernenbaus und der Bergbehörde, die in einem Gesprächsvermerk in abgestimmter Form festgehalten wurden, werden im Anhang A.3 wiedergegeben.

Aus den Fachgesprächen haben sich folgende Indikatoren herauskristallisiert, die zur Identifizierung von Auffälligkeiten genutzt werden könnten:

- (1) Speicherverluste aufgrund von Wegsamkeiten durch Altbergbau,
- (2) Druckabfall bei dem Antreffen von Hohlräumen,
- (3) Druckspitzen, hervorgerufen z. B. durch ein Rutschen oder Herabfallen eines Brennelementbehälters in den Kavernensumpf und
- (4) Strukturunterschiede bzw. Objekte (z. B. Endlagerbehälter) bei der standardmäßigen Aufnahme der Kavernenkontur durch Sonarmessung.

Weiterhin wurde aus der fachlichen Diskussion deutlich, welche folgenden möglichen Gegebenheiten bzw. Auffälligkeiten durch die Verfahrensschritte bei der Erstellung einer Kaverne oder begleitenden Untersuchungen vermutlich nicht detektiert werden (s. auch Anhang A.3):

- Die Zusammensetzung der gefördertten Sole wird nur auf gelöste Salze (Anionen, Kationen), Feststoffe und pH-Wert, nicht jedoch auf Radioaktivität geprüft. Eine mögliche radioaktive Kontamination der Sole würde daher bei der standardmäßig durchgeführten labortechnischen Qualitätssicherung nicht detektiert.

- Die vom Abfall ausgehende Wärmeentwicklung wird sich auf die im Solprozess eingesetzten großen Wassermengen nicht merklich auswirken, so dass die Temperaturanomalie vermutlich unerkant bleibt.
- Bei einem undichten oder defekten Behälter, der sich in der Kaverne befindet, würden radioaktive Gase austreten und zum Kavernentop aufsteigen und sich mit dem Sperrmedium (meist Stickstoff oder Öl) der Kaverne, dem sog. Blanket, vermischen. Die Radioaktivität im Blanket würde vermutlich nicht detektiert.
- Bei der Speicherung von gasförmigen Medien in den Kavernen, z. B. Erdgas, werden Proben entnommen und analysiert, die aber eine Detektion von Gasen, die durch Endlagerkomponenten freigesetzt würden, nicht erwarten lassen. Untersuchungen auf Radioaktivität finden nicht statt.

Im Folgenden werden die Kernaussagen der Diskussion hinsichtlich der Detektion von Auffälligkeiten herangezogen und auf den Fall K2 abgebildet:

**Zu (1)** Die in der Anfangsphase nach Stilllegung des Endlagers bestehenden Wasserwegsamkeiten beziehen sich auf die Auflockerungszone im Salz aufgrund von Auffahrungen und dem noch nicht ausreichend kompaktierten Salzgrusversatz der Grubenbaue. Mit fortschreitender Zeit werden sich diese Wegsamkeiten aufgrund von Ausheilungsprozessen in der Auflockerungszone und der durch Konvergenzprozesse bedingten Kompaktion des Salzgrusversatzes weitgehend zurückbilden bzw. reduzieren. Aus den genannten Gründen und unter Einbeziehung des frühestmöglichen Eindringzeitpunktes von 500 Jahren ist mit keinen merklichen Speicherverlusten während eines Kavernenbetriebs zu rechnen.

Größere Speicherverluste können sich allenfalls im Infrastrukturbereich des Endlagers ergeben, da dieser mit Schotter verfüllt ist. Dieser Bereich würde allerdings für einen Kavernenstandort nicht in Betracht gezogen, da er außerhalb ausgedehnter homogener Steinsalzvorkommen liegt.

**Zu (2)** Analog zu (1) ist von keinen durch das Endlager resultierenden Hohlräumen auszugehen, die einen merklichen Druckabfall durch das Anlegen oder den Betrieb einer Kaverne hervorrufen. Einzige Ausnahme ist wiederum der Infrastrukturbereich, der mit setzungsarmem Schotter verfüllt ist. Dieser Bereich ist jedoch, wie bereits beschrieben, zur Errichtung einer Kaverne nicht geeignet.

**Zu (3)** Endlagerbehälter, die durch den Solprozess beim Anlegen einer Kaverne freigelegt werden und in den Kavernensumpf abrutschen oder absinken, verursachen möglicherweise aufgrund des Behältergewichtes einen Druckimpuls, der sich registrieren lässt.

**Zu (4)** Im Kavernensumpf liegen normalerweise die unlöslichen bzw. schwerlöslichen Bestandteile des Steinsalzes, z. B. Anhydrit, die bei dem Solprozess anfallen, vor. Bei Vorliegen eines oder mehrerer Endlagerbehälter im Kavernensumpf aufgrund des Solprozesses (s. Zu (3)), könnten diese, bei der vorgegebenen regelmäßig durchzuführenden Aufnahme der Kavernengeometrie durch Sonarmessungen als strukturfremde Objekte wahrgenommen werden.

#### **4.2.3 Ableitung eines stilisierten Szenariums zur Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“**

Zusammenfassend kann ein stilisiertes Szenarium „Kavernenerstellung“ für die Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ abgeleitet werden:

Es wird nach vorheriger Standorterkundung und einleitender Erkundungsbohrung, die später für den Solprozess mit entsprechenden Rohrtouren ausgebaut wird, eine Kaverne im Salzstock Gorleben zum Zwecke der Speicherung (Erdöl, Erdgas, Wasserstoff, Druckluft) oder Salzgewinnung gesolt, die den ewG komplett durchteuft und damit auch Einlagerungsfelder erfasst. Die Standorterkundung und die Erkundungsbohrung führen nicht zur Entdeckung des Endlagers. Für die Kaverne sind heute übliche Abmessungen und Betriebszeiten anzusetzen.

Das hier definierte HI-Szenarium geht davon aus, dass die nach heutigen Maßstäben durchzuführenden Standorterkundungen für die Errichtung einer Kaverne umfassend erfolgen. Auffälligkeiten in dieser Phase würden zu weiteren klärenden Untersuchungen führen. Die weitere Diskussion des HI-Szenariums orientiert sich an dem Fall K2.

Neben den überragenden Verfahren zur Standorterkundung erfolgt mindestens eine Erkundungsbohrung, die später bei entsprechender Eignung des Standortes zur Solung der Kaverne ausgebaut wird. Hinsichtlich der Bohrung, die zur Solung der Kaverne niedergebracht wird, ist das entsprechende HI-Szenarium unter Kapitel 4.1.3 (Erkundungsbohrung) zugrunde zu legen und zu untersuchen. Mögliche Auffälligkeiten bei der Erkundungsbohrung (vgl. Kapitel 4.1.2) würden ebenfalls weitere Untersuchungen

zur Klärung nach sich ziehen. Die weitere Abfolge der Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ wäre dann nicht mehr zu unterstellen.

Für das HI-Szenarium ist daher getrennt voneinander die Phase der Erstellung der Kaverne durch den Solprozess und die Phase des Kavernenbetriebs zu diskutieren. Die Inhalte der Diskussion sind auf mögliche Konsequenzen und eine mögliche Detektion von Auffälligkeiten unter Berücksichtigung von üblichen bautechnischen, konzeptionellen, betrieblichen und begleitenden Arbeitsschritten der Basisaktivität auszurichten.

Die Erstellung einer Kaverne ist von der Nutzungsart relativ unabhängig, d. h., die Arbeitsschritte im Rahmen des Solverfahrens sind prinzipiell gleich. Der Betrieb einer Kaverne ist allerdings stark abhängig vom späteren Verwendungszweck. Hier sind die entsprechenden Unterschiede auszuarbeiten.

Unter Einbeziehung möglicher in Kapitel 3.4.3 genannter Kavernenabmessungen (z. B. Durchmesser von 40 m bis 100 m) und den Planungen zur Streckenlagerung am Beispiel von POLLUX-10-Behältern /BOL 11/ könnten durch den Solprozess aus einer orientierenden Betrachtung maximal 25 Behälter aus drei Einlagerungsstrecken betroffen sein. Hierbei wurde wie im HI-Szenarium „Erkundungsbohrung“ unterstellt, dass bei der Bohrung keine Anomalie detektiert wird. Bei den anderen Abfällen und Abfallbehältern wird sich die maximal mögliche Anzahl betroffener Behälter durch den Solprozess aufgrund kürzerer Strecken- und Behälterabstände noch vergrößern (s. Tabelle 4.5 in /BOL 11/).

Abschließend ist auch die Phase nach der Stilllegung der Kaverne hinsichtlich möglicher Konsequenzen und einer Detektion von Auffälligkeiten zu diskutieren.

### **4.3 Bergwerk**

In Bezug auf die identifizierten derzeitigen menschlichen Aktivitäten ist im Hinblick auf das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in den ewG die Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerkes“ zu betrachten. Wie bereits in Kapitel 3.5.1 beschrieben, wird im Weiteren für diese Basisaktivität die trockene, mechanische Gewinnung von Salz betrachtet, während die nasse Gewinnung durch Solung durch die Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ mit erfasst ist. Darüber hinaus wird die Errichtung eines Bergwerkes zur Deponierung von Rest- und Abfallstoffen bzw. zur Endlagerung radioaktiver Abfälle

oder chemisch toxischer Abfälle nicht weiter betrachtet, da davon ausgegangen werden kann, dass zur Vermeidung von Kontaminationen des Untergrundes eine lückenlose Standortuntersuchung erfolgt und dabei ein aus der Vergangenheit angelegtes Endlager mit hoher Wahrscheinlichkeit entdeckt würde.

Prinzipiell bestehen bei dieser Basisaktivität zwei Möglichkeiten des Eindringens in den ewG: Einerseits durch Prospektionsbohrungen, die im Vorfeld der bergmännischen Auffahrungen des Bergwerks zum Zwecke der Lagerstättenerkundung niedergebracht werden. Sofern durch die Erkundungsbohrungen das Endlager nicht als Anomalie identifiziert wurde, besteht andererseits die Möglichkeit des Eindringens in den ewG durch die bergbaulichen Aufschlussarbeiten selbst. Da die sicherheitsrelevanten Aspekte im Zusammenhang mit menschlichem Eindringen in das Endlagersystem durch Erkundungsbohrungen bereits umfassend in Kapitel 4.1 abgehandelt wurden, beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf den Aspekt des menschlichen Eindringens in den ewG durch die untertägigen bergbaulichen Aktivitäten, d. h. durch die Auffahrung von Richtstrecken und Abbaukammern innerhalb der Salzstruktur Gorleben.

#### **4.3.1 Detektion eines Endlagers durch übertägige Untersuchungen**

Bezüglich der Möglichkeiten der Detektion des Endlagers durch übertägige Untersuchungen gelten die Aussagen in Kapitel 4.1.1 für Erkundungsbohrungen entsprechend. Hiernach kann zusammenfassend gefolgert werden, dass mit den genannten Prospektionsmethoden zwar die Salzstruktur inklusive der Randsenken erfasst würde, das Endlager und insbesondere die Behälter aufgrund der Tiefe und der damit einhergehenden Signaldämpfung durch überlagernde Schichten nicht als anthropogene Anomalie detektiert würden.

#### **4.3.2 Detektion eines Endlagers bei Auffahrung und Betrieb eines Bergwerks**

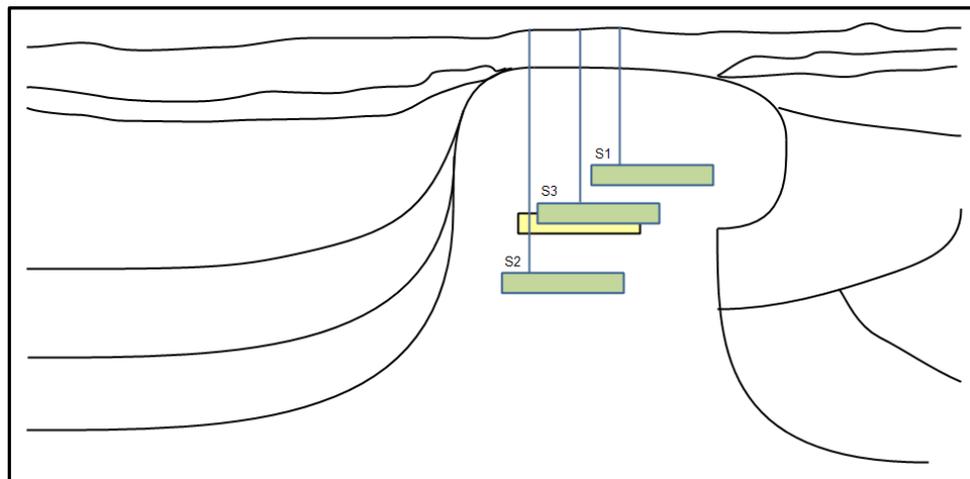
Im Weiteren wird der Frage nach einer möglichen Detektion der Anomalien im Zuge des Abteufens von Schächten sowie des Auffahrens von Richtstrecken bzw. Abbaukammern nachgegangen. Dabei wird wie bei den anderen Basisaktivitäten auf Ergebnisse aus Gesprächen mit Vertretern von Bergbauunternehmen zurückgegriffen, die im Gesprächsvermerk in Anhang A.2 wiedergegeben sind. Im Nachfolgenden werden die

wesentlichen Aussagen zur Detektionswahrscheinlichkeit der vom Endlager ausgehenden Auffälligkeiten herausgestellt.

Im Hinblick auf die Fragestellung, wie hoch die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Endlagers bei diesen Tätigkeiten ist bzw. welche Optimierungsmöglichkeiten bestehen, um die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu erhöhen, muss analog zu den beiden anderen Basisaktivitäten eine Fallunterscheidung vorgenommen werden. Hierbei lassen sich im Hinblick auf die Frage, ob bzw. in welcher Weise der ewG beeinträchtigt wird, unterschiedliche Möglichkeiten ableiten, die in Abb. 4.3 dargestellt sind.

Die dargestellten Fallunterscheidungen lassen sich wie folgt beschreiben:

- S1: Auffahrung des Bergwerks außerhalb des ewG
- S2: Auffahrung des Bergwerks außerhalb des ewG, Schacht durchteuft den ewG
- S3: Auffahrung des Bergwerks innerhalb des ewG



**Abb. 4.3** Fallunterscheidungen (S1 bis S3) für die Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerks“

Im **Fall S1** ergeben sich keine direkten sicherheitstechnischen Konsequenzen für das Endlagersystem, da kein Eingriff in den ewG erfolgt. Allerdings wird im Hangenden des ewG das weitere Wirtsgestein, welches eine zusätzliche Barriere darstellt, durch die Hohraumauffahrungen beeinträchtigt. Die im Zuge der Stilllegung des Bergwerks üblicherweise vorgenommene Flutung des Bergwerks mit NaCl-Lösung führt darüber hinaus zu erheblichen Lösungsvorkommen im Hangenden des ewG. Da dieser Fall jedoch in sicherheitstechnisch wesentlich ungünstigerer Form durch den Fall S3, bei dem die

Auffahrungen direkt im Bereich des ewG liegen, abgedeckt wird, wird der Fall S1 im Nachfolgenden nicht separat behandelt.

Der **Fall S2** entspricht im Prinzip dem Fall einer Erkundungsbohrung, die den ewG durchteuft, ohne dass Elemente des ehemaligen Bergwerks (z. B. Strecken) berührt werden (vgl. Kapitel 4.1.2, Fall B6). Es ist aus den gleichen Gründen nicht davon auszugehen, dass das Endlagerbergwerk als Anomalie detektiert wird. Auch wenn der Durchmesser des Schachtes erheblich größer ist als der einer Erkundungsbohrung, sind die Konsequenzen mit jenen, die in Kapitel 4.1.2 beschrieben sind, vergleichbar. Aufgrund des Verschlusses der Schächte mit Abdichtungen zum Hangenden und Liegenden ist eine nachhaltige Schädigung wenig wahrscheinlich. Da dieser Fall sicherheitstechnisch wesentlich günstiger als Fall S3 ist, bleibt auch Fall S2 im Nachfolgenden unberücksichtigt.

Der **Fall S3** ist unter den o. g. Fällen der sicherheitstechnisch relevanteste. Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich daher hierauf. In Abhängigkeit davon, welche Teile des Einlagerungsbereiches angefahren werden, welche Auffahrungstechnik zur Anwendung gelangt und wie weit die Korrosion der Abfallbehälter fortgeschritten ist, lassen sich weitere Varianten ableiten.

Aus den Fachgesprächen haben sich folgende Indikatoren herauskristallisiert, die zur Identifizierung von Auffälligkeiten genutzt werden könnten:

- (1) Hoher Verschleiß an der Schneidrüstung (Schneidwerkzeuge, Fräskopf) und Stopp des Vortriebs bzw. Stopp des Bohrvortriebs bei der Erstellung von Sprengbohrlöchern
- (2) Freilegung von Behälteroberflächen
- (3) Beschleunigung des Bohrvortriebs bei der Erstellung von Sprengbohrlöchern infolge geringeren Bohrwiderstandes
- (4) Detektion von salzfremdem Material
- (5) Ggf. geophysikalische Anomalien in Auffahrungsrichtung

Weiterhin wurde aus der fachlichen Diskussion deutlich, welche der folgenden möglichen Gegebenheiten bzw. Auffälligkeiten durch die Verfahrensschritte bei der Errich-

tung eines Bergwerkes oder begleitenden Untersuchungen vermutlich nicht detektiert werden (s. auch Anhang A.2):

- Durch die Prospektionsbohrung würde das Endlager als Anomalie vermutlich nicht detektiert, soweit nicht direkt in die Einlagerungsbereiche bzw. direkt in einen Behälter gebohrt wird. Der Grund hierfür ist, dass die geophysikalischen Untersuchungsmethoden wie Gravimetrie und Geoelektrik in einem Bohrloch bei der Prospektion auf Salz nicht eingesetzt werden.
- Bevor der Schacht erstellt wird, erfolgt in der Mitte des vorgesehenen Schachtes eine Vorbohrung. Diese Bohrung wird mit Ausnahme der ersten Bohrmeter als Kernbohrung ausgeführt. Darüber hinaus werden Bohrlochmessungen hinsichtlich Verlauf, Abweichung usw. vorgenommen, die nicht zur Detektion von Anomalien führen.
- Von dem abgebauten Salz werden Proben entnommen und im Labor analysiert. Es werden die für Salz üblichen qualitätssichernden Analyseverfahren eingesetzt. Durch die Standardverfahren würden jedoch selbst für den Fall einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfallgebänden keine Radionuklide identifiziert.

Im Folgenden werden die Kernaussagen hinsichtlich der o. g. Indikatoren der Detektion von Auffälligkeiten unter Einbeziehung der Fallunterscheidung S3 diskutiert:

**Zu (1)** Üblicherweise werden bei dem Salzabbau in Bezug auf die Schneidtechnik sog. Continuous Miner oder Teilschnittmaschinen eingesetzt. Ein Auftreffen der rotierenden Schneidwerkzeuge bzw. des Fräskopfes auf einen intakten POLLUX-Behälter würde mit Sicherheit bemerkt. Auch das Auftreffen auf andere Behältertypen beinhaltet einen Vortriebswiderstand, der zur Wahrnehmung als Auffälligkeit führen kann. Die Wahrnehmung hängt in allen Fällen vom Behälterwiderstand und damit von der Festigkeitsbeschaffenheit der Behälter zum entsprechenden Eindringzeitpunkt ab.

Bei dem Sprengvortrieb werden zur Vorbereitung Bohrlöcher von ca. 7 m Länge in das Salz erstellt und mit Sprengladungen versehen. Für die Bohrtechnik gilt das Gleiche wie für die o. g. Schneidtechnik. D. h., bei einem Auftreffen des Bohrers auf die Behälter würde ein gegenüber dem Steinsalz erhöhter Widerstand bemerkt.

**Zu (2)** Bei beiden Techniken zur Streckenauffahrung (Schneid- und Sprengtechnik) besteht die Möglichkeit, dass Einlagerungsbehälter freigelegt werden. Mit dem Freilegen ist eine optische Detektion der Behälteroberflächen gegeben.

**Zu (3)** In der Anfangsphase nach Stilllegung des Endlagers ist der Salzgrusversatz der Grubenbaue noch nicht ausreichend kompaktiert. Mit fortschreitender Zeit werden sich diese Wegsamkeiten aufgrund von Ausheilungsprozessen in der Auflockerungszone und der durch Konvergenzprozesse bedingten Kompaktion des Salzgrusversatzes weitgehend zurückbilden bzw. reduzieren. Aus den genannten Gründen und unter Einbeziehung des frühestmöglichen Eindringzeitpunktes von 500 Jahren ist mit keinen merklichen Beschleunigungen des Bohrvortriebs aufgrund eines gegenüber Steinsalz weniger verfestigten Salzgrusversatzmaterials zu rechnen.

Im Bereich der Schächte und des ehemaligen Infrastrukturbereiches des Endlagers wird als Versatzmaterial nicht kompaktierbarer Schotter eingesetzt. Hier könnte sich ein veränderter Bohrvortrieb bemerkbar machen. Allerdings stellt der Schotter als artfremdes Material eine weitaus größere Auffälligkeit dar als ein möglicherweise veränderter Bohrvortrieb.

**Zu (4)** Im Bereich der Schächte und des ehemaligen Infrastrukturbereiches des Endlagers wird als Versatzmaterial nicht kompaktierbarer Schotter eingesetzt, der als artfremdes Material bei einem Auffahren von Hohlräumen bemerkt würde.

In bestimmten Bereichen des Endlagers verbleiben Verankerungen oder Einbauten, die nicht zurückgebaut werden. Solche Relikte könnten während des Salzabbaus detektiert werden.

Weitere Auffälligkeiten, die durch die Behälter gegeben sind, werden hier nicht näher diskutiert, da dieser Aspekt bereits angesprochen wurde (s. Zu (2)).

**Zu (5)** Der Salzabbau orientiert sich vorwiegend nach den vorliegenden homogenen Strukturen der Salzablagerungen und nach den geforderten Sicherheitsabständen z. B. zu den Salzstockflanken. Die Abbausteuerung wird dabei in Abhängigkeit von betriebsbegleitenden geophysikalischen Messungen vorgenommen. D. h., dass die Identifizierung nicht homogener Salzstrukturen einen starken Einfluss auf die Streckenführung des Salzabbaus hat und diese Strukturen möglicherweise umfahren werden.

Hierbei ist nicht davon auszugehen, dass dem Grund einer inhomogenen Struktur nachgegangen wird.

Eine weitere Auffälligkeit ist möglicherweise durch die wärmeentwickelnden Abfälle gegeben. D. h., eine Temperaturanomalie würde bei der Streckenauffahrung bemerkt werden. Allerdings liegen spürbare Temperaturunterschiede nur für einen begrenzten Zeitraum vor. Der Zeitraum wird durch die Rahmenbedingung, dass frühestens 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers ein menschliches Eindringen zu unterstellen ist, noch weiter eingeeengt. Darüber hinaus kann man davon ausgehen, dass durch die Erkundungsbohrungen eine vorliegende Temperaturanomalie bereits identifiziert worden wäre, da die Niederbringung einer Bohrung in den Zentralteil des Salzstockes bei der Erkundung des Standortes für den Abbau von Salz durchaus üblich ist.

#### **4.3.3 Ableitung eines stilisierten Szenariums zur Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerks“**

Aus den Fachgesprächen (s. Anhang A.2) und obigen Überlegungen wird für die Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerks“ das folgende stilisierte Szenarium „Bergwerkserrichtung“ abgeleitet:

Es wird nach vorheriger umfassender Standorterkundung und mehreren Erkundungsbohrungen, die teilweise später als Transport- und Bewitterungsschächte ausgebaut werden, ein Bergwerk im Salzstock Gorleben zum Zwecke des Abbaus von Salz errichtet, das den ewG und die Einlagerungsfelder erreicht. Die Standorterkundung und die Erkundungsbohrungen führen nicht zur Entdeckung des Endlagers. Für das Bergwerk sind ein Abbau von oberen nach unteren Sohlen sowie heute übliche Betriebszeiten anzusetzen.

Das definierte HI-Szenarium geht davon aus, dass die nach heutigen Maßstäben durchzuführenden Standorterkundungen für die Errichtung eines Bergwerkes umfassend erfolgen. Auffälligkeiten in dieser Phase würden zu weiteren klärenden Untersuchungen führen. Die weitere Diskussion des HI-Szenariums orientiert sich an dem Fall S3.

Neben den überragigen Verfahren zur Standorterkundung erfolgt eine Reihe von Erkundungsbohrungen. Einige Erkundungsbohrungen werden als Tiefbohrungen ausgeführt, wobei mindestens zwei Bohrungen bei entsprechender Eignung des Standortes

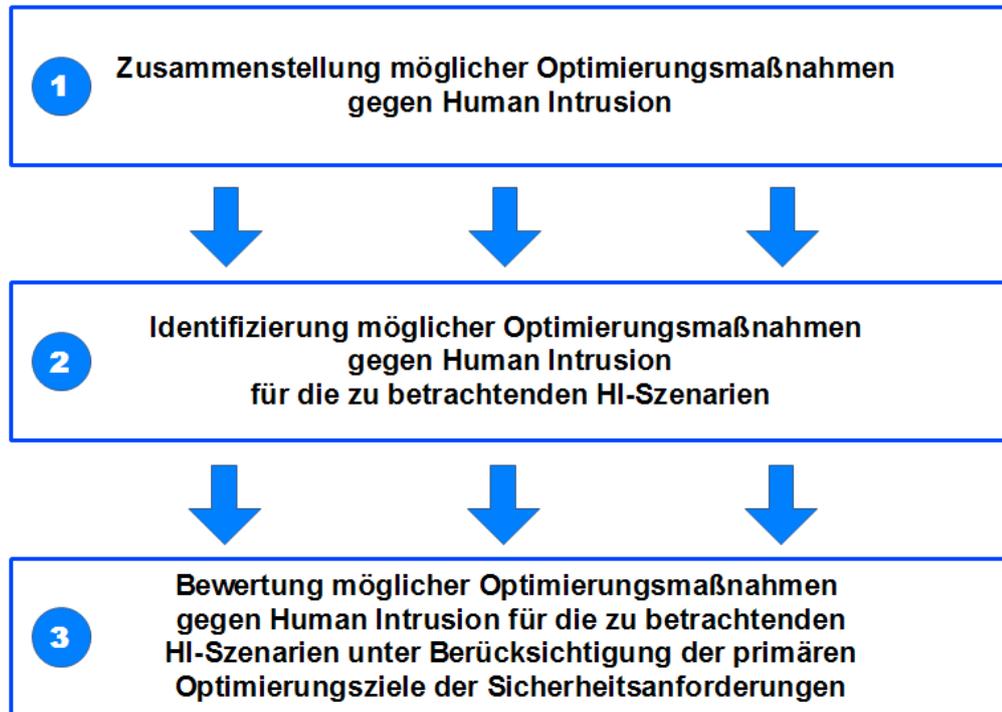
zum Schachtausbau genutzt werden. Hinsichtlich der Erkundungsbohrungen ist das entsprechende HI-Szenarium unter Kapitel 4.1.3 zugrunde zu legen und zu untersuchen. Mögliche Auffälligkeiten bei den Erkundungsbohrungen würden ebenfalls weitere Untersuchungen zur Klärung nach sich ziehen. Die weitere Abfolge der Basisaktivität wäre dann nicht mehr zu unterstellen.

Für das HI-Szenarium sind daher getrennt voneinander die Phase der Errichtung des Bergwerkes durch den Auffahrungsprozess und die Phase des Bergwerksbetriebs zu diskutieren. Die Inhalte der Diskussion sind auf mögliche Konsequenzen und eine mögliche Detektion von Auffälligkeiten unter Berücksichtigung von üblichen bautechnischen, konzeptionellen, betrieblichen und begleitenden Arbeitsschritten der Basisaktivität auszurichten.

Abschließend ist auch die Phase nach der Stilllegung des Bergwerkes hinsichtlich möglicher Konsequenzen und einer Detektion von Auffälligkeiten zu diskutieren.

## 5 Optimierungsmaßnahmen

Die Untersuchung der HI-Szenarien hinsichtlich der Identifizierung und Bewertung möglicher Optimierungsmaßnahmen erfolgt in drei Schritten (siehe Abb. 5.1).



**Abb. 5.1** Vorgehensweise bei der Ableitung und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen gegen Human Intrusion

In dem ersten Schritt werden mögliche Optimierungsmaßnahmen zusammengestellt, die sich auf die allgemeinen Optimierungsziele, Reduzierung der Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens und der radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung beziehen (Kapitel 5.1). Allerdings können für das unbeabsichtigte menschliche Eindringen in den ewG keine Wahrscheinlichkeiten im mathematischen Sinne ermittelt werden.

In dem zweiten Schritt wird für die in Kapitel 4 definierten HI-Szenarien geprüft, welche der in Kapitel 5.1 identifizierten Optimierungsmaßnahmen jeweils in Frage kommen (Kapitel 5.2).

Im dritten Schritt werden die für die HI-Szenarien in Frage kommenden Optimierungsmaßnahmen dahingehend untersucht, ob die Optimierungsmaßnahmen mit den primären Optimierungszielen der Sicherheitsanforderungen in Konflikt stehen (Kapitel 5.3).

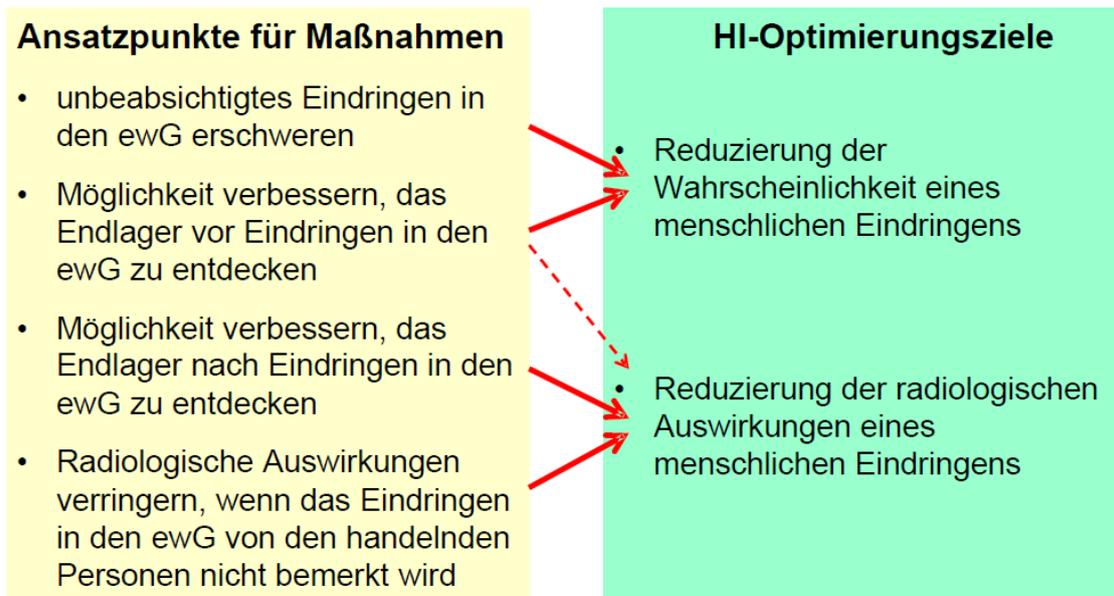
Besteht die Möglichkeit einer quantitativen Beurteilung des HI-Szenariums vor und nach der Berücksichtigung von Gegenmaßnahmen, ist der entsprechende Fall zu modellieren und zu analysieren. Hintergrund hierbei ist die Beurteilung des möglichen Optimierungserfolges z. B. durch Vergleich von geeigneten Indikatoren, die für den Zustand vor und nach der Berücksichtigung der Maßnahme zu quantifizieren sind.

In diesem Zusammenhang ist noch darauf hinzuweisen, dass in den Sicherheitsanforderungen des BMU (/BMU 10/, Absatz 6.5) für Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den ewG kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt wird.

## **5.1 Zusammenstellung möglicher Optimierungsmaßnahmen**

Die in der Vergangenheit geführten Fachdiskussionen über mögliche Maßnahmen zur Verhinderung eines menschlichen Eindringens in das Endlager oder zur Erhöhung der Entdeckungsmöglichkeit des Endlagers führten letztendlich zu der Erkenntnis, dass das Risiko des menschlichen Eindringens in ein Endlager nur bedingt reduziert werden kann /BEU 08/, /EUR 11/. Das verfolgte Konzept des Konzentrierens und des Isolierens der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen enthält inhärente Maßnahmen gegen Human Intrusion. Es reduziert einerseits den Platzbedarf eines Endlagers und erschwert aufgrund der Teufe den Zugang zu den Abfällen. Andererseits muss mit der Entscheidung für dieses Konzept zwangsläufig die Möglichkeit akzeptiert werden, dass im Falle eines Eindringens in das Endlager hohe radiologische Belastungen für die Handelnden entstehen können. Darüber hinaus gehende konstruktive Maßnahmen sind abhängig vom Wirtsgestein und den zugehörigen Endlagerkonzepten sowie von den zugrunde zu legenden HI-Szenarien.

Die generell möglichen Optimierungsmaßnahmen weisen unterschiedliche Ansatzpunkte auf und sie können, wie in Abb. 5.2 dargestellt, den allgemeinen HI-Optimierungszielen zugeordnet werden.



**Abb. 5.2** Mögliche Optimierungsmaßnahmen und Zuordnung zu den allgemeinen HI-Optimierungszielen

Bestimmte Optimierungsmaßnahmen zielen darauf ab, die in der Zukunft handelnden Personen darauf hinzuweisen, dass eine anomale Situation im tiefen Untergrund vorliegt, damit sie ihre weiteren Schritte entsprechend vorsichtig umsetzen.

Maßnahmen, die die Detektionsmöglichkeiten des Endlagers vor Eindringen in den ewG verbessern, sollen die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens reduzieren. Es wird angenommen, dass die dann handelnden Personen die Situation bewerten und anschließend weitere Tätigkeiten im tiefen Untergrund am Standort ohne Verletzung des ewG einstellen. Im weiteren Sinne ist durch eine frühzeitige Detektion einer Anomalie bei entsprechender Interpretation und daraus abgeleiteter Maßnahmen auch eine Reduzierung von radiologischen Konsequenzen gegeben.

Maßnahmen, die die Entdeckung des Endlagers bzw. seines Gefährdungspotenzials nach Eindringen in den ewG erleichtern, sind dagegen der Eingrenzung der radiologischen Auswirkungen zuzuordnen. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die dann handelnden Personen ihr jeweiliges Vorhaben aufgeben und durch geeignete technische Bauwerke für einen hochwertigen Verschluss des Zugangs in den ewG sorgen.

Andere Maßnahmen sollen dazu dienen, bei einem menschlichen Eindringen in den ewG ohne Entdeckung des Endlagers die potenziell resultierenden radiologischen

Konsequenzen durch konzeptionelle Maßnahmen zu begrenzen. Zu diesem Aspekt gehört auch, durch geeignete Maßnahmen den Zeitpunkt des Eindringens solange wie möglich hinauszuzögern.

Maßnahmen, die gegenwärtig schon der Planung und Konzeption eines Endlagers zugrunde liegen und einem zukünftigen menschlichen Eindringen entgegenwirken, sind ausgerichtet auf

- die Tiefenlage der Einlagerungsbereiche und
- einen möglichst langwährenden Informationserhalt zu Lage, Geometrie und Inventar des Endlagers. Hierbei muss sichergestellt werden, dass die Informationen über das Endlager und sein Gefahrenpotenzial erhalten bleiben und bei beabsichtigten Aktivitäten am Standort auch der handelnden Gesellschaft zur Kenntnis gelangen.

In /BUS 10/ sind potenzielle Maßnahmen, die in der Fachwelt diskutiert werden, zusammengestellt. Sie zielen in erster Linie auf die Erhöhung der Detektionsmöglichkeit des Endlagers ab, wie beispielsweise:

- Markierung mit starken Magneten
- Einsatz von Strahlen-Markern mit einer Auswahl von radioaktiven Isotopen
- akustische Warnsignale (z. B. starke Echos erzeugende Geräte)
- Kennzeichnung der Abfallcontainer mit Strahlenzeichen durch konventionelle pikto-graphische Mittel
- Einsatz von sphärischen Gegenständen, die geophysikalisch als anthropogene Anomalie detektiert werden können (auch als Markierung an der Oberfläche z. B. Verwendung einer großen Anzahl von Tonscherben bzw. Tonobjekten)
- Einsatz von Materialien, die einen Bohr- oder Vortriebsfortschritt zum Erliegen bringen bzw. erheblich erschweren
- Einsatz von Farbstoffen, die auf das Vorliegen einer (anthropogenen) Anomalie hinweisen

Einige dieser Maßnahmen sind aber erst nach einem menschlichen Eindringen in den ewG wirksam.

Eine weitere, jedoch zeitlich begrenzte vorbeugende Maßnahme, die international diskutiert wird, stellt die institutionelle Kontrolle dar. Eine Prognose der Wirksamkeit derartiger Überwachungsmaßnahmen über einen Zeitraum von mehr als 500 Jahren ist allerdings nicht möglich, da dies eine Vorhersage über die menschliche Gesellschaft und ihrer Verhaltensweisen über einen Zeitraum von mehr als 16 Generationen erfordern würde.

Darüber hinaus wird oftmals die Forderung erhoben, den Standort des Endlagers fernab von Ressourcen zu wählen /NEA 92/, /NEA 95/. Für die VSG stellt sich diese Maßnahme nicht, da der Standort vorgegeben ist. Jedoch ist in Bezug auf diese Maßnahme anzumerken, dass die Wertvorstellungen von Gütern, Rohstoffen und deren Bedarf über Zeiträume wie dem des Nachweiszeitraumes veränderlich sein können. D. h., Rohstoffe die aus heutiger Sicht für abbauwürdig bzw. erschließungswürdig empfunden werden, können zu einem späteren Zeitpunkt weniger bzw. nicht von Interesse sein und umgekehrt. Allerdings kann man davon ausgehen, dass sich die menschlichen Gewohnheiten und ihr Bedarf an heutigen Rohstoffen in einem kurzen Zeitraum nach Verschluss des Endlagers nicht grundlegend ändern werden. Diesem Aspekt kann möglicherweise durch entsprechende Vorkehrungen, die den Informationserhalt und das Wissen über den Endlagerstandort sichern, Rechnung getragen werden. Eine langfristige Prognose darüber, welche Substanzen bzw. Materialien von zukünftigen Generationen als Rohstoffe und Bodenschätze empfunden werden, ist jedoch nicht möglich /BEU 10/.

Es wurde systematisch der Frage nachgegangen, ob Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden können, die bei den zu betrachtenden HI-Szenarien das Erkennen des Endlagers als Anomalie und ggf. als Hinweis auf frühere anthropogene Eingriffe in den Untergrund (Altbergbau) erleichtern. Weiterhin wurde nach Maßnahmen gesucht, die im Falle der Nichtentdeckung des Endlagers in der Lage sind, die radiologischen Konsequenzen eines menschlichen Eindringens zu reduzieren. Denkbare Möglichkeiten zur Optimierung unter dem Gesichtspunkt des menschlichen Eindringens in ein Endlager sind in einer Tabelle (Anhang B) zusammengestellt worden. Die Tabelle, die auf der Grundlage einer Ideensammlung, den Fachgesprächen mit Vertretern aus der Industrie und Behörden und einigen Referenzen wie z. B. /BUS 10/ erstellt wurde, enthält neben der Zusammenstellung von möglichen Maßnahmen eine Reihe von Attributen, wie z. B. Art der Maßnahme, Wirkung und Nutzen, Aufwand, Handlung (passiv, aktiv), die die entsprechende Maßnahme charakterisieren und beurteilen helfen. Aus dieser

Zusammenstellung lassen sich fünf Hauptgruppen ableiten, denen die zusammengestellten Optimierungsmöglichkeiten zugeordnet werden konnten (siehe Abb. 5.3).

In den beiden Hauptgruppen „Information“ und „Überwachung“ sind Maßnahmen aufgeführt, die zu ihrer Umsetzung regulatorischer Vorgaben bedürfen. Von den fünf Hauptgruppen werden daher im Weiteren nur die „Konzeption“, „Konstruktion“ und „Indizierung“ für die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen betrachtet.

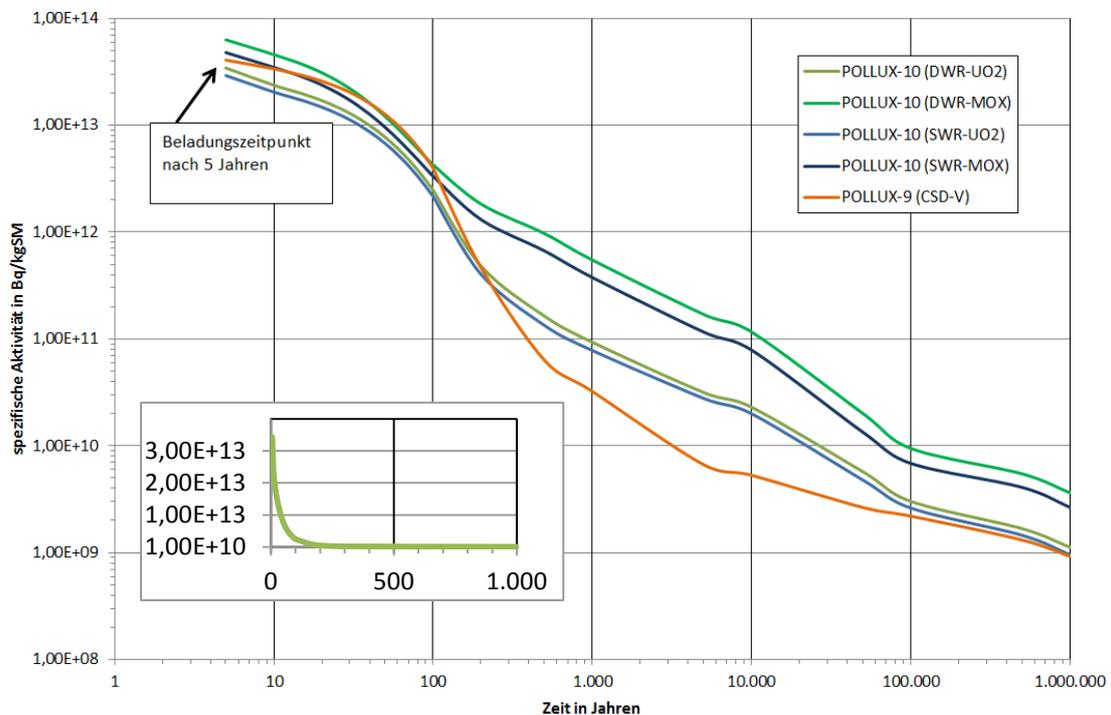


**Abb. 5.3** Darstellung der den Hauptgruppen zugeordneten möglichen Maßnahmen, die einem menschlichen Eindringen in ein Endlager entgegenwirken können

Auch wenn auf die beiden o. g. Hauptgruppen „Information“ und „Überwachung“ nicht mehr näher eingegangen wird, soll jedoch noch auf den Zeitfaktor hingewiesen werden, der maßgeblich für die Abnahme der Radioaktivität aufgrund des radioaktiven Zerfalls ist. Die Abb. 5.4 zeigt beispielhaft für verschiedene Beladungen des POLLUX-Behälters die Abnahme der Radioaktivität über der Zeit nach der Einlagerung. Die Datengrundlage wurde aus /PEI 11/ entnommen. Hier wird deutlich, dass insbesondere für die ersten ca. 1.000 Jahre die Abnahme der Radioaktivität signifikant ist, wobei in

der Anfangszeit die Aktivität überproportional abnimmt. Die Aktivität für den POLLUX-10 (DWR-UO2) beträgt beispielsweise nach 1.000 Jahren nur noch 0,27 % der ursprünglichen Aktivität nach Beladung (s. Ausschnitt in Abb. 5.4 mit linearen Achsen). Das bedeutet, dass informations- und wissenserhaltende Maßnahmen nicht nur den Zeitpunkt eines unbeabsichtigten Eindringens hinauszögern können, sondern auch zur Verringerung einer möglichen radiologischen Auswirkungen beitragen. Je länger informations- und wissenserhaltende Maßnahmen wirken, desto geringer ist die Aktivität der im Endlager noch vorhandenen Radionuklide, wenn es nach dem Verlust des Wissens um das Endlager zu einem unbeabsichtigten Eindringen in den ewG kommt.

**Spezifische Aktivität unterschiedlicher Beladungen von POLLUX-Behältern**



**Abb. 5.4** Doppelt-Logarithmische-Darstellung der Abnahme der spezifischen Aktivität von unterschiedlichen Beladungen des POLLUX-Behälters und Ausschnitt für den POLLUX-10 (DWR-UO2) mit linearen Maßstäben der Achsen (Datengrundlage nach /PEI 11/)

Von den zusammengetragenen möglichen Maßnahmen in den hier betrachteten drei Hauptgruppen hat die gewählte Endlagertiefe einen großen Einfluss auf die Möglichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens. Vorstellbar ist, das Endlager in einer Teufe zu errichten, in der ein menschliches Vordringen nur begrenzt vorkommt

und die Beweggründe für ein Vordringen in entsprechende Teufen stark reduziert sind. Andererseits ist der Wahl der Endlagerteufe aufgrund der primären Optimierungsziele, insbesondere Betriebssicherheit des Endlagers, Grenzen gesetzt.

## **5.2 Identifizierung von Optimierungsmaßnahmen für die stilisierten Szenarien**

Im Folgenden werden die definierten HI-Szenarien (s. Kapitel 4) einzeln im Hinblick auf Optimierungsmöglichkeiten gegen unbeabsichtigtes menschliches Eindringen behandelt. Die Maßnahmen wurden z. T. in Gesprächen mit Bergbaufirmen (Anhang A) entwickelt. Sie werden jedoch in diesem Kapitel noch nicht im Detail auf ihre langzeit- und betriebssicherheitlichen Konsequenzen und die technische Machbarkeit und ihre Wirksamkeit über sehr lange Zeiträume geprüft.

Allen HI-Szenarien ist gemein, dass ihnen Übertageerkundungen vorausgehen. Diese sind jedoch nicht in der Lage, das Endlager zu entdecken. Es lassen sich keine Optimierungsmaßnahmen ableiten, die zu einer Erhöhung der Erkennungswahrscheinlichkeit von Übertage führen.

### **5.2.1 Erkundungsbohrung**

Im Fall des HI-Szenariums „Erkundungsbohrung“ lassen sich Maßnahmen identifizieren, die das Erkennen eines Endlagers begünstigen. Hierzu zählen in erster Linie

- das Einbringen von Materialien, die dem Bohrfortschritt einen Widerstand entgegensetzen wie z. B.
  - höhere Behälterwandstärken,
  - Armierungen oder Matten aus Eisen im Bereich der Streckenfirste der ehemaligen Hohlräume des Endlagerbergwerks,
  - Gummimatten über dem Abfall und/oder der Einsatz von Basalt- oder Granitblöcken oder sonstigen Materialien im Streckenversatz,
- das Einbringen von optischen Erkennungsmerkmalen, wie etwa die Verwendung eines geeigneten Farbstoffs im Hohlraumversatz des Endlagers, welcher bei einer Bohrung im Rotary-Verfahren den Bohrschlamm signifikant verfärben würde.

Denkbar wäre der Einsatz von pulverförmigen Xanthenfarbstoffen (z. B. „Uranin“, dessen optische Nachweisgrenze bei Konzentrationen von etwa 0,1 mg/l liegt) bei dem bereits wenige Gramm ausreichen, um viele Kubikmeter der Bohrspülung in einem signifikanten Gelbton zu verfärben und

- das Einbringen weiterer hinweisgebender Indikatoren in die Erkundungssohle wie z. B. Magnete, akustische Signalgeber und sphärische Gegenstände.

Eine mögliche Maßnahme zur Reduzierung der radiologischen Konsequenzen nach dem Eindringen ohne Entdeckung des Endlagers zielt auf die Separierung der Abfälle ab. Im Prinzip enthält die Einlagerungsvariante AB1 schon eine Separierung der Abfälle in einen Südwestteil (Variante A), in dem die nicht wärmeentwickelnden Abfälle, und einen Nordostteil (Variante B1), in dem die wärmeentwickelnden Abfälle eingelagert werden. Um eine weitere Separierung vornehmen zu können, ist die Abtrennung einzelner Einlagerungsfelder oder auch Einlagerungsstrecken durch die Implementierung von Verschlussbauwerken (ähnlich den geplanten Verschlusspfropfen in den Querschlägen /BOL 11/) denkbar. Hierdurch würde bei einer Durchörterung eines Einlagerungsfeldes bzw. einer Einlagerungsstrecke durch eine Erkundungsbohrung maximal nur das jeweilige darin befindliche Nuklidinventar betroffen sein.

### **5.2.2 Kaverne**

Der einleitende Arbeitsschritt zur Erstellung einer Kaverne beginnt i. d. R. mit einer Erkundungsbohrung. Aus diesem Grund gelten die unter Kapitel 5.2.1 aufgeführten möglichen Optimierungsmaßnahmen auch für das HI-Szenarium „Kavernenerstellung“. Im Folgenden werden mögliche Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt, die sich auf den Prozess der Kavernenerstellung durch Aussolung und auf den Betrieb einer Kaverne unter Berücksichtigung der verschiedenen Nutzungsarten beziehen.

In Kapitel 4.2.2 wurden bereits Umstände bzw. Effekte genannt, die im Kavernenbau unerwünscht sind und nach Möglichkeit vermieden werden, und somit die Entdeckungswahrscheinlichkeit des Endlagers erhöhen. Hierzu gehört das Auftreten von Hohlräumen, die zu Speicherverlusten bei Speicherkavernen, z. B. bei der Lagerung von Erdöl führen. Darüber hinaus wird darauf geachtet, möglichst keine unlöslichen Schichten anzutreffen, die zu unvorhersehbaren Hohlraumgeometrien und größeren Rückständen im Kavernensumpf führen können.

- Unter Ausnutzung dieser Gegebenheiten sind bei der Errichtung des Endlagers verschiedene Maßnahmen unter Nutzung der Erkundungssohle denkbar. So könnten z. B. die Auffahrungen der Erkundungssohle mit setzungsarmem Schotter versetzt werden, um somit Hohlraum für Druckverluste und Speicherverluste im Kavernenbetrieb zu schaffen.
- Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Auffahrungen der Erkundungssohle mit geformten Blöcken aus Granit oder Basalt zu verfüllen, die durch einen möglichen Solprozess aufgrund ihrer unlöslichen bzw. schwerlöslichen Eigenschaft in den Kavernensumpf absinken bzw. abrutschen und dabei einen registrierbaren Druckimpuls auslösen können. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass diese Rückstände durch die regelmäßigen Sonarmessungen zur Aufnahme der Hohlraumgeometrie der Kaverne als artfremde Gesteine bemerkt werden. Die unnatürliche gleichmäßige Form der Blöcke könnte den Wahrnehmungskontrast noch verstärken.
- Eine weitere mögliche Maßnahme stellt ebenfalls auf nicht bzw. schwerlösliches und artfremdes Material ab. Die Grundidee dieser Maßnahme basiert auf dem diskutierten Endlagerkonzept der Lagerung in verrohrten Bohrlöchern. Wiederum ausgehend von der Erkundungssohle könnten Rohre mit einer Länge von jeweils mehreren 10 m lateral sowie in obere und/oder untere Schichten verlegt werden. Hierbei hat die Verlegung derart zu erfolgen, dass Sicherheitsabstände z. B. zu potenziell lösungsführenden Gesteinen eingehalten und keine Einlagerungsbereiche durchörtert werden. Derartige lange Rohre, die in eine Kaverne hineinragen oder sich gänzlich in der Kaverne befinden, stellen durch die o. g. Sonarmessungen erfassbare Objekte dar. Als zusätzliche Maßnahme ist vorstellbar, dass in die Rohre Farbindikatoren oder sonstige Indikatoren eingebracht werden.
- Hinsichtlich der Nutzung einer Speicherkaverne für Erdgas oder Wasserstoff ist vorstellbar, einen Indikator vorzusehen, der eine olfaktorische Wirkung entfaltet. D. h., hier könnten geruchsbildende Stoffe eingesetzt werden, die eine entsprechende Wahrnehmung auslösen könnten. Die Beimischung von sog. Odorierungsmitteln zum Erdgas wird in der Industrie bereits seit langem praktiziert, um somit mögliches austretendes Erdgas aus undichten Stellen (Lecks), das ansonsten geruchslos ist, wahrnehmen zu können.

- Weitere Indikatoren zielen auf akustische Signale und das Einbringen von starken Magneten ab. Außerdem könnten die bereits unter Kapitel 5.2.1 beschriebenen Farbindikatoren eingesetzt werden.
- Neben den bisher genannten Indikatoren sind auch solche vorstellbar, die bei Kontakt mit der Sole oder dem Speichermedium (Erdöl, Erdgas) eine intensive chemische Reaktion auslösen, z. B. Stoffe, die eine intensive Rauch- oder Nebelentwicklung entfalten, eine stark schäumende Wirkung haben oder Stoffe, die zu Verklumpungen bzw. Agglomeration führen.
- Als weitere Gruppe sind solche Stoffzusätze zu nennen, die sich qualitätsmindernd auf die Sole oder das Speichermedium auswirken. Hier sind Stoffe vorstellbar, die bereits in geringen Konzentrationen eine große Verunreinigung darstellen und nur mit einem erheblichen Aufwand eliminiert werden können. Z. B. wird die geförderte Sole oftmals in Produktionsprozessen von Chemiebetrieben eingesetzt. Eine verunreinigte Sole, die sich qualitätsmindernd auf den weiteren Herstellungsprozess auswirkt, würde auffallen.

Bei allen Maßnahmen, die sich auf Indikatoren beziehen, ist zu bedenken, dass für die Erstellung der Kaverne eine sehr große Menge an Wasser eingesetzt wird. Hier könnte es sein, dass durch den Solprozess die hinweisgebenden Indikatoren mit der Sole bereits, ohne ihre Wirkung entfalten zu können, fortgespült werden. Die Indikatoren sind daher entsprechend zu platzieren und zu fixieren. Außerdem müssen sie im Hinblick auf die erforderliche Menge für eine ausreichende Wahrnehmbarkeit noch praktikabel einsetzbar sein. Darüber hinaus ist auf ihre hohe Beständigkeit bzw. Lebensdauer zu achten. Neben den genannten Aspekten ist noch zu erwähnen, dass einige Indikatoren auch nur bei einer bestimmten Kavernennutzung bzw. einem bestimmten Speichermedium ihre Wirkung entfalten können.

### **5.2.3 Bergwerk**

Ähnlich wie im Fall des HI-Szenariums „Erkundungsbohrung“ lassen sich Maßnahmen identifizieren, die das Erkennen des Endlagers als (anthropogene) Anomalie begünstigen. Im Hinblick auf das Abteufen von Schächten bzw. Schachtvorbohrungen sei aufgrund der Gleichartigkeit des Eindringens (Intrusion von oben) auf die Ausführungen zum Szenarium „Erkundungsbohrung“ verwiesen. Darüber hinaus werden folgende Maßnahmen für aussichtsreich gehalten:

- Einbringen von Materialien, die dem Bohr- bzw. Vortriebsfortschritt einen Widerstand entgegensetzen.

Da der Bergbau im Steinsalz vorwiegend horizontal betrieben wird, müssten die Maßnahmen im Gegensatz zum Szenarium „Erkundungsbohrung“ nicht nur im Bereich der Firsten wirken, sondern auch gegenüber dem Eindringen in Strecken von der Seite her einen spürbaren Widerstand entgegensetzen. Hierbei könnten ausgewählte (s. u.) Grubenbaue des Endlagerbergwerks insbesondere durch das Einbringen von Basaltblöcken zusammen mit Salzgrus so versetzt werden, dass beim Anfahren der Einlagerungsbereiche sowohl den Bohrungen, die zur Erstellung von Sprengbohrlöchern als auch den Schneid- bzw. Fräswerkzeugen von Teil- bzw. Vollschnittmaschinen Widerstände entgegensetzen, die einen weiteren Vortrieb erschweren oder unterbinden würden.

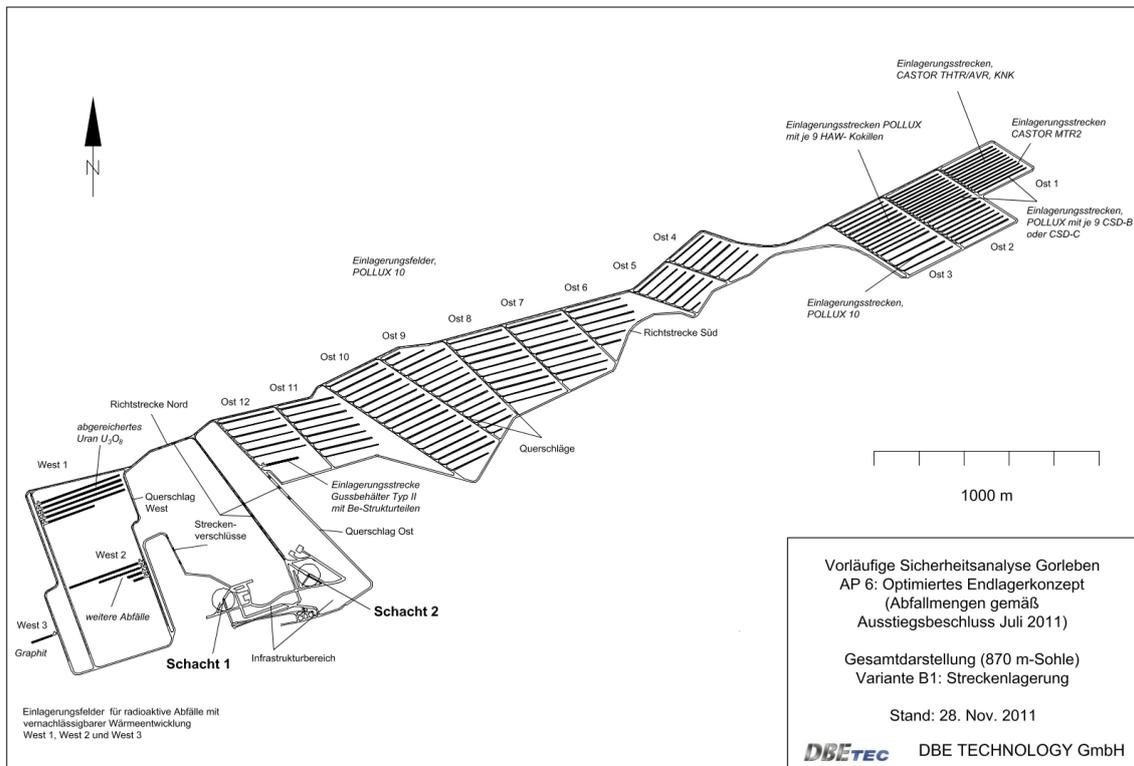
- Einbringen von optischen Erkennungsmerkmalen.

Auch gegenüber dem Anfahren von Einlagerungsstrecken wäre die Verwendung eines geeigneten gleichmäßig verteilten pulverförmigen oder feinkörnigen Farbstoffs bzw. angefärbten Salzgrusversatzes aussichtsreich für eine frühzeitige Detektion des Endlagers als Anomalie. Die Farbe müsste im starken Kontrast zur natürlichen Färbung des Salzes stehen. Denkbar wäre zudem die Kombination mit hydraulischen Farbstoffen wie Uranin, um gleichzeitig die Detektionswahrscheinlichkeit im Fall des Szenariums „Erkundungsbohrung“ zu erhöhen.

- Es wird angenommen, dass (wie im heutigen Bergbau üblich) das Salzbergwerk in Sohlen, die mit den Schächten in Verbindung stehen, von oben nach unten entwickelt wird. Auf den Sohlen selbst schreitet der Bergbau vorwiegend horizontal voran. Hierbei wäre es im Fall eines Endlagers mit Streckenlagerungskonzept prinzipiell ausreichend, die Richtstrecken und Querschläge mit den oben angeführten Materialien zu versehen, da diese die einzelnen Einlagerungsfelder umgeben. Somit müsste in jedem Fall zunächst eine Richtstrecke bzw. ein Querschlag durchstoßen werden, bevor eine Einlagerungsstrecke angetroffen wird (s. Abb. 5.5).

- Die Detektionsmöglichkeit kann dadurch erhöht werden, dass die projektierten Erkundungsstrecken, die ca. 30 m oberhalb des Einlagerungsbereiches liegen, ebenfalls mit vortriebshindernden und optisch auffälligen Materialien versetzt werden. Hierdurch könnten bei üblicher Abbautechnik die Indikatoren noch vor einer möglichen Erschließung des Einlagerungsbereiches des Endlagers erkannt und als Hinweise für Altbergbau gewertet werden. Die Intention hierbei ist, die handelnde bzw.

ausführende Personengruppe in ihren folgenden Aktionen auf die Identifizierung weiterer Auffälligkeiten zu sensibilisieren.



**Abb. 5.5** Grubenhohlräume des Endlagers /BOL 12/

In Kapitel 5.2.1 wurde die Maßnahme zur Separierung der Abfälle durch Verschlussbauwerke erläutert. Diese Maßnahme könnte auch bei der Errichtung eines Bergwerkes eine entsprechende Wirkung haben, wenn durch den Salzabbauprozess entsprechende Einlagerungsfelder bzw. Einlagerungsstrecken angefahren werden. Gleiches gilt für die ebenfalls in Kapitel 5.2.1 genannte Maßnahme, eine höhere Wandstärke der Abfallbehälter bzw. Abfallgebilde vorzusehen, die einen hohen Widerstand gegen Vortriebsmaschinen aufweisen.

Die in Kapitel 5.2.2 beschriebene Maßnahme, ausgehend von der Erkundungssohle in laterale sowie obere und untere Salzbereiche Rohre zu verlegen, stellt auch unter dem HI-Szenarium „Bergwerkerrichtung“ eine mögliche Optimierung gegen das menschliche Eindringen dar.

Neben den genannten konzeptionellen Maßnahmen sind eine Reihe weiterer Maßnahmen, die bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben wurden und sich auf die Berücksichti-

gung von Indikatoren beziehen, auch für den hier betrachteten Aspekt der Bergwerkserrichtung relevant. Zu nennen sind hier insbesondere Indikatoren, die geruchsbildend, rauch- und nebelentwickelnd sind, z. B. bei Kontakt mit Luftsauerstoff oder bei Lichteinfall.

Eine weitere ebenfalls beschriebene Maßnahme in Kapitel 5.2.2 bezieht sich auf die Qualitätsminderung, die in diesem Falle jedoch auf das Medium Salz abhebt. Die Intention hierbei ist, dass wegen der Auffälligkeit von einem weiteren Abbau von Salz in dem entsprechenden Bereich verzichtet und möglicherweise dem Grund der Qualitätsminderung nachgegangen wird.

Weitere Maßnahmen beziehen sich auf die Markierung und Kennzeichnung durch fluoreszierende Stoffe und die Aufstellung oder Anbringung von Warnhinweisen zur optischen Wahrnehmung z. B. in den Einlagerungsbereichen und an den Behältern.

### **5.3 Bewertung der identifizierten Optimierungsmaßnahmen**

In den folgenden Unterkapiteln werden die in Kapitel 5.2 für die stilisierten HI-Szenarien „Erkundungsbohrung“, „Kavernenerstellung“ und „Bergwerkserrichtung“ identifizierten Optimierungsmaßnahmen bewertet. Die Bewertung erfolgt unter der Berücksichtigung der primären Optimierungsziele: Strahlenschutz in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit des Endlagers, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie technische und finanzielle Realisierbarkeit (siehe Kapitel 2.1). Stehen sie im Konflikt mit den primären Optimierungszielen, sind sie als Maßnahme für ein mögliches Endlager am Standort Gorleben auszuschließen. Stehen sie nicht in Konflikt mit einem der primären Optimierungsziele, werden die Erfolgsaussichten dieser Maßnahmen bewertet.

#### **5.3.1 Erkundungsbohrung**

Für das HI-Szenarium „Erkundungsbohrung“ wurden in Kapitel 5.2.1 vier mögliche Maßnahmen identifiziert:

- (1) Einbringen von Materialien und Berücksichtigung höherer Behälterwandstärken, die dem Bohrfortschritt einen Widerstand entgegensetzen
- (2) Einbringen von optischen Erkennungsmerkmalen

- (3) Einbringen von hinweisgebenden Indikatoren in die Erkundungssohle, wie z. B. Magnete, akustische Signalgeber und sphärische Gegenstände
- (4) Separierung einzelner Einlagerungsfelder oder auch Einlagerungsstrecken durch die Implementierung von Verschlussbauwerken

**Zu (1)** Als Materialien, die dem Bohrfortschritt einen Widerstand entgegensetzen, werden sowohl Armierungen aus Eisen als auch Matten aus Eisen oder Gummi vorgeschlagen. Das Einbringen dieser Materialien steht nicht im direkten Widerspruch zu den primären Optimierungszielen Strahlenschutz in der Betriebsphase, Betriebssicherheit des Endlagers, Sicherheitsmanagement oder technische und finanzielle Realisierbarkeit. Allerdings werden durch solche Maßnahmen Stoffe in das Endlager eingebracht, die durch Korrosionsprozesse sowie mikrobielle Zersetzung zur Gasbildung führen können und damit bei der Langzeitsicherheit und der Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle zu berücksichtigen sind. Für die Strecken auf der Einlagerungssohle sind solche Maßnahmen daher zu verwerfen.

In den Strecken der Erkundungssohle ist der Einfluss solcher Prozesse auf die Langzeitsicherheit eher gering. Dort könnte man entsprechende Maßnahmen durchführen. Allerdings sind solche Maßnahmen mit einem hohen Aufwand verbunden. Der Nutzen dieser Maßnahmen ist dagegen ziemlich gering, da die aufgefahrenen Strecken auf der Erkundungssohle nur einen kleinen Anteil der horizontalen Fläche des Endlagers abdecken, die durch eine Erkundungsbohrung betroffen sein könnte. Zudem ist die Lebensdauer der eingebrachten Stoffe aus Eisen oder Gummi im Vergleich zum Nachweiszeitraum gering. Die Wahrscheinlichkeit, dass armierte oder mit Matten versehene Strecken entdeckt werden können, ist sehr gering.

Hinsichtlich der Behälterwandstärke ist festzustellen, dass eine noch höhere Wandstärke bei der Variante B1 nicht notwendig ist. Die Wandstärken, die derzeit vorgesehen sind, reichen aus, um ein Eindringen der Bohrkronen zu verhindern. Die Bohrung würde vermutlich bei einem Auftreffen auf einen Behälter abgelenkt werden. Bei der Variante C sind es die Bohrlochverrohrungen, die eine ausreichende Wandstärke aufweisen.

Darüber hinaus ist festzuhalten, dass eine weitere Erhöhung der Wandstärke auch mehr Nahrung für eine mögliche Korrosion bietet und somit zu einer höheren Gasbil-

dung führen kann. Dies ist bei der Betrachtung der Langzeitsicherheit und der Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle zu berücksichtigen.

Die Optimierungsmaßnahme ist auf Grund des Verhältnisses zwischen dem zu erwartenden hohen Aufwand und dem geringen Nutzen zu verwerfen.

Bei Vorliegen eines ausreichenden Informations- und Kenntnisstandes sowie angepasster Planungsdaten für die Variante A sollte diese Maßnahme mit dem Bezug zur höheren Behälterwandstärke noch einmal diskutiert werden.

**Zu (2)** Das Einbringen von optischen Erkennungsmerkmalen, z. B. einen Farbstoff in versetzte Strecken, ist nur dann eine wirksame Optimierungsmaßnahme, wenn bei einer Erkundungsbohrung Farbveränderungen im Spülversatz oder bei gekernten Bohrungen in den Bohrkernen identifiziert werden können. Wenn Stoffe verwendet werden, die weder einen signifikanten Einfluss auf das geochemische Milieu in den versetzten Strecken noch auf die Kompaktion des Versatzes haben, sind durch diese Optimierungsmaßnahme die primären Optimierungsziele nicht gefährdet. Dies gilt sowohl für die Strecken auf der Erkundungssohle als auch auf der Einlagerungssohle.

Wie im Falle der Einbringung von Armierungen oder Matten ist die mögliche zu markierende Fläche der versetzten Strecken klein, so dass auch die Möglichkeit, das Endlager bei einer Erkundungsbohrung in den ewG als Anomalie zu erkennen, gering ist. Zudem muss ein Indikator gefunden werden, der im Vergleich zum Nachweiszeitraum eine ausreichend lange Lebensdauer hat. Die Möglichkeit, dass optisch markierte Strecken bei einer Erkundungsbohrung entdeckt werden, ist daher gering, auch wenn alle Strecken der Erkundungs- und Einlagerungssohle markiert werden können.

Falls ein Farbstoff gefunden werden kann, der

- das geochemische Milieu nicht negativ beeinflusst,
- die Kompaktion des Salzgruses nicht beeinflusst und
- eine ausreichende Lebensdauer hat,

ist die Markierung der versetzten Strecken mit diesem Farbstoff ein Mittel, das aufgrund des zu erwartenden geringen Aufwandes bei der technischen Umsetzung eingesetzt werden kann.

**Zu (3)** Im Prinzip gilt für diese Optimierungsmaßnahme die gleiche Argumentationskette, wie zu (2) bereits angeführt. Ein Unterschied besteht jedoch darin, dass ein Farbstoff fein verteilt im Streckenversatz einen größeren Nutzen erwarten lässt, als einzeln platzierte Gegenstände oder Signalgeber in einer Strecke auf der Erkundungssohle. Die Möglichkeit, dass derartig ausgerüstete Strecken durch eine Erkundungsbohrung entdeckt werden, ist als noch viel geringer einzuschätzen als bei dem o. g. Farbstoff. Auch wenn eine Vielzahl der Gegenstände und Signalgeber eingesetzt würde, kann aufgrund der geringen Fläche der Erkundungssohle kein entsprechender Nutzen erwartet werden.

Darüber hinaus müsste sichergestellt sein, dass die Gegenstände und Signalgeber eine ausreichende Lebensdauer aufweisen.

Die Optimierungsmaßnahme ist auf Grund des geringen zu erwartenden Nutzen und des Verhältnisses zwischen dem zu erwartenden hohen Aufwand (bei einer Vielzahl von Gegenständen und Signalgebern) und dem geringen Nutzen zu verwerfen.

**Zu (4)** Eine Separierung der Einlagerungsfelder oder auch Einlagerungsstrecken würde für die Varianten B1 und C keinen Nutzen bringen. In der Variante B1 ist unter Einbeziehung der wahrscheinlichen Entwicklung der Salzgrusversatz in den Einlagerungsstrecken bereits nach 500 Jahren (frühester Zeitpunkt, für den Human Intrusion zu unterstellen ist) soweit kompaktiert, dass dadurch insgesamt eine Abtrennung nicht nur einzelner Einlagerungsfelder und Einlagerungsstrecken, sondern auch einzelner Endlagerbehälter gegeben ist. Für die Variante C liegt bereits durch die vorgesehene Bohrlochverrohrung eine Separierung der Bohrlöcher vor.

Die Maßnahme stellt daher für die Varianten B1 und C keine Optimierung dar.

Bei Vorliegen eines ausreichenden Informations- und Kenntnisstandes sowie angepasster Planungsdaten für die Variante A sollte diese Maßnahme noch einmal diskutiert werden.

### **5.3.2 Kavernenerstellung**

Als vorauslaufende Handlung vor der Erstellung einer Kaverne wird (mindestens) eine Erkundungsbohrung niedergebracht. Entsprechende Optimierungsmaßnahmen hierzu

wurden im Kapitel 5.3.1 bewertet. Für die Solung einer Kaverne wurden in Kapitel 5.2.2 zudem noch folgende mögliche Maßnahmen identifiziert:

- (1) Versetzen der Erkundungssohle mit setzungsarmem Schotter
- (2) Versetzen von Strecken auf der Einlagerungssohle mit geformten Blöcken aus Granit und Basalt
- (3) Einbringen von Rohren (analog den Verrohrungen in der Variante C) in das Wirtsgestein
- (4) Einbringen von Indikatoren (Farbstoffe, olfaktorische Stoffe etc.)
- (5) Einbringen von qualitätsmindernden Stoffen

**Zu (1)** Setzungsarme Schotter werden im Infrastrukturbereich der Erkundungs- und Einlagerungssohle bereits vorgesehen. Sie dienen dort vor allem als Speichervolumen für Gase und Lösungen. Die vorgeschlagene Optimierungsmaßnahme sieht darüber hinaus vor, alle verbleibenden Strecken auf der Erkundungssohle mit setzungsarmem Schotter zu versehen, um somit Hohlraum für Druckverluste und Speicherverluste im Kavernenbetrieb zu schaffen. Die im bisherigen Konzept mit Salzgrus zu versetzenden Strecken auf der Erkundungssohle in 840 m Teufe machen ca. 360.000 m<sup>3</sup> aus und würden mit einem setzungsarmen Versatz ausreichend Hohlraum für eine solche Maßnahme bieten.

Das derzeitige Endlagerkonzept sieht vor, dass die Einlagerungssohle ca. 30 m unterhalb der Erkundungssohle errichtet werden soll. Nach Verschluss des Endlagers sind die Einlagerungs- und die Erkundungssohle vollständig voneinander getrennt. Alle Verbindungen (Schächte, Bohrungen) sind verfüllt und verschlossen. Die Sohlen selber werden – mit Ausnahme der Infrastrukturbereiche – mit Salzgrus verfüllt und am Übergang der Richtstrecken zum Infrastrukturbereich durch Streckenverschlüsse verschlossen. Die Streckenverschlüsse werden derart ausgelegt, dass sie eine Standzeit von 50.000 Jahren aufweisen. D. h., dass bei Umsetzung der Maßnahme, die Erkundungssohle mit setzungsarmem Schotter zu versetzen, die Möglichkeit eines Lösungszutritts nach der genannten Standzeit der Streckenverschlüsse besteht. Hierdurch würde bewusst das Potenzial für eine wahrscheinliche Entwicklung geschaffen, die die Forderung nach einem Mindestabstand von 50 m der Richtstrecken zu lösungsführenden Bereichen verletzt. Unter diesen Randbedingungen steht die betrachtete Optimie-

rungsmaßnahme nicht im Einklang mit dem primären Optimierungsziel der Langzeitsicherheit.

Um die Maßnahme dennoch umzusetzen, müsste die Einlagerungssohle in einem Sicherheitsabstand von größer 50 m unterhalb der Erkundungssohle errichtet werden.

Die Maßnahme selbst ist aus technischen und finanziellen Gesichtspunkten im Vergleich zu anderen diskutierten möglichen Maßnahmen wenig aufwändig. Da bei der Kavernennutzung wie bei der Endlagerung homogene Salzbereiche bevorzugt werden, ist durchaus davon auszugehen, dass während des Solprozesses für eine Kaverne einer heute üblichen Größenordnung die Hohlräume der mit Schotter versetzten Strecken angefahren würden und ein merklicher Druck- und Spülverlust entstünde. Wenn allerdings die Bohrung, von der aus gesolt wird, unterhalb des Endlagers abgeteuft würde, können bereits Endlagergebände in die Kaverne gefallen sein, bevor diese Optimierungsmaßnahme greifen könnte.

Ein weiterer Aspekt, der in der Diskussion um diese Optimierungsmaßnahme identifiziert wurde, bezog sich auf eine mögliche Reduzierung der Durchlässigkeit des Schotter aufgrund des Kriechvermögens des umliegenden Steinsalzes in die Porenräume des Versatzes. In Analogie zu diesem Aspekt wurden Modellrechnungen zu den Materialien Sand, Kies und Schotter für einen Berechnungszeitraum von 10.000 Jahren durchgeführt. Die Berechnungen ergaben für die Materialien eine Durchlässigkeitsreduzierung, die in einem Bereich von 2 % – 4 % liegt, wobei für Sand die Reduzierung am geringsten ausgefallen ist. Aufgrund dieser insgesamt geringen Reduzierung, die sich im Bereich der Messgenauigkeit von Durchlässigkeiten bewegt, wurde die Feststellung getroffen, dass eine merkliche Veränderung der Versatzdurchlässigkeit aufgrund des Eindringens von kriechfähigem Salz in den Porenraum sich rechnerisch nicht begründen lässt /JOB 99/.

Demnach scheint die Maßnahme als Optimierungsmaßnahme gegen Human Intrusion unter der Voraussetzung, dass zwischen Erkundungssohle und Einlagerungssohle ein entsprechender Abstand besteht, umsetzbar. Möglicherweise lässt sich die Optimierungsmaßnahme durch die Auswahl des entsprechenden Versatzmaterials in Bezug auf die Langzeitwirkung noch verbessern. Es ist noch darauf hinzuweisen, dass die Maßnahme nur beim Solen einer Kaverne von oben oder von der Seite greifen kann.

**Zu (2)** Eine technisch aufwändige Maßnahme ist das Versetzen von Strecken auf der Einlagerungssohle mit geformten Blöcken aus Granit und Basalt. Sie sollen beim Solprozess in die Kaverne fallen und einen registrierbaren Druckimpuls auslösen. Die Blöcke müssen dabei so geformt sein, dass sie nach Detektion des Druckimpulses bei der Erkundung der Ursache als Anomalie detektiert werden können. Die Maßnahme steht nicht im Widerspruch zu den primären Optimierungszielen.

Der Druckimpuls eines in die Kaverne hereinfliegenden Blockes ist nur messbar, wenn die Kaverne von unten gesolt wird. Wenn z. B. der Kavernensumpf auf dem Niveau der Erkundungssole liegt, dann ist auch kein Druckimpuls durch hereinfliegende Blöcke feststellbar. Daher ist es nicht zielführend, diese Maßnahme auf Höhe der Erkundungssole durchzuführen, da das Endlager bereits angefahren wäre, bevor die Erkundungssole erreicht würde. Blöcke in den Strecken der Einlagerungssohle könnten dagegen in den Kavernensumpf fallen und detektiert werden. Da der genaue Solprozess nicht vorhersehbar ist, ist auch nicht klar, ob bei der Solung einer Kaverne zuerst ein Block oder ein Endlagergebäude angefahren würde. Bei der Bohrlochlagerung würde zuerst die Bohrlochverrohrung detektiert.

Auf Grund des hohen technischen Aufwandes und der geringen Wahrscheinlichkeit, dass nur Blöcke und keine Endlagergebäude in den Kavernensumpf fallen und einen Druckimpuls auslösen, ist diese Maßnahme nicht zielführend und daher zu verwerfen.

**Zu (3)** Das Einbringen von Rohren, die so dimensioniert sind, dass sie durch heute vorhandene geophysikalische Messmethoden detektiert werden können, ist aus Sicht der primären Optimierungsziele Langzeitsicherheit und der Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle kritisch zu bewerten. Das gilt für horizontal und vertikal angelegte Rohre sowohl auf der Erkundungssole als auch auf der Einlagerungssole.

Die Rohre haben Einfluss auf die Spannungs- und Temperaturverteilung im Wirtsgestein und tragen durch Korrosion zur Gasbildung bei. Es ist nicht auszuschließen, dass sich neue Wegsamkeiten bilden, die aus dem ewG herausführen. Die Integrität eines ewG kann daher durch solche Maßnahmen gefährdet werden. Diese Maßnahmen können somit die Langzeitsicherheit in unzulässiger Weise beeinflussen und werden daher nicht als Optimierungsmaßnahme gegen Human Intrusion in Betracht gezogen.

**Zu (4)** Das Einbringen von Indikatoren, die bei Kontakt mit der Sollösung eine solch heftige Reaktion auslösen, dass sie detektiert werden können, muss im Hinblick auf die primären Optimierungsziele als mögliche Maßnahme ausgeschlossen werden. Diese Indikatoren sind vor allem aus betrieblichen Gründen bedenklich, da solche Reaktionen schon in der Betriebsphase möglich wären.

Werden dagegen umweltverträgliche Stoffe als Indikatoren verwendet, ist es fraglich, ob sie in solchen Konzentrationen eingebracht werden können, dass sie bei der Erstellung der Kaverne mit Wassermengen von 200 m<sup>3</sup>/h noch ihre Wirkung entfalten. Der Nutzen anderer Indikatoren, wie z. B. akustische Signale oder Magnete, wird ebenso als gering eingeschätzt, da sie mit großer Wahrscheinlichkeit nicht an der Oberfläche detektiert werden könnten.

**Zu (5)** Für das Einbringen von qualitätsmindernden Stoffen bestehen viele offene Fragen, z. B. welche Stoffe anwendbar sind, die einerseits detektiert werden können, andererseits aber keine Gefahr für zukünftige Generationen (inklusive der eindringenden Person bzw. Personengruppe) darstellen. Des Weiteren stellt sich die Frage, wie langzeitstabil entsprechende Stoffe sind und ob sie in solchen Konzentrationen eingebracht werden können, dass sie bei der Erstellung der Kaverne mit Wassermengen von 200 m<sup>3</sup>/h noch ihre Wirkung entfalten. Je nach Eigenschaft können alle primären Optimierungsziele, insbesondere die Betriebssicherheit und die Langzeitsicherheit, gefährdet sein. Die Maßnahme muss deshalb verworfen werden.

### **5.3.3 Bergwerkerrichtung**

Für das HI-Szenarium „Bergwerkerrichtung“ wird zunächst (mindestens) eine Erkundungsbohrung niedergebracht. Entsprechende Optimierungsmaßnahmen wurden in Kapitel 5.3.1 bewertet. Für die Auffahrung eines Bergwerkes wurden in Kapitel 5.2.3 zudem noch folgende mögliche Maßnahmen identifiziert:

- (1) Einbringen von Materialien und Berücksichtigung höherer Behälterwandstärken zur Erhöhung des Vortriebswiderstandes
- (2) Einbringen von optischen Erkennungsmerkmalen
- (3) Einbringen weiterer Indikatoren (z. B. olfaktorische Stoffe)

- (4) Separierung einzelner Einlagerungsfelder oder auch Einlagerungsstrecken durch die Implementierung von Verschlussbauwerken
- (5) Einbringen von Verrohrungen in das Wirtsgestein
- (6) Einbringen von qualitätsmindernden Stoffen

**Zu (1)** Wie beim HI-Szenarium „Erkundungsbohrung“ steht das Einbringen von Materialien zur Erhöhung des Vortriebswiderstandes nicht im direkten Widerspruch zu den primären Optimierungszielen Strahlenschutz in der Betriebsphase, Betriebssicherheit des Endlagers, Sicherheitsmanagement oder technische und finanzielle Realisierbarkeit. Allerdings können durch solche Maßnahmen Stoffe in das Endlager eingebracht werden, die durch Korrosionsprozesse oder mikrobielle Zersetzung zur Gasbildung führen können und damit bei der Langzeitsicherheit und der Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle zu berücksichtigen sind.

Hinsichtlich der Behälterwandstärke ist festzustellen, dass eine noch höhere Wandstärke bei der Variante B1 nicht notwendig ist. Die Wandstärken, die derzeit vorgesehen sind, reichen als Vortriebswiderstand aus, um bemerkt zu werden. Gleiches gilt für die vorgesehenen Bohrlochverrohrungen in der Variante C.

Analog zur Erkundungsbohrung (s. Kapitel 5.3.1) ist festzuhalten, dass eine weitere Dimensionierung der Wandstärke auch mehr Nahrung für eine mögliche Korrosion bietet und somit zu einer höheren Gasbildung führen kann, die bei der Betrachtung der Langzeitsicherheit und der Zuverlässigkeit sowie der Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle zu berücksichtigen ist.

Bei Vorliegen eines ausreichenden Informations- und Kenntnisstandes sowie angepasster Planungsdaten für die Variante A sollte die Maßnahme mit dem Bezug zur höheren Behälterwandstärke noch einmal diskutiert werden.

Wie bereits oben ausgeführt, stellen die Endlagerbehälter bzw. die Bohrlochverrohrung einen Vortriebswiderstand dar, der bei der Auffahrung detektiert und auf frühere menschliche Aktivitäten hinweisen würde. Die Maßnahme des Einbringens von Materialien hat gegenüber den eingelagerten Endlagerbehältern daher wenige Vorteile. Zur Erkennung eines Endlagers gibt es zudem weniger aufwändige Methoden (s. u.).

**Zu (2)** Um bei der Auffahrung eines Bergwerkes optisch auf das Endlager aufmerksam zu machen, kann z. B. ein Farbindikator im Versatz eingesetzt werden. Wegen des direkten Anfahrens der markierten Strecken reichen geringere Farbveränderungen aus als z. B. bei einer Erkundungsbohrung. Die Langzeitstabilität entsprechender Stoffe ist auch in diesem Fall zu klären.

Wenn Stoffe verwendet werden, die weder einen signifikanten Einfluss auf das geochemische Milieu in den versetzten Strecken noch auf die Kompaktion des Versatzes haben, sind durch diese Optimierungsmaßnahme die primären Optimierungsziele nicht gefährdet. Dies gilt sowohl für die Strecken der Erkundungssohle als auch auf der Einlagerungssohle.

Diese Maßnahme ist daher eine mögliche Optimierungsmaßnahme gegen Human Intrusion.

**Zu (3)** Das Einbringen anderer Indikatoren, z. B. geruchs- oder nebelentwickelnde Stoffe, steht insbesondere im Konflikt mit der Betriebssicherheit. Auch der Einfluss auf das geochemische Milieu und damit gegebenenfalls auf die Langzeitsicherheit ist zu klären. Entsprechende Maßnahmen werden auf Grund dieser Konflikte zu den primären Optimierungszielen ausgeschlossen. Es besteht auch kein weiterer Vorteil gegenüber den optischen Erkennungsmerkmalen.

**Zu (4)** Analog zur Erkundungsbohrung (s. Kapitel 5.3.1) würde eine Separierung der Einlagerungsfelder oder auch Einlagerungsstrecken für die Varianten B1 und C keinen großen Nutzen bringen. In der Variante B1 ist unter Einbeziehung der wahrscheinlichen Entwicklung der Salzgrusversatz in den Einlagerungsstrecken nach 500 Jahren (frühester Zeitpunkt, für den Human Intrusion zu unterstellen ist) soweit kompaktiert, dass dadurch insgesamt eine Abtrennung nicht nur einzelner Einlagerungsfelder und Einlagerungsstrecken, sondern auch einzelner Endlagerbehälter gegeben ist. Für die Variante C liegt bereits durch die vorgesehene Bohrlochverrohrung eine Separierung der Bohrlöcher vor.

Diese Maßnahme stellt daher für die Varianten B1 und C keine Optimierung dar.

Bei Vorliegen eines ausreichenden Informations- und Kenntnisstandes sowie angepasster Planungsdaten für die Variante A sollte diese Maßnahme noch einmal diskutiert werden.

**Zu (5)** Für das Einbringen von Verrohrungen, die so dimensioniert sind, dass sie durch heute vorhandene geophysikalische Messmethoden detektiert werden können, gilt analog zu den Aussagen für das HI-Szenarium „Kavernenerstellung“, dass diese Maßnahme aus Sicht der primären Optimierungsziele „Langzeitsicherheit“ und „Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle“ kritisch zu bewerten ist. Die Verrohrungen haben Einfluss auf die Spannungs- und Temperaturverteilung im Wirtsgestein und tragen durch Korrosion zur Gasbildung bei. Es ist dadurch nicht auszuschließen, dass sich neue Wegsamkeiten bilden, die aus dem ewG herausführen. Die Integrität des ewG kann daher durch solche Maßnahmen gefährdet werden.

Diese Maßnahme gefährdet die Langzeitsicherheit in unzulässiger Weise und kann daher nicht als Optimierungsmaßnahme gegen Human Intrusion in Betracht gezogen werden. Das gilt für horizontal und vertikal angelegte Verrohrungen sowohl von der Erkundungssohle als auch von der Einlagerungssohle.

**Zu (6)** Auch für das Einbringen von qualitätsmindernden Stoffen gilt analog zum HI-Szenarium „Kavernenerstellung“, dass zu viele offene Fragen bestehen, vor allem welche Stoffe überhaupt verwendet werden können. Je nach Eigenschaft können alle primären Optimierungsziele, insbesondere die Betriebssicherheit und die Langzeitsicherheit gefährdet sein. Die Maßnahme muss deshalb verworfen werden.

#### **5.4 Quantitative Analyse der identifizierten Optimierungsmaßnahmen**

Fasst man die Bewertung der Optimierungsmaßnahmen gegen Human Intrusion für die identifizierten HI-Szenarien zusammen, stellt sich heraus, dass

- (1) eine Einfärbung des Versatzes bzw. Zusatz von Farbstoffen im Versatz und
- (2) die Einbringung von Schotter in die Erkundungssohle in Verbindung mit einer entsprechenden Erhöhung des Abstandes zwischen Erkundungs- und Einlagerungssohle

die beiden verbleibenden Optimierungsmaßnahmen gegen Human Intrusion sind. Alle anderen Maßnahmen stehen entweder im Konflikt mit den primären Optimierungszielen oder haben ein so schlechtes Aufwand-Nutzen-Verhältnis, dass sie als Maßnahmen verworfen werden müssen bzw. nicht in Betracht kommen.

Beide verbleibenden Maßnahmen stellen darauf ab, den zukünftig handelnden Personen einen Hinweis auf frühere menschliche Aktivitäten bzw. stattgefundenen Altbergbau am Standort zu geben. Welche Schlüsse diese Personen aus diesen Hinweisen ziehen, kann nicht vorhergesagt werden. Da eine quantitative Analyse der Wirksamkeit der Maßnahmen aber nur durchgeführt werden kann, wenn eindeutige Randbedingungen festgelegt werden können, ist eine solche Analyse nicht zielführend.

Bei konzeptionellen Maßnahmen, die auf eine Einengung (Kompartimente) des betroffenen Abfalls und damit auf eine Reduzierung möglicher Konsequenzen abzielen, ist eine quantitative Abschätzung schon eher möglich. Sollten sich bei einer späteren Konkretisierung zur Variante A solche Maßnahmen als nutzbar erweisen, ist eine quantitative Beurteilung durchaus denkbar.



## 6 Zusammenfassung

Zum Untersuchungsspektrum der VSG gehören neben der Betrachtung von zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Standortes unter Berücksichtigung natürlicher sowie endlager- und abfallinduzierter Phänomene auch solche, die durch menschliche Aktivitäten hervorgerufen werden. Letztere werden jedoch gesondert von den anderen Entwicklungsmöglichkeiten aufgrund der unzureichenden Prognosemöglichkeit des menschlichen Handelns untersucht.

Die Zielsetzung bei der Untersuchung von menschlichen Aktivitäten ist gemäß den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ auf die Optimierung des Endlagers ausgerichtet. Resultierende Optimierungen aus der Untersuchung dürfen jedoch nicht die in den Sicherheitsanforderungen spezifizierten vorrangigen (primären) Optimierungsziele gefährden.

Als erster Arbeitsschritt wurden in dem vorliegenden Bericht in Kapitel 2 die Grundlagen für die Untersuchung von menschlichen Aktivitäten zusammengestellt. Die Grundlagen beinhalten neben der Auflistung wesentlicher Begriffe und Begriffsbestimmungen die Darstellung der Rahmenbedingungen und Vorgaben für die gestellte Aufgabe sowie die Beschreibung der Vorgehensweise für die Bearbeitung. Darüber hinaus war es notwendig, aufgrund des weiten Spektrums an menschlichen Handlungen, den Umfang der im Sicherheitsnachweis zu behandelnden Aktivitäten einzuengen. Ein wesentliches Merkmal der Einengung beinhaltet die Fokussierung auf diejenigen menschlichen Aktivitäten, die das Potenzial haben, in entsprechende Endlagertiefen vorzudringen. Hierbei ist nur das unbeabsichtigte Eindringen zu untersuchen. Darüber hinaus ist für die zu betrachtenden Aktivitäten der heutige Stand von Wissenschaft und Technik zugrunde zu legen.

Aufbauend auf den in Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen wurden in Kapitel 3 Basisaktivitäten identifiziert, die die zu behandelnden zukünftigen menschlichen Aktivitäten umfassen. Zu den Basisaktivitäten gehören das Abteufen einer Bohrung, das Anlegen einer Kaverne und das Auffahren eines Bergwerks. Zu jeder Basisaktivität wurden allgemeine Informationen zusammengetragen und die mit der Handlung verbundenen Arbeitsabläufe nach dem Stand der Technik, wie z. B. zur Vorerkundung, Planung und Konstruktion, Betrieb und Stilllegung, aufgezeigt und beschrieben. Hierzu wurden im Rahmen der Bearbeitung Gespräche mit Fachfirmen geführt, die einerseits zur Ermitt-

lung des Standes von Wissenschaft und Technik dienen und andererseits Aufschluss über mögliche Umstände geben sollten, die bei Planung oder Durchführung der entsprechenden Basisaktivität besonders zu beachten sind.

Im Kapitel 4 wurden Szenarien identifiziert, die sich auf das menschliche Eindringen in das Endlager beziehen. Hierzu wurden die Basisaktivitäten herangezogen und deren Eindringpotenzial in das Endlager analysiert. Die Analyse der Basisaktivitäten beinhaltete die Betrachtung von Fallunterscheidungen, die den möglichen unterschiedlichen Eindringorten und Nutzungsarten der jeweiligen Aktivität Rechnung tragen. Darüber hinaus wurde diskutiert, inwieweit die vom Endlager und vom radioaktivem Abfall induzierten Anomalien bzw. Auffälligkeiten durch die mit den Basisaktivitäten und den jeweiligen Fallunterscheidungen verbundenen Arbeitsabläufe detektiert werden können. Das Ergebnis dieser Diskussion wurde in die Identifizierung und Ausformulierung von Szenarien einbezogen, die auf Erkundungsbohrung, Kavernenerstellung und Bergewerksserrichtung ausgerichtet sind. Außerdem geben die Diskussionsergebnisse Aufschluss über mögliche Ansatzpunkte für Optimierungsmaßnahmen.

Die identifizierten und ausformulierten Szenarien wurden in dem abschließenden Kapitel 5 dahingehend untersucht, ob durch entsprechende Maßnahmen die Möglichkeit der Reduzierung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten gegeben ist und/oder ob den radiologischen Auswirkungen entgegengewirkt werden kann. Ausgangsgrundlage für diese Untersuchung war eine zusammengestellte Liste von denkbaren Maßnahmen, die thematisch den Hauptgruppen Information, Überwachung, Konzeption, Konstruktion und Indizierung zugeordnet waren. Im Ergebnis wurden unter Einbeziehung der aufgestellten Szenarien mögliche Optimierungsmaßnahmen identifiziert, die sich vornehmlich auf ein frühzeitiges Erkennen einer Anomalie bzw. Auffälligkeit durch hinweisgebende bzw. als Indikator wirkende Maßnahmen und auf eine mögliche Reduzierung der mit dem menschlichen Eindringen verbundenen Konsequenzen durch konzeptionelle Maßnahmen abstützen.

Die identifizierten möglichen Optimierungsmaßnahmen wurden systematisch dahingehend bewertet, ob sie für die Einlagerungsvarianten umgesetzt werden könnten und ob sie nachteilige Auswirkungen auf die in den Sicherheitsanforderungen vorgegebenen primären Optimierungsziele haben. Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten der quantitativen Beurteilung von Szenarien vor und nach der Berücksichtigung von Optimierungsmaßnahmen diskutiert.

Im Ergebnis der Diskussion und Bewertung der möglichen Optimierungsmaßnahmen ergaben sich nur zwei Maßnahmen, die sich unter den hier vorliegenden Rahmenbedingungen sinnvoll umsetzen lassen. Diese sind die Verwendung eines Indikators zur Einfärbung der Versatzmaterialien (Salzgrus und Schotter) und bei entsprechender Anpassung der konzeptionellen Planung hinsichtlich des Abstandes zwischen Einlagerungssohle und Erkundungssohle das Einbringen von setzungsarmem Versatz (z. B. Sand, Kies und Schotter) in die Erkundungssohle. Beide Maßnahmen zielen darauf ab, dass nach dem Eindringen in den ewG Auffälligkeiten vorliegen, die von den handelnden Personen als solche gedeutet werden können. Da die Maßnahmen auf einen hinweisgebenden Charakter in Bezug auf menschliche Aktivitäten bzw. stattgefundenen Altbergbau am Standort ausgerichtet sind, ist bei beiden Maßnahmen eine quantitative Beurteilung nicht möglich. Zur quantitativen Beurteilung der Wirkung der Maßnahmen lassen sich keine klaren Randbedingungen aufstellen. Der Erfolg der Maßnahme hängt von der Deutung der Auffälligkeit und den daraus resultierenden Entscheidungen der in der Zukunft handelnden Personen ab.

Es wurde keine Optimierungsmaßnahme identifiziert, die ein unbeabsichtigtes Eindringen in den ewG erschweren oder die Möglichkeit verbessern kann, das Endlager vor dem Eindringen in den ewG zu entdecken. Im Ergebnis besteht damit keine Möglichkeit, die Wahrscheinlichkeit eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den ewG zu reduzieren.

Insgesamt ist daher festzustellen, dass im Sinne der Optimierung des Endlagersystems gegen menschliche Eingriffe die Möglichkeiten zur Ergreifung von probaten Maßnahmen stark begrenzt sind. Darüber hinaus bleibt die Ungewissheit, ob die auslösende bzw. zuge dachte Wirkung von vorgesehenen Maßnahmen im Falle eines zukünftigen menschlichen Eindringens auch entsprechend wahrgenommen und interpretiert wird sowie schlüssige Reaktionen auslöst.

Abschließend ist noch festzuhalten, dass neben der konzeptinhärenten Teufenlage des Endlagers auch der Informationserhalt sowie die institutionelle Kontrolle wirkungsvolle Maßnahmen gegen ein unbewusstes menschliches Eindringen darstellen. Eine belastbare Einschätzung, ob die Wirksamkeit solcher Maßnahmen über Zeiträume von einigen 100 Jahren unterstellt werden kann, ist jedoch unmöglich, da dies Prognosen zu den Handlungen der zukünftigen menschlichen Gesellschaft über diese Zeiträume erforderte. Zum Umgang mit diesen Ungewissheiten sind entsprechende Festlegungen

bezüglich dieser Maßnahmen notwendig. Die Schaffung von entsprechenden Rahmenbedingungen dafür stellt eine regulatorische Aufgabe dar.

## Literaturverzeichnis

- /BAD 01/ Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S., Kockel, F.: Geotektonischer Atlas von Nordwestdeutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor: Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. Geologisches Jahrbuch, Vol. A153, S. 88, 2001.
- /BAL 05/ Baltés, B., Beuth, T.: Behandlung des Szenariums „Menschliches Eindringen“ in ein Endlager für radioaktive Abfälle, Vorschlag der GRS. GRS-A-3259, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2005.
- /BBG 09/ Bundesberggesetz (BBergG) vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 15a des Gesetzes vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S.2585).
- /BEN 85/ Bender, F.: Angewandte Geowissenschaften. Band II: Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften. ISBN 3432910215, Enke Verlag: Stuttgart, 1985.
- /BEU 08/ Beuth, T., Baltés, B., Keller, S., Kienzler, B., Krone, J., Mönig, J., Navarro, M., Preuss, J., Röhlig, K.-J., Schäfer, S., Weber, J.R., Wollrath, J.: Position of the Working Group on „Scenario Development“: Handling of human intrusion into a repository for radioactive waste in deep geological formations, Working Group on „Scenario Development“. atw, Vol. LIII, No. 8/9, S. 538-540, 2008.
- /BEU 09/ Beuth, T., Marivoet, J.: Development of Stylized Human Intrusion Scenarios. M3.1.14 and M3.1.20, Integrated EU Project PAMINA: Cologne, August 2009.
- /BEU 10/ Beuth, T., Navarro, M.: Treatment of Human Intrusion into a Repository for Radioactive Waste in Deep Geological Formations, WM2010 Conference: Phoenix, AZ, 07.03.2010.

- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübél, A., Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMWI 04/ Bundesministerium für Wirtschaft (BMWI): Der Bergbau in der Bundesrepublik Deutschland 2003; Bergwirtschaft und Statistik; Zusammengestellt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit in Zusammenarbeit mit den Bergbehörden der Länder. Vol. 55: Berlin, 2004.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, ISBN 978-3-939355-48-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2011.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BUS 10/ Buser, M.: Literaturstudie zum Stand der Markierung von geologischen Tiefenlagern. Bundesamt für Energie BFE (Schweiz), Mai 2010.
- /EUR 11/ European Commission: European Handbook of the state-of-the-art of safety assessments of geological repositories. PAMINA - Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case, Final Report, 31.01.2011.

- /FRI 99/ Fricke, S., Schön, J.: Praktische Bohrlochgeophysik. ISBN 3131183314, Enke Verlag: Stuttgart, 1999.
- /GEO 11/ GeoDataZone: Bohrlochgeophysik. Stand vom 2011, erreichbar unter: <http://www.geodz.com/deu/d/Bohrlochgeophysik>.
- /JOB 99/ Jobmann, M., Kreienmeyer, M., Lerch, C.: Untersuchungen zur verbleibenden Versatzdurchlässigkeit. Projekt Morsleben 9M, PSP Element 22330021; Funktion Y, Aufgabe GH, UA JT, Lfd.-Nr. 0001, Rev. 01, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 22.02.1999.
- /KBB 07/ KBB Underground Technologies, Alstom Power, E., E.ON Energie, IAEW, REpower, Vattenfall Europe Transmission: Verbesserte Integration großer Windstrommengen durch Zwischenspeicherung mittels CAES. Endbericht: Aachen, 2007.
- /KBB 11/ KBB Underground Technologies: Soltechnik. Stand vom 2011, erreichbar unter: <http://www.kbbnet.de/fachbereiche/soltechnik/>.
- /KIß 08/ Kießling: Leitfaden für das Verwahren von Tagesschächten in Thüringen. Thüringer Landesbergamt: Gera, 08.08.2008.
- /KNÖ 05/ Knödel, K., Krummel, H., Lange, G.: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten. Band 3: Geophysik. 2. Edition, 1102 Seiten, ISBN 978-3-540-22275-0, Springer: Berlin, 17.01.2005.
- /KUR 07/ Kurstedt, A.: Salzbergwerk Epe - Von der Solegewinnung zum größten Kavernenspeicher Europas. Bergbau, Vol. 9, 2007.
- /LAG 34/ Gesetz über die Durchforschung des Reichsgebietes nach nutzbaren Lagerstätten (Lagerstättengesetz - LagerstG), Dezember 1934.
- /LBG 11a/ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG): NIBIS Kartenserver Bohrdatenbank. Stand vom 2011, erreichbar unter: [http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation\\_id=610&article\\_id=647&\\_psmand=4](http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?navigation_id=610&article_id=647&_psmand=4).

- /LBG 11b/ Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG):  
Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS). Stand vom 2011,  
erreichbar unter: [http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/  
live.php?&article\\_id=670&navigation\\_id=652&\\_psmand=4](http://www.lbeg.niedersachsen.de/portal/live.php?&article_id=670&navigation_id=652&_psmand=4).
- /MIL 84/ Militzer, H., Weber, F.: Angewandte Geophysik.- Band 1: Gravimetrie und  
Magnetik. Akademie Verlag: Berlin, 1984.
- /MIL 85/ Militzer, H., Weber, F.: Angewandte Geophysik.- Band 2: Geoelektrik -  
Geothermik - Radiometrie - Aerogeophysik. Akademie Verlag: Berlin,  
1985.
- /MIL 87/ Militzer, H., Weber, F.: Angewandte Geophysik.- Band 3: Seismik.  
Akademie Verlag: Berlin, 1987.
- /MÖN 11/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltes, B., Peiffer, F., Fischer-  
Appelt, K.: Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes. Bericht  
zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort  
Gorleben, GRS-271, ISBN 978-3-939355-47-2, Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2011.
- /NEA 92/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear  
Energy Agency (OECD-NEA): Systematic Approaches to Scenario  
Development; A report of the NEA Working Group on the Identification and  
Selection of Scenarios for Performance Assessment of Radioactive Waste  
Disposal. In: Radioactive Waste Management: Paris, 1992.
- /NEA 95/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear  
Energy Agency (OECD-NEA): Future Human Actions at Disposal Sites; A  
report of the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions  
at Radioactive Waste Disposal Sites. In: Radioactive Waste Management:  
Paris, 1995.
- /OCZ 98/ Richtlinie des Oberbergamtes in Clausthal-Zellerfeld über das Verfüllen  
auflässiger Bohrungen, in der Fassung vom 29. Juli 1998 - 20.1 - 3/98 - B  
III d 1.2 - IV, Clausthal-Zellerfeld 1998.

- /PEI 11/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-278, ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, September 2011.
- /SCH 11/ Schmitz, S.: Entwicklung einer langfristig bergbausicheren Abdichtung zur Verwahrung von CO<sub>2</sub>-Speicherbohrungen mittels CO<sub>2</sub>-resistenter Naturmaterialien im Forschungsvorhaben CODICHT. Präsentation auf dem 62. Berg- und Hüttenmännischen Tag, DBI-GUT: Freiberg, 17.06.2011.
- /SCM 06/ Schmidt, U., Rolfs, O., Staudtmeister, K.: Endverwahrung von Speicherkavernen im Salzgebirge. Erdöl Erdgas Kohle, Vol. 122, No. 11, S. 416, 2006.
- /SCÜ 01/ Schütte, H.: Geologische Formationen für die Speicherung von Druckluft im küstennahen Raum der Nord- und Ostsee. 2001.
- /SED 09/ Sedlacek, R.: Untertage-Gasspeicherung in Deutschland. Erdöl Erdgas Kohle, Vol. 125, No. 11, S. 412, 2009.
- /TRY 01/ Tryller, H.: Kaverne erzeugt Klänge. tec 21, Vol. 48, 2001.
- /WIL 08/ Wilsnack, T., Sitz, P., Heinemann, K.-H., Rumphorst, K., Hunstock, F.: Flüssigkeitsdichte Verwahrung von Schächten. Kali und Steinsalz, No. 3, S. 24-35, 2008.
- /ZEI 06/ Zeibig, S., Hartmann, O.: Erfassung der Schächte des Kali- und Steinsalzbergbaus in Deutschland. Kali und Steinsalz, Vol. 1, 2006.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Darstellung der durchgeführten Arbeitsschritte hinsichtlich der Untersuchung menschlicher Aktivitäten.....	8
Abb. 3.1	Schematische Darstellung von Basisaktivitäten .....	14
Abb. 3.2	Darstellung der Ansatzpunkte von Tiefbohrungen zur Kohlenwasserstoffexploration (Quelle: /LBG 11b/).....	17
Abb. 3.3	Seiten- und Vorderansicht eines im Rotary-Verfahren verwendeten Rollenmeißels (Quelle: FRE) .....	19
Abb. 3.4	Übersicht über die unterschiedlichen Messungen in einem Bohrloch (basierend auf /KNÖ 05/).....	24
Abb. 3.5	Übersicht der Einsatzmöglichkeit verschiedener geophysikalischer Verfahren zur Ermittlung bestimmter geologischer Eigenschaften (basierend auf /GEO 11/).....	25
Abb. 3.6	Bildliche Darstellung von Verfüllstrecken (gemäß /OCZ 98/).....	28
Abb. 3.7	Speicherlokationen in Deutschland (aus /SED 09/).....	30
Abb. 3.8	Solverfahren zur Kavernenerstellung (Quelle: /KBB 11/).....	35
Abb. 3.9	Schematische Darstellung der Verteilung der Kali- und Steinsalzstandorte Deutschlands (aus /ZEI 06/) .....	39
Abb. 4.1	Fallunterscheidungen (B1 bis B6) für die Basisaktivität „Abteufen einer Bohrung“.....	47
Abb. 4.2	Fallunterscheidungen (K1 bis K4) für die Basisaktivität „Anlegen einer Kaverne“ (gelber Bereich symbolisiert den ewG) .....	53
Abb. 4.3	Fallunterscheidungen (S1 bis S3) für die Basisaktivität „Auffahrung eines Bergwerks“ .....	59

Abb. 5.1	Vorgehensweise bei der Ableitung und Bewertung von Optimierungsmaßnahmen gegen Human Intrusion.....	65
Abb. 5.2	Mögliche Optimierungsmaßnahmen und Zuordnung zu den allgemeinen HI-Optimierungszielen .....	67
Abb. 5.3	Darstellung der den Hauptgruppen zugeordneten möglichen Maßnahmen, die einem menschlichen Eindringen in ein Endlager entgegenwirken können.....	70
Abb. 5.4	Doppelt-Logarithmische-Darstellung der Abnahme der spezifischen Aktivität von unterschiedlichen Beladungen des POLLUX-Behälters und Ausschnitt für den POLLUX-10 (DWR-UO2) mit linearen Maßstäben der Achsen (Datengrundlage nach /PEI 11/ ).....	71
Abb. 5.5	Grubenhöhlräume des Endlagers /BOL 12/ .....	77

## **Tabellenverzeichnis**

Tab. B.1	Kategorien möglicher Optimierungsmaßnahmen gemäß Tab. B.2.....	123
Tab. B.2	Zusammenstellung der Optimierungsmaßnahmen.....	125



## **A Anhang A: Gesprächsnotizen**

### **A.1 Gesprächsnotiz vom 22.11.2004 bei der Fa. ITAG in Celle**

#### **Gesprächsteilnehmer:**

Dr. Gutsche (ITAG),

Dr. Baltés (GRS), Dipl. Geol. Larue, (GRS), Dipl.-Ing. Beuth (GRS)

#### **Thema:**

Unbeabsichtigtes Eindringen in ein Endlager für radioaktive Abfälle durch Niederbringung einer Tiefbohrung

#### **Gesprächsunterlage:**

Zur Vorbereitung des Gespräches wurden eine kurze Darstellung des Problemkreises „Menschliche Einwirkung“ sowie ein Abriss der zu besprechenden Fragestellungen zusammengestellt und verteilt.

#### **Ergebnisvermerk:**

Die im gemeinsamen Gespräch erörterten Fragestellungen sowie weitere im Gesprächsverlauf behandelte Aspekte werden im Folgenden dargestellt:

*Was ist der heutige Stand der Technik beim Abteufen einer Bohrung in Tiefen von 500 m bis 1000 m?*

Die Erstellung von Tiefbohrungen in Deutschland wird in den meisten Fällen zur Prospektion von Erdöl- und Erdgaslagerstätten durchgeführt. In letzter Zeit werden Bohrungen immer häufiger auch zur Gewinnung geothermischer Energie abgeteuft. Die Tiefenbereiche (Teufe) der Lagerstätten (1000 m – 2500 m bei Erdöllagerstätten und 3000 m – 5000 m bei Erdgaslagerstätten) liegen zum größten Teil deutlich unterhalb den geplanten Teufen (500 m – 1000 m) eines Endlagers für radioaktive Abfälle.

Die in der Tiefbohrtechnik zur Anwendung kommenden Verfahren sind vorwiegend das Rotary-Verfahren, bei dem der Bohrmeißel verbunden mit dem Bohrgestänge über

einen Kraftdrehkopf (topdrive) und/oder einem Vorortantrieb (downhole motor) in eine Rotationsbewegung versetzt wird. Der ehemals verwendete Drehtischantrieb hat durch die Entwicklung der Richtbohr- bzw. Horizontalbohrtechnik gegenüber den o. g. Drehantrieben an Bedeutung verloren.

Zur Sicherung der Bohrlochwand während des Bohrvorganges und zur Beseitigung des Bohrkleins wird eine Spülflüssigkeit (meistens eine wässrige Tonlösung) durch das Bohrgestänge gepumpt, die durch den Ringraum mit dem Gestein zur Oberfläche wieder aufsteigt. Zur Langzeitabsicherung gegen Einsturz des Bohrloches werden in gewissen Abständen Stahlrohre einzementiert.

*Wird vorlaufend eine Seismik durchgeführt? Wann kann durch Seismik das Endlager entdeckt werden?*

Vor einer Aufschlussbohrung nach Lagerstätten kommt es darauf an, potenzielle Gebiete auszuweisen um somit hohe Kosten zu vermeiden und wirtschaftliche Risiken zu verringern. Zur Ausweisung potenzieller Gebiete werden geowissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt bzw. herangezogen. Eines der wesentlichsten geophysikalischen Verfahren ist die Aufnahme von reflexionsseismischen Profilen (3d-Seismik), die Hinweise über den Aufbau des Untergrundes in den entsprechenden Tiefen und mit entsprechenden Genauigkeiten geben. In Niedersachsen liegen reflexionsseismische Messdaten für weite Gebiete bereits vor. Weiterhin geben gravimetrische Messungen Aufschluss über Dichteunterschiede im Untergrund und damit Hinweise auf bestimmte geologische Formationen.

Die Frage, ob anhand reflexionsseismischer Profile ein Endlager bemerkt würde, konnte nicht abschließend beantwortet werden. Vorstellbar ist jedoch, dass Endlagerbereiche die eine geringe Dichte und eine entsprechende Ausdehnung aufweisen als Anomalie identifiziert werden, wenn eine für diese Teufe entsprechende Auflösung der Seismik vorliegt. Weite Auslagen der Geophone, die bei einer Untersuchung größerer Tiefen verwendet werden, besitzen u. U. nicht die entsprechende Auflösung in Endlagertiefe. Es wurde empfohlen sich mit Fachdiensten bzw. Fachleuten auf dem Gebiet der 3d-Seismik auszutauschen.

*Welches sind die heute üblichen technischen Maßnahmen zur Bohrvorbereitung und während des Abteufens?*

Die zu treffenden technischen Maßnahmen vor, während und nach der Niederbringung einer Bohrung sind im sog. Bohrbetriebsplan und im Bohrprogramm durch den Auftraggeber bzw. durch einzuhaltende Gesetze, Verordnungen und Richtlinien vorgegeben. Der Bohrbetriebsplan enthält Anweisungen, Rahmenbedingungen und Informationen zur Durchführung der Bohrung wie Bohransatzpunkt, Bohrbeginn, Liegenschaft, Spülung, Bohrverfahren, Überwachungseinrichtung usw. Im Bohrprogramm sind weitergehende Anweisungen zum Ablauf der Bohrarbeiten festgelegt.

*Wann und wie oft werden während des Bohrvorgangs die Spülflüssigkeit und das Bohrklein durch die Bohrmannschaft und/oder den Geologen geprüft? Würde eine Anomalie, wie sie das Endlager darstellt, dabei festgestellt?*

Von Anfang an ist bei den Bohrarbeiten ein Geologe vor Ort, der die Bohrung anhand verschiedener Beobachtungen, Messungen und Untersuchungen auswertet, um somit Aufschluss über die durchbohrte Schichtenfolge, der Gesteinsart sowie Gesteinseigenschaften zu gewinnen. So wird z. B. das mit der Spülflüssigkeit ausgetragene Bohrklein untersucht. Entstehende Spülverluste werden registriert.

Darüber hinaus werden eine Reihe weiterer geophysikalischer Parameter wie Temperatur, Druck, Gesteinsart, Dichte, Bohrlochneigung, Porosität u. a. m. mittels Bohrlochsonden (Gamma-Log, Neutron-Log, Sonic-Log u. a. m.) aufgenommen. Die Auswertung der Daten erfolgt teilweise schon vor Ort.

In der Diskussion wurde festgestellt, dass bei der Vielzahl der Untersuchungen und der Art der Messverfahren von einem Endlager ausgehende Anomalien mit hoher Wahrscheinlichkeit bemerkt werden. Zur Absicherung der Aussage wurde jedoch empfohlen, einen weiteren Informationsaustausch mit geophysikalischen Fachdiensten bzw. Fachleuten zu suchen (z. B. Fa. Schlumberger, Baker Atlas Gruppe).

*Wird oft und wann wird gekernt? Wenn ja, wann wird der Kern durch den Geologen angesprochen? Würde eine Anomalie, wie sie das Endlager darstellt, dabei festgestellt?*

Die Entnahme von Bohrkernen ist durch den Bohrbetriebsplan festgelegt. Darüber hinaus wird der Geologe bei einem Wechsel der Schichtfolge die Entnahme eines Bohrkerns veranlassen. Die Kernansprache erfolgt durch den Geologen vor Ort.

Bei dieser Untersuchung würde von einem Endlager ausgehendes artfremdes Material mit hoher Wahrscheinlichkeit bemerkt. Analog der vorangegangenen Fragestellung wird auch hier ein zusätzlicher Austausch mit entsprechenden Fachdiensten empfohlen.

*Würde nach heutigem Stand der Technik das Anbohren eines Endlagers entdeckt?  
Wenn ja – wann?*

Bei Unterstellung von intakten Behältern, d. h. die Behälter sind noch nicht durch Korrosionsprozesse wesentlich beeinträchtigt worden, wird der Bohrmeißel bei dem Auftreffen auf eine Behälterwandung aus Stahl mit einer Stärke größer als 2 cm entweder unbrauchbar bzw. zerstört und/oder stark abgelenkt. Beides würde umgehend registriert und entsprechende Untersuchungen nach sich ziehen.

Das Anbohren einer Einlagerungstrecke nur im versetzten Bereich, d. h. zwischen den Behältern, würde bei der Verwendung von Versatzmaterial mit gleicher Beschaffenheit wie dessen Umgebung sowie ähnlicher Dichte und Porosität vermutlich nicht bemerkt. Bei Verwendung einer mit Eisen armierten Betondecke über dem Einlagerungsbereich, die in Bezug auf eine untertägige Markierung des Endlagers in der Fachwelt bereits diskutiert wurde, wären die gleichen Voraussetzungen wie bei dem o. g. Anbohren eines Stahlbehälters gegeben.

*Weitere Aspekte:*

Das während der Bohrung anfallende Gestein wird zunächst in einer Grube am Bohrplatz gelagert und nach Bedarf und abhängig von der Art der verwendeten Spülung als Hausmüll oder als Sondermüll auf Deponien verbracht. Bei der Ansprache des Bohrkleins werden Proben entnommen und ihre mineralogische Zusammensetzung im Labor untersucht. Bis dahin unentdecktes kontaminiertes Material, das als unwahrscheinlich eingestuft wird, würde hierbei identifiziert.

Analog zum Bohrklein werden anfallende Flüssigkeiten am Bohrplatz gesammelt und anschließend entsorgt.

Bei nicht fündigen Bohrungen wird das Bohrloch mit Zement verfüllt und mit mechanischen Stopfen abgedichtet. Hierbei ist Sorge zu tragen, dass über die Bohrung z. B. durchteufte Grundwasserleiter nicht einen hydraulischen Kurzschluss erleiden. Darüber hinaus wird das Bohrloch durch eine Betonplatte, die sich mindestens 1 m unter der Oberfläche befindet, abgesichert.

## **A.2            Gesprächsnotiz vom 15.02.2011 bei der Fa. K+S AG in Kassel**

### **Gesprächsteilnehmer:**

Hr. Dipl.-Ing. Deppe, Hr. Dipl.-Ing. Jacob (K+S AG)

Hr. Dr. Fischer-Appelt, Hr. Dipl.-Ing. Beuth (GRS)

Hr. Dr. Baltés

### **Thema:**

Zukünftige menschliche Aktivitäten im Zusammenhang mit der Bergwerkserrichtung

### **Gesprächsunterlage:**

Als Gesprächsgrundlage wurden zu dem genannten Thema den Teilnehmern ausgewählte Informationen und Fragen gestellt.

### **Diskussion/ Vermerk:**

Das Gespräch diente zur Hinterfragung des Standes von Wissenschaft und Technik (WuT) hinsichtlich der Errichtung eines Bergwerkes in einem Salzstock. Die Ermittlung von WuT bildet die Grundlage für die Aufstellung von stilisierten Szenarien des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in Salz. Um die grundlegenden Elemente bezüglich der Bergwerkserrichtung zu ermitteln, ist es neben dem Studium vorliegender Fachliteratur unerlässlich, erfahrene und führende Unternehmen auf diesem Fachgebiet zu kontaktieren und zu befragen. Hierzu wurde mit der K+S AG ein gemeinsamer Gesprächstermin vereinbart. Im Vorfeld des Gespräches wurden zur Vorbereitung essenzielle Informationen zur Thematik zusammengestellt und mit relevanten Fragestellungen gestellt. Im Gespräch wurden orientierend an den Entwicklungsphasen eines Bergwerkes die verschiedenen Fragestellungen und Aspekte erörtert.

### **Prämissen und Vorüberlegungen:**

Einleitend zur Diskussion wurden die folgenden Randbedingungen und Prämissen für die Behandlung eines menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle erläutert:

Das menschliche Verhalten und damit die zukünftigen menschlichen Aktivitäten können über den zugrundeliegenden Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren nicht prognostiziert werden.

Aus diesem Grund ist der heutige Stand von WuT zugrunde zu legen.

Es wird nur das unwissentliche menschliche Eindringen in ein Endlager betrachtet. D. h., die Information über den Endlagerstandort und das vom Standort ausgehende Gefährdungspotenzial ist verloren gegangen. Ein wissentliches Eindringen in ein Endlager wird in die Verantwortung der jeweiligen handelnden Gesellschaft gestellt.

Neben den o. g. Prämissen wurden weitere für die Diskussion relevante Vorüberlegungen angestellt:

Als wesentlicher Einstiegspunkt für die Prospektion wird unterstellt, dass über die Geologie am Standort keine Kenntnis vorliegt. Hinsichtlich der für eine Prospektion zur Verfügung stehenden Methoden und der Bergbautechnik ist analog der möglichen menschlichen Aktivitäten der heutige Stand von WuT zugrunde zu legen. Damit stehen z. B. auch Untersuchungsmethoden wie Gammalogs zur Verfügung. Das setzt wiederum voraus, dass die Eigenschaften der Radioaktivität bekannt sind. Die allgemeine Kenntnis über den Entsorgungsweg von radioaktiven Abfällen im tiefen Untergrund ist ebenfalls bekannt. Jedoch ist nicht unbedingt als bekannt vorauszusetzen, dass eine Einlagerung der Abfälle im Salzgestein erfolgt ist.

Weiterhin wird postuliert, dass heutige geltende bergsicherheitstechnische Standards wie z. B. Sicherheitsabstände zu Flanken des Salzstockes zu berücksichtigen sind.

### **Prospektion:**

Zur Erforschung der geologischen Strukturen werden allgemein eine Kartierung sowie gravimetrische und geoelektrische Messungen durchgeführt.

Die gravimetrischen Messungen geben Aufschluss auf Dichteunterschiede im Untergrund und damit auf Salzvorkommen. Weiterführende Untersuchungen in Bezug auf das Medium Salz umfassen die

- Geoelektrik zur Detektion des Salzspiegels mit einer Tiefenauflösung von ca. 200 m – 300 m,
- Vibrationsseismik mit einer Tiefenauflösung von ca. 800 m – 900 m und
- Sprengseismik mit einer Tiefenauflösung von einigen 1000 m.

Nach den oberflächennahen Messverfahren wird bei entsprechendem Befund die Entscheidung nach Tiefbohrungen zur weiteren Erkundung getroffen. Die Festlegung der Bohransatzpunkte hängt von dem Prospektionsziel ab:

- Bei Erdöl und Erdgas werden die Bohransatzpunkte im Bereich der Salzstockflanken (Fallenstruktur, bevorzugte Lokation von Kohlenwasserstoffen) liegen.
- Bei Salz interessieren die Flanken weniger. Hier ist die Festlegung eines Bohrrasters (z. B. 1 Bohrung/km<sup>2</sup>) über den Salzstock üblich. Auch die Niederbringung einer Bohrung in den Salzstockkern ist gebräuchlich.

Mit dem Prospektionsziel ist auch der Tiefenbereich einer Bohrung eingegrenzt:

- Bei Erdöl und Erdgas liegt der Tiefenbereich > 1000 m.
- Bei Salz wird eine Endteufe von 1500 m nicht überschritten, weil unterhalb dieser Teufe kein Bergwerk, aufgrund der hohen Umgebungstemperaturen und Konvergenz sowie betriebslimitierende Temperaturen z. B. für Elektronik, aufgefahren wird.

Die Bohrungen werden i. d. R. als Kernbohrungen ausgeführt. Durch die Prospektionsbohrung würde das Endlager als Anomalie vermutlich nicht detektiert, soweit nicht direkt in die Einlagerungsbereiche bzw. direkt in einen Behälter gebohrt wird. Der Grund hierfür ist, dass die geophysikalischen Untersuchungsmethoden wie Gravimetrie und Geoelektrik in einem Bohrloch bei der Prospektion auf Salz nicht eingesetzt werden.

Im Fall, dass die Bohrung auf einen Behälter mit entsprechender Wandstärke auftrifft, würde der Behälterwiderstand registriert. Unter Einsatz des Rotary-Verfahrens würde die Bohrung einen Abrieb auf der Behälteroberfläche verursachen und die daraus re-

sultierenden Metallspäne lagern sich im Bohrklein an. Der Grund für den Bohrwiderstand ist somit identifizierbar und kann zu einer erhöhten Aufmerksamkeit der Bohrmannschaft führen. Eine weitere Sensibilisierung ist durch das mögliche unerwartete Auffinden von nicht geogenem Material gegeben. Das kann z. B. auf frühere anthropogene Aktivitäten in entsprechender Teufe hindeuten. Damit könnte der Einsatz weiterer Untersuchungsmethoden wie z. B. die Geomagnetik und Gammalog, die üblicherweise nicht bei der Salzexploration eingesetzt wird, erfolgen. Es wurden folgende Fälle als mögliche Reaktion auf die detektierte Auffälligkeit diskutiert.

- Aufgabe des Projektes wegen Anomalien und Verschmutzung des Salzes. Die Bohrung bzw. Bohrungen werden ordnungsgemäß mit Salzbeton verfüllt.
- Assoziation zu früheren Bergbauaktivitäten inklusive Entsorgungstechniken
  - Verfüllung der Bohrung bzw. Bohrungen mit Salzbeton
  - Angelegenheit wird auf den Grund gegangen auch in dem Bewusstsein auf mögliche ionisierende Strahlung
- Behälter wird als temporäres Hindernis angesehen, dadurch Einsatz von zerspannender Bohrtechnik möglich

Es wurde darauf hingewiesen, dass im Prinzip alle Materialien durchbohrt werden können. Dahinter steht die Frage nach der eingesetzten Bohrtechnik, dem verwendeten Material und dem Willen der Entscheidungsträger hinsichtlich der weiteren Durchführung des Vorhabens.

#### **Planungs- und Errichtungsphase:**

Nach der Standorterkundung und der Entscheidung für die Errichtung eines Bergwerkes erfolgt in der Planungsphase neben einer Vielzahl weiterer Vorarbeiten die Festlegung von Schachtansatzpunkten. Es werden üblicherweise mindestens zwei Schächte eingeplant. Bei geringen Abbauteufen ist auch die Entscheidung für die Errichtung einer Rampe möglich. In Bezug auf ein zu errichtendes Bergwerk zur Salzgewinnung ist davon auszugehen, dass der Schachtansatzpunkt für die Salzförderung zentral zur Lagerstätte gewählt wird. Für ein aufzufahrendes Bergwerk zu Deponiezwecken werden vermutlich die Schachtansatzpunkte nach anderen Gesichtspunkten ausgewählt. Hier wird man darauf bedacht sein, die homogenen Salzpartien, die als Schutzschicht dienen, nicht unnötig zu durchhörern. Neben den genannten praktischen und sicherheitstechnischen Aspekten, spielen vor allen Dingen auch die vorliegenden Standort-

gegebenheiten eine wesentliche Rolle. So können sich z. B. topografische und infrastrukturelle Randbedingungen oder vorliegende Schutzgebiete bzw. Schutzgüter auf die Wahl der Schachtansatzpunkte auswirken.

Bevor der Schacht erstellt wird, erfolgt in der Mitte des vorgesehenen Schachtes eine Vorbohrung. Diese Bohrung wird mit Ausnahme der ersten Bohrmeter als Kernbohrung ausgeführt. Neben der geologischen Ansprache des Bohrkerns werden in der Vorbohrung durch den möglichen Einsatz einer Multi-Shot-Sonde die Lage und der Verlauf der Bohrung ermittelt. Es erfolgt jedoch auf alle Fälle eine Abweichungsmessung und die Prüfung auf Feuchtstellen bzw. Wasserzutritte. Bei Steinsalz wird jedoch aufgrund der fehlenden Grundstrahlung keine Gammalog-Messung vorgenommen.

Eine niedergebrachte Schachtvorbohrung in den Einlagerungsbereich eines Endlagers für radioaktive Abfälle würde vermutlich auch aufgrund der mit der Vorbohrung verbundenen umfassenden geologischen und geophysikalischen Untersuchungen die Wahrnehmung von Auffälligkeiten wahrscheinlich werden lassen.

Es wurden mögliche Optimierungsmaßnahmen diskutiert, die sich auf das Einbringen von artfremden Materialien in den Salzstock entweder als Vortriebshindernis oder als möglicher Indikator für anthropogene Aktivitäten am Standort bezogen. Als Beispiele wurden Granit, Basalt und armierte Betonschichten sowie das Einbringen von auffälligem Material in den Untergrund mittels Injektionsbohrung genannt.

Nach positivem Befund der Untersuchungsergebnisse und der Vorbohrung werden die Schächte abgeteuft. Die Endteufe hängt von einer Reihe von Faktoren u. a. vom Salzspiegel, der Festlegung einer Schutzschicht ca. 200 m – 300 m und von dem zu fördernden Salz (Kalisalz oder Steinsalz) ab. Allgemein gilt jedoch, dass aus Kostengründen ein möglichst flacher Abbau von Salz angestrebt wird. So wurden z. B. als orientierende Kosten für die Schachterstellung ca. 10.000 €/m angegeben. Daneben ergeben sich natürlich mit zunehmender Betriebsdauer des Bergwerks deutlich höhere Kosten z. B. für den Transport des abgebauten Salzes bei einer größeren Abbauteufe im Vergleich zu einem flachen Abbau.

Aus den genannten Gründen wird der Bergbau in der Regel von oberen nach unteren Abbauschichten betrieben.

**Betriebsphase:**

Für den Salzabbau werden im Prinzip die Schneidtechnik und der Sprengvortrieb eingesetzt. Bei dem Abbau von Salz sind Sicherheitsabstände vorzusehen. So ist z. B. zu den Salzstockflanken ein Abstand von 150 m einzuhalten. Ein Sicherheitsabstand zu den Schächten ist nicht explizit festgelegt, jedoch werden auch hier ausreichende Distanzen zur Schachtsicherung eingehalten.

Der Salzabbau orientiert sich vorwiegend nach den vorliegenden homogenen Strukturen der Salzablagerungen und nach den genannten Sicherheitsabständen. Die Abbausteuerung wird in Abhängigkeit betriebsbegleitender geophysikalischer Messungen vorgenommen.

Bei der Schneidtechnik werden sog. Continuous Miner oder Teilschnittmaschinen eingesetzt. In der Diskussion wurde angemerkt, dass ein Auftreffen der rotierenden Schneidwerkzeuge bzw. des Fräskopfes auf einen intakten POLLUX-Behälter mit Sicherheit bemerkt würde.

Im Salzbergbau Deutschlands ist insbesondere die Sprengtechnik etabliert. Zur Vorbereitung werden Bohrlöcher von ca. 7 m Länge in das Salz getrieben und mit Sprengladungen versehen. Bei jeder ausgelösten Sprengung fallen mehr als 400 t Salz an, die mit Radladern und/oder Transportband abtransportiert bzw. weitergefördert werden.

Es wurde angemerkt, dass ein intakter POLLUX-Behälter durch die Sprengung nicht zerstört würde. Bei dieser Technik besteht die Möglichkeit vor und nach der Sprengung eingelagerte Behälter entweder durch die notwendigen Bohrlöcher zur Aufnahme der Sprengladungen oder bei dem Abtransport des Salzes zu detektieren.

Hier wurden intensiv mögliche Optimierungsmaßnahmen diskutiert. Als wirkungsvolle Maßnahmen wird die Verwendung von Indikatoren zur Erhöhung der Aufmerksamkeit bzw. Sensibilisierung der Bergleute angesehen. Aber auch das Einfärben von Steinsalzpartien mit einem Farbstoff würde den weiteren Abbau beeinflussen, da auf ein möglichst reines und nicht verunreinigtes Abbauprodukt großen Wert gelegt wird. So ist vorstellbar, dass das Versatzmaterial (Salzgrus) in den Richtstrecken des Endlagers mit einem Farbstoff versehen und/oder Material nicht geologischen Ursprungs als Indikator bzw. zur Markierung eingebracht wird. Insbesondere die Erkundungsebene des Endlagers und die Verbindungen der Endlagerbewetterung zu den Einlagerungsbereichen kann zur Aufnahme solcher Indikatoren genutzt werden. Insgesamt werden

dadurch die Detektionsmöglichkeiten bei einem Auffahren des Endlagers infolge eines späteren nicht auszuschließenden Salzbergbaus am Standort deutlich erhöht. Das Einbringen von artfremdem Material wie z. B. Basalt hat aufgrund seiner großen Härte den Vorteil, dass eine übliche in Salz angewandte drehende Bohrtechnik dieses Gestein entweder nicht oder nur mit großen Aufwand durchdringen könnte.

Zur Qualitätssicherung werden i. d. R. von dem abgebauten Salz Proben entnommen und im Labor analysiert. Allerdings werden auch nur die für Salz üblichen qualitätssichernden Analyseverfahren eingesetzt. Zu den üblichen Untersuchungen gehören z. B. die optische Begutachtung auf Unreinheiten, die Bestimmung des NaCl-Gehaltes und der Mineralbestandteile. Durch die Standardverfahren würden jedoch keine Radionuklide identifiziert.

#### **Stilllegung:**

Die Stilllegung von Salzbergwerken sieht üblicherweise vor, das Bergwerk zu fluten (vorgeschrieben in Niedersachsen) und die Schächte mit Schotter zu verschließen. Allerdings sind auch Ausnahmen davon möglich. Als ein Beispiel hierfür wird das ehemalige Kalibergwerk Salzdetfurth mit dem Konzept einer trockenen Verwahrung genannt. Die Kammern wurden verfüllt wohingegen die Strecken offen blieben.

### **A.3            Gesprächsnotiz vom 16.02.2011 bei der Fa. KBB Underground Technologies GmbH in Hannover**

#### **Gesprächsteilnehmer:**

Hr. Dipl.-Ing. Hellberg, Hr. Dipl. Geol. Horvath, Hr. Dipl.-Ing. Crotogino (KBB-Underground)

Hr. Bergoberrat Weiß (LBEG)

Hr. Dr. Fischer-Appelt, Hr. Dipl.-Ing. Beuth, Hr. Dr. Bracke (GRS)

#### **Thema:**

Zukünftige menschliche Aktivitäten im Zusammenhang mit der Erstellung von Kavernen

#### **Gesprächsunterlage:**

Als Gesprächsgrundlage wurden zu dem genannten Thema den Teilnehmern ausgewählte Informationen und Fragen zugestellt.

#### **Diskussion/Vermerk:**

Das Gespräch diente zur Hinterfragung des Standes von Wissenschaft und Technik (WuT) hinsichtlich der Erstellung von Kavernen in einem Salzstock. Die Ermittlung von WuT bildet die Grundlage für die Aufstellung von stilisierten Szenarien des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in Salz. Um die grundlegenden Elemente bezüglich Kavernenerstellung zu ermitteln, ist es neben dem Studium vorliegender Fachliteratur unerlässlich erfahrene und führende Unternehmen auf diesem Fachgebiet zu kontaktieren und zu befragen. Hierzu wurde mit der KBB Underground Technologies ein gemeinsamer Gesprächstermin vereinbart. Im Vorfeld des Gespräches wurden zur Vorbereitung essenzielle Informationen zur Thematik zusammengestellt und mit relevanten Fragestellungen den beteiligten Organisationen zugestellt. Im Gespräch wurden orientierend an den Entwicklungsphasen einer Kaverne die verschiedenen Fragestellungen und Aspekte erörtert.

### **Prämissen und Vorüberlegungen:**

Einleitend zur Diskussion wurden die folgenden Randbedingungen und Prämissen für die Behandlung eines menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle erläutert:

Das menschliche Verhalten und damit die zukünftigen menschlichen Aktivitäten können über den zugrundeliegenden Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren nicht prognostiziert werden.

Aus diesem Grund ist der heutige Stand von Wissenschaft und Technik zugrunde zu legen.

Es wird nur das unwissentliche menschliche Eindringen in ein Endlager betrachtet. D. h., die Information über den Endlagerstandort und das vom Standort ausgehende Gefährdungspotenzial ist verloren gegangen. Ein wissentliches Eindringen in ein Endlager wird in die Verantwortung der jeweiligen handelnden Gesellschaft gestellt.

Neben den o. g. Prämissen wurden weitere für die Diskussion relevante Vorüberlegungen angestellt:

Alle Überlegungen stehen unter der Vorgabe, dass zukünftig handelnde Menschen im Wissen um früheren umgegangenen Bergbau im Salzgestein eine Erkundung vornehmen. Jedoch ist das Wissen über Einzelheiten wie Ort, Art und Umfang des Bergbaus nicht mehr vorhanden.

Es ist aufgrund der o. g. Prämisse der heutige Stand der Technik zugrunde zu legen. D. h., dass z. B. Gamma-Log bekannt sind. Daher ist zu unterstellen, dass die Grundzüge der Radioaktivität bekannt sind. Die Kenntnis der früheren Endlagerung von radioaktiven Abfällen im tiefen Untergrund ist ebenfalls bekannt. Jedoch ist nicht unbedingt als bekannt vorauszusetzen, dass eine Einlagerung der Abfälle im Salzgestein erfolgt ist.

### **Prospektion:**

Bei der Standorterkundung und Standortwahl für die Errichtung von Kavernen in Salz wird auf ein möglichst homogenes, unverritztes und geringpermeables Salzgestein geachtet, da die Kavernennutzung in der Regel auf eine Vorhaltung bzw. Speicherung von Druckluft, Erdgasen, Wasserstoff, Methan oder Flüssigkeiten (z. B. Erdöl) ausge-

richtet ist. Mögliche Wegsamkeiten aufgrund früheren Bergbaus können zu erheblichen Speicherverlusten führen und müssen daher unbedingt ausgeschlossen werden.

Daher wird heute bei der Exploration in jedem Fall überprüft, ob Altbergbau im Salz umgegangen ist. Auch für zukünftige Explorationen ist insbesondere angesichts des aus dem unterstellten markscheiderischem Kenntnisverlust resultierenden Restrisikos anzunehmen, dass entsprechende Untersuchungen vorgenommen werden, um einen Altbergbau auszuschließen.

Bei der Erkundung wird insbesondere auf die Erfassung möglicher Hohlräume im Untergrund geachtet.

Die folgenden Methoden stehen für die Erkundung zur Verfügung:

Die Oberflächenseismik erlaubt eine Beschreibung der Salzstockkontur. Die innere Beschaffenheit des Salzstockes wird mit dieser Methodik jedoch nicht aufgelöst.

Die Magnetotellurik könnte Auffälligkeiten innerhalb des Salzstocks aufzeigen, die beispielsweise durch die Einlagerung von Behältern gegeben sind. Ebenso könnten Bohrlochseismik, Radargramme und Gravimetrie Auffälligkeiten aufzeigen. Die genaue Interpretation der Auffälligkeiten hängt stark vom jeweiligen Bearbeiter ab.

#### **Planungs- und Errichtungsphase:**

Die Kavernen werden bevorzugt in einer Tiefe von 550 m bis 2500 m mittels Soltechnik erstellt. Die meisten Kavernen liegen unterhalb von 1000 m. Die üblichen Abmessungen einer Kaverne können 40 m – 100 m im Durchmesser und Höhen von bis zu 300 m betragen. Die Volumina liegen üblicherweise zwischen 500.000 m<sup>3</sup> bis 1.000.000 m<sup>3</sup>.

Die Erstellung von Kavernen sieht vor zu verschiedenen Objekten bzw. geologischen Strukturen Sicherheitspfeiler bzw. Sicherheitsabstände einzuhalten. Zu nennen sind hier die Abstände zu Nachbarkavernen, die den Faktor 2 – 3-mal dem Kavernendurchmesser betragen. Weitere Sicherheitsabstände beziehen sich auf die Distanz von 200 m – 300 m zu den Salzstockflanken sowie 500 m Abstand zu Altbergwerken (ein Problem stellen hier Erkundungsbohrungen des Altbergwerks dar) und einige 10 m Abstand zu potenziell durchlässigen Gesteinen und Strukturen (z. B. Anhydrit).

### **Detektion von Auffälligkeiten:**

Die Zusammensetzung der geförderten Sole wird nur auf Salze (Anionen, Kationen), Feststoffe und pH Wert nicht jedoch auf Radioaktivität geprüft. Die vom Abfall ausgehende Anomalie der Radioaktivität würde daher bei der standardmäßig durchgeführten labortechnischen Qualitätssicherung der Sole nicht detektiert.

Gefärbter Versatz würde bei dem Solungsvorgang nicht zwingend festgestellt, da eine erhebliche Verdünnung des Versatzes mit dem ebenfalls aufgelösten Salzgestein eintritt. Die vom Abfall ausgehende Wärmeentwicklung wird sich auf die eingebrachten Wassermengen für den Solungsprozess nicht merklich auswirken, so dass die Temperaturanomalie vermutlich unerkannt bleibt.

Ein Druckabfall beim Antreffen von Hohlräumen wird mit hoher Wahrscheinlichkeit detektiert und näher untersucht. Ebenso werden Druckspitzen hervorgerufen durch einen sog. Löserfall von der Kavernenfirste festgestellt. Bei solchen Ereignissen werden die Kavernenfirste sowie der Kavernensumpf durch Ultraschall näher untersucht. Ein Pollux-Behälter würde aufgrund der hohen spezifischen Dichte beim Herabfallen bzw. Absinken in die Kaverne zu einem Druckimpuls führen, der sicher detektiert wird. Daraufhin würde eine Ultraschalluntersuchung der Firste und Sole erfolgen. Die Ausdehnung der Kaverne wird generell mittels eines Echolots untersucht. Es ist denkbar, dass die Detektion eines oder mehrerer Pollux-Behälter aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften als Zeugnisse für früheren anthropogenen Einfluss in den Salzstock gewertet werden und die Erstellung der Kaverne aufgrund der Gefahr durch ein benachbartes Altbergwerk aufgegeben wird.

Bei einem undichten oder defekten Behälter, der sich in der Kaverne befindet, würden radioaktive Gase austreten und zum Kavernentop aufsteigen und sich mit dem Sperrmedium (meist Stickstoff) der Kaverne dem sog. Blanket vermischen. Die Radioaktivität im Blanket würde vermutlich nicht detektiert.

Sofern bei der Solung durch endlagerinduzierte Anomalien Unregelmäßigkeiten festgestellt werden, die ein nicht einschätzbares Risiko für das Unternehmen der Kavernenerstellung darstellen, würden entweder weitere Untersuchungen eingeleitet oder im Zweifel das Vorhaben verworfen. Im letzteren Fall erfolgt eine Verfüllung des Sumpfes (inklusive darin befindlicher möglicher Endlagerbehälter) mit Flugasche, Salz oder Bentonit sowie die Auffüllung des erstellten Hohlraumes mit Lösung und abschließend die Zementierung der Bohrung.

**Betriebsphase:**

Aus heutiger Sicht wird von einer Betriebsdauer der Kavernen in der Größenordnung von ca. 100 Jahren ausgegangen. Erfahrungen liegen hierfür nicht vor, da sich die Nutzung von Kavernen erst in den letzten 50 Jahren entwickelt hat.

Die Druckspiele durch Entnahme und Wiederbefüllung mit Gasen finden unterhalb des Gebirgsdrucks statt und führen daher nicht zu einer Kluft- oder Rissbildung im Gebirge.

Bei der Speicherung von gasförmigen Medien in den Kavernen, z. B. Erdgas, werden Proben entnommen und analysiert, die aber eine Detektion von Gasen, die durch Endlagerkomponenten freigesetzt würden, nicht erwarten lassen. Untersuchungen auf Radioaktivität finden nicht statt. Wasserstoff ist entweder Bestandteil der Gase oder nur von untergeordneter quantitativer Bedeutung.

**Stilllegung:**

Die Kaverne wird im Normalfall mit Süßwasser oder Sole bzw. nicht gesättigter Salzlösung geflutet. Dieser Prozess erfolgt äußerst bedachtsam, da große Temperaturunterschiede von Sole und Gebirge in entsprechender Teufe aufgrund resultierender Spannungsänderungen vermieden werden sollen um die Integrität der Kaverne nicht zu gefährden. Nach der Flutung und dem Temperatenausgleich wird das Bohrloch mit Zement verfüllt. Die danach noch andauernde geringe Konvergenz entspricht der Imprägnation des umgebenden Salzgesteins mit der Sole.



## B Anhang B: Zusammenstellung möglicher Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf ein menschliches Eindringen in ein Endlager

Tab. B.1 Kategorien möglicher Optimierungsmaßnahmen gemäß Tab. B.2

Nr.	Bezug		Erläuterung des Bezuges
1.1	Zielsetzung	Reduzierung der Eindringmöglichkeit	Maßnahmen die auf die entsprechende Zielsetzung ausgerichtet sind
1.2		Reduzierung der radiologischen Konsequenzen	
2.1	Standpunkt	externe Maßnahmen	bezieht sich auf Maßnahmen, die außerhalb des Endlagersystems liegen bzw. angewandt werden
2.2		interne Maßnahmen	bezieht sich auf Maßnahmen, die innerhalb des Endlagersystems liegen bzw. aktiviert werden
3.1	Handlung	passive Maßnahmen	bezieht sich auf Maßnahmen, die einmal angelegt werden und keine weiteren Überprüfungen/ Aktualisierung/ Neuauflagen usw. benötigen
3.2		aktive Maßnahmen	bezieht sich auf Maßnahmen, die kontinuierlich bzw. in gewissen zeitlichen Abständen eine Überprüfung/ Aktualisierung/ Neuauflage usw. benötigen
4.1	Art	regulative Maßnahmen	Maßnahmen, die von der Aufsichtsbehörde/ Land/ Regierung vorgeschrieben werden
4.2		konstruktive Maßnahmen	Maßnahmen, die vom Antragsteller/ Betreiber eine konstruktive Umsetzung erfordern
4.3		planerische Maßnahmen	Maßnahmen, die vom Antragsteller/ Betreiber eine planerische Bearbeitung hinsichtlich ihrer Umsetzung/ Einsatzortes erfordern
4.4		konzeptionelle Maßnahmen	Maßnahmen, die vom Antragsteller/ Betreiber im Rahmen des Endlagerkonzeptes zu berücksichtigen sind

**Tab. B.2** Kategorien möglicher Optimierungsmaßnahmen gemäß Tab. B.2 (Fortsetzung)

Nr.	Bezug		Erläuterung des Bezuges
5.1	Attribut	hinauszögernd, verzögernd	Maßnahmen, die eine entsprechende Wirkung haben können
5.2		abhaltend, verhindernd, einschränkend	
5.3		hinweisgebend, informierend, warnend	
5.4		erschwerend, behindernd, abwehrend	
5.5		kontrollierend, überwachend	
6.1	Bindung	abhängig von der spez. menschlichen Aktivität	Maßnahmen, die in Verbindung mit einer bestimmten menschlichen Aktivität verbunden sind
6.2		unabhängig von der spez. menschlichen Aktivität	Maßnahmen, die in keiner direkten Verbindung mit einer bestimmten menschlichen Aktivität stehen
7.1	Quelle	Niederbringung einer Bohrungen	bestimmte menschliche Aktivität
7.2		Erstellung einer Kaverne	
7.3		Errichtung eines Bergwerkes	
7.4		Allgemein	keine spezifische menschliche Aktivität angesprochen
8.1	Einschätzung: Wirkung/ Nutzen	hoch	Attribut hinsichtlich der Einschätzung der möglichen Wirksamkeit der entsprechenden Maßnahme
8.2		mittel	
8.3		gering	
9.1	Einschätzung: Aufwand	hoch	Attribut hinsichtlich der Einschätzung des Aufwandes der mit entsprechenden Maßnahme verbunden sein kann
9.2		mittel	
9.3		gering	
10.1	Einschätzung: Verfügbarkeit	langfristig	Attribut hinsichtlich der Einschätzung der zeitlichen Verfügbarkeit (langfristig = 0 a bis 1 Mio. a; mittelfristig = 0 a bis 50.000 a; kurzfristig = 0 a bis 1.000 a)
10.2		mittelfristig	
10.3		kurzfristig	
11.1	Optimierungskonflikt	vorliegend	Merkmal, ob ein Optimierungskonflikt gegeben ist.
11.2		Begründung	Bei vorliegendem Optimierungskonflikt ist dieser zu begründen. Der oder die primären Optimierungsziele nach den Sicherheitsanforderungen des BMU, die durch die Optimierungsmaßnahme konterkariert werden sind anzugeben.

Tab. B.3 Zusammenstellung der Optimierungsmaßnahmen

Lfd. - Nr.	Optimierungsmaßnahmen (* X = trifft zu; (X) = unklar bz.w. trifft ggf. zu)	Hauptgruppe	1. Zielsetzung		2. Standpunkt		3. Handlung	
			1.1 Reduzierung der Eindringmöglichkeit	1.2 Reduzierung der radio-logischen Konsequenzen	2.1 externe Maßnahmen	2.2 interne Maßnahmen	3.1 passive Maßnahmen	3.2 aktive Maßnahmen
1	Informations- und Wissensethik	1. Information	X		X			X
3	Kennzeichnung und Markierung	1. Information	X		X			X
6	Archivierung und Dokumentierung (lokal, regional, national, global)	1. Information	X		X			X
30	Einführung eines Gedenktages	1. Information	X		X			X
31	Aufnahme der Thematik in das Bildungswesen	1. Information	X		X			X
32	Schaffung/ Aufrechterhaltung von soliden Voraussetzungen für den Informations-/Wissenserhalt (Organisationsstruktur, Finanzierung, Gesetz, Abkommen, int. Vereinbarungen)	1. Information	X		X			X
2	Institutionelle Kontrolle	2. Überwachung	X		X			X
4	Überwachung (Begehung des Gebietes, satelliten-gestützt)	2. Überwachung	X		X			X
5	Umweltmonitoring	2. Überwachung	X		X			X
7	Nutzungseinschränkung, Veränderungssperre	2. Überwachung	X		X			X
8	Ausweisung als Sperrgebiet	2. Überwachung	X		X			X
33	Safeguards	2. Überwachung	X		X			X
13	Einbringung von Widerständen gegen Vortriebstechniken und Erschließungstechniken	3. Konstruktion	X	(X)		X	X	X
14	Erhöhung der Behälterwandstärke	3. Konstruktion	X			X	X	X
15	Einbringen einer armierten Betonplatte in Oberflächennähe	3. Konstruktion	X			X	X	X
16	Erstellung einer Strecke ersetzt mit widerstandsfähigem Material/ Gestein (oberflächennah)	3. Konstruktion	X			X	X	X
27	Einbringen von Gummimatten in den Einlagerungsstrecken	3. Konstruktion	X			X	X	X
29	Verwendung von schwerlöslichen Einbauten	3. Konstruktion	X			X	X	X
17	Einbringen von Indikatoren zur Bemerkbarmachung, Anzeige von vorliegenden Anomalien	4. Indikation			X		X	X
18	Farbindikatoren die bei Kontakt mit Flüssigkeit reagieren und z. B. eine Verfärbung des Fluids bewirken, Uranin	4. Indikation		X		X	X	X
19	chemische Indikatoren (Farbbebung durch Oxidation mit Luftsauerstoff z. B. Indigo)	4. Indikation		X		X	X	X
20	biologische Indikatoren	4. Indikation		X		X	X	X
21	optische Indikatoren (Leuchtfarben, fluoreszierende Leuchtstoffe)	4. Indikation		X		X	X	X
22	akustische Indikatoren (auslösend bei Kontakt mit Fluid, Licht, Berührung etc.)	4. Indikation		X		X	X	X
23	mangelische Indikatoren	4. Indikation		X		X	X	X
24	olefaktische Indikatoren (schwefelorganische Verbindungen , Mercaptane, z. B. Odorierung von Erdgas)	4. Indikation		X		X	X	X
25	emittierende Indikatoren	4. Indikation		X		X	X	X
28	Warnungshinweise, Beschilderung im Einlagerungsbereich	4. Indikation		X		X	X	X
9	geländeprägende Maßnahmen (schwer erschließbar)	5. Konzeption	X		X		X	X
10	Platzierung des Endlagers (Endlagertiefe)	5. Konzeption	X			X	X	X
11	Endlagergometrie (Reduzierung der Flächenausweitung)	5. Konzeption		X		X	X	X
12	Abfallseparierung, Abschottung, Einkapselung	5. Konzeption		X		X	X	X
26	Erstellung eines Bohrflochschlusses, Bohrflochstopfens aus widerstandsfähigem Material	5. Konzeption	X			X	X	X

Tab. B.2 Zusammenstellung der Optimierungsmaßnahmen (Fortsetzung)

Lfd.-Nr.	Optimierungsmaßnahmen (* X = trifft zu; (X) = unklar bzw. trifft ggf. zu)	4. Art				5. Attribut				
		4.1 regulative Maßnahmen	4.2 konstruktive Maßnahmen	4.3 planerische Maßnahmen	4.4 konzeptionelle Maßnahmen	5.1 hinaus-zögernd, verzögernd	5.2 abhaltend, verhindernd, einschränkend	5.3 hinweisgebend, informierend, warnend	5.4 behindernd, erschwerend, abwehrend	5.5 kontrollierend, überwachend
1	Informations- und Wissensersatz	X				X		X		
3	Kennzeichnung und Markierung	X	X			X		X		
6	Archivierung und Dokumentierung (lokal, regional, national, global)	X						X		
30	Einführung eines Gedenktages	X				X		X		
31	Aufnahme der Thematik in das Bildungswesen	X				X		X		
32	Schaffung/ Aufrechterhaltung von soliden Voraussetzungen für den Informations-Wissensersatz (Organisationsstruktur, Finanzierung, Gesetz, Abkommen, int. Vereinbarungen)	X				X		X	(X)	
2	Institutionelle Kontrolle	X				X		X		X
4	Überwachung (Begehung des Gebietes, satelliten-gestützt)	X				X		X		X
5	Umweltmonitoring	X				X		X		X
7	Nutzungseinschränkung, Veränderungssperre	X				X		X		X
8	Ausweisung als Sperrgebiet	X				X		X		X
33	Safeguards	X				X		X		X
13	Einbringung von Widerständen gegen Vortriebstechniken und Erschließungstechniken		X				X		X	
14	Erhöhung der Behälterwandstärke		X				X		X	
15	Einbringen einer armierten Betonplatte in Oberflächennähe		X				X		X	
16	Erstellung einer Strecke ersetzt mit widerstandsfähigem Material/ Gestein (Oberflächennah)		X				X		X	
27	Einbringen von Gummimatten in den Einlagerungsstrecken		X				X		X	
29	Verwendung von schwerföhlischen Einbauten		X				X		X	
17	Einbringen von Indikatoren zur Bemerkbarmachung, Anzeige von vorliegenden Anomalien		X				X		X	
18	Farbindikatoren die bei Kontakt mit Flüssigkeit reagieren und z. B. eine Verfärbung des Fluids bewirken, Uranin		X				X		X	
19	chemische Indikatoren (Farbgebung durch Oxidation mit Luftsauerstoff z. B. Indigo)		X				X		X	
20	biologische Indikatoren		X				X		X	
21	optische Indikatoren (Leuchtfarben, fluoreszierende Leuchtstoffe)		X				X		X	
22	akustische Indikatoren (auslösend bei Kontakt mit Fluid, Licht, Berührung etc.)		X				X		X	
23	manganische Indikatoren		X				X		X	
24	ofaktorische Indikatoren (schwefelorganische Verbindungen Mercaptane, z. B. Odorierung von Erdgas)		X				X		X	
25	emittierende Indikatoren		X				X		X	
28	Warnungshinweise, Beschilderung im Einlagerungsbereich						X		X	
9	geländeprägende Maßnahmen (schwer erschließbar)						X		X	
10	Platzierung des Endlagers (Endlagersteufe)						X		X	
11	Endlagergeometrie (Reduzierung der Flächenausweitung)						X		X	
12	Abfallseparierung, Abschottung, Einkapselung						X		X	
26	Erstellung eines Bohrohrabschlusses, Bohrstoptopls aus widerstandsfähigem Material		X				(X)		X	

**Tab. B.2** Zusammenstellung der Optimierungsmaßnahmen (Fortsetzung)

Lfd. - Nr.	Optimierungsmaßnahmen (* X = trifft zu, (X) = unklar bzw. trifft ggf. zu)	6. Bindung		7. Quelle			
		6.1 abhängig von der spez. menschlichen Aktivität	6.2 unabhängig von der spez. menschlichen Aktivität	Niederbringung einer Bohrungen	7.2 Erstellung einer Kaverne	7.3 Errichtung eines Bergwerkes	7.4 Allgemein (keine spez. Quelle)
1	Informations- und Wissensersatz		X				X
3	Kennzeichnung und Markierung		X				X
6	Archivierung und Dokumentierung (lokal, regional, national, global)		X				X
30	Einführung eines Gedenktages		X				X
31	Aufnahme der Thematik in das Bildungswesen		X				X
32	Schaffung/ Aufrechterhaltung von soliden Voraussetzungen für den Informations-/Wissensersatz (Organisationsstruktur, Finanzierung, Gesetz, Abkommen, int. Vereinbarungen)		X				X
2	Institutionelle Kontrolle		X				X
4	Überwachung (Begehung des Gebietes, satelliten-gestützt)		X				X
5	Umweltmonitoring		X				X
7	Nutzungseinschränkung, Veränderungssperre	X					X
8	Ausweisung als Sperrgebiet		X				X
33	Safeguards		X				X
13	Einbringung von Widerständen gegen Vortriebstechniken und Erschließungstechniken	X		X		X	
14	Erhöhung der Behälterwandstärke	X		X		X	
15	Einbringen einer armierten Betondecke in Oberflächennähe		X				X
16	Erstellung einer Strecke versetzt mit widerstandsfähigem Material/ Gestein (oberflächennah)		X				X
27	Einbringen von Gummimatten in den Einlagerungsstrecken	X		X		(X)	
29	Verwendung von schwerföhlischen Einbauten	X			X		
17	Einbringen von Indikatoren zur Bemerkbarmachung, Anzeige von vorliegenden Anomalien		X				X
18	Farbindikatoren die bei Kontakt mit Flüssigkeit reagieren und z. B. eine Verfärbung des Fluids bewirken, Uranin	X		X	X		
19	chemische Indikatoren (Farbgebung durch Oxidation mit Luftsauerstoff z. B. Indigo)		X				X
20	biologische Indikatoren		X				X
21	optische Indikatoren (Leuchtfarben, fluoreszierende Leuchtstoffe)		X				X
22	akustische Indikatoren (auslösend bei Kontakt mit Fluid, Licht, Berührung etc.)		X				X
23	magnetische Indikatoren		X				X
24	olfaktorische Indikatoren (schwefelorganische Verbindungen, Mercaptane, z. B. Odorierung von Erdgas)		X				X
25	emittierende Indikatoren		X				X
28	Warnungshinweise, Beschilderung im Einlagerungsbereich		X			X	
9	geländeprägende Maßnahmen (schwer erschließbar)		X				X
10	Platzierung des Endlagers (Endlagerstufe)		X				X
11	Endlagergeometrie (Reduzierung der Flächenausweitung)		X	X			
12	Abfallseparierung, Abschottung, Einkapselung		X				X
26	Erstellung eines Bohrlochabschlusses, Bohrchlostopfens aus widerstandsfähigem Material	X		X			

Tab. B.2 Zusammenstellung der Optimierungsmaßnahmen (Fortsetzung)

Lfd. - Nr.	Optimierungsmaßnahmen (* X = trifft zu; (X) = unklar bzw. trifft ggf. zu)	8. Einschätzung: Wirkung/ Nutzen			9. Einschätzung: Aufwand			10. Einschätzung: Verfügbarkeit			11. Optimierungskonflikt	
		8.1 hoch	8.2 mittel	8.3 gering	9.1 hoch	9.2 mittel	9.3 gering	10.1 langfristig	10.2 mittelfristig	10.3 kurzfristig	11.1 vorliegend	11.2 Begründung
1	Informations- und Wissenserhalt	X								X		
3	Kennzeichnung und Markierung		X						X			
6	Archivierung und Dokumentierung (lokal, regional, national, global)	X								X		
30	Einführung eines Gedenktages	X	X				X					
31	Aufnahme der Thematik in das Bildungswesen	X	X							X		
32	Schaffung/ Aufrechterhaltung von soliden Voraussetzungen für den Informations-/Wissenserhalt (Organisationsstruktur, Finanzierung, Gesetz, Abkommen, int. Vereinbarungen)	X								X		
2	Institutionelle Kontrolle	X								X		
4	Überwachung (Begehung des Gebietes, satelliten-gestützt)	X								X		
5	Umweltmonitoring	X	X							X		
7	Nutzungseinschränkung, Veränderungssperre	X					X					
8	Ausweisung als Sperrgebiet	X								X		
33	Safeguards	X								X		
13	Einbringung von Widerständen gegen Vortriebstechniken und Erschließungstechniken		X						X			
14	Erhöhung der Behälterwandstärke	X	X						X			
15	Einbringen einer armierten Betonplatte in Oberflächennähe		X							X		
16	Erstellung einer Strecke versetzt mit widerstandsfähigem Material/ Gestein (oberflächennah)		X	X						X		
27	Einbringen von Gummimatten in den Einlagerungsstrecken			X						X		
29	Verwendung von schwerlöslichen Einbauten		X	X								
17	Einbringen von Indikatoren zur Bemerkmachung, Anzeige von vorliegenden Anomalien		X						X			
18	Farbindikatoren die bei Kontakt mit Flüssigkeit reagieren und z. B. eine Verfärbung des Fluids bewirken, Uranin		X	X					X			
19	chemische Indikatoren (Farbgebung durch Oxidation mit Luftsauerstoff z. B. Indigo)		X	X					X			
20	biologische Indikatoren		X						X			
21	optische Indikatoren (Leuchtfarben, fluoreszierende Leuchtstoffe)		X	X					X			
22	akustische Indikatoren (auslösend bei Kontakt mit Fluid, Licht, Berührung etc.)		X	X					X			
23	mangelartige Indikatoren		X	X					X			
24	ofaktorische Indikatoren (schweleorganische Verbindungen, Mercaptane, z. B. Odoierung von Erdgas)		X	X					X			
25	emittierende Indikatoren		X	X					X			
28	Warnungshinweise, Beschilderung im Einlagerungsbereich		X	X					X			
9	geländeprägende Maßnahmen (schwer erschließbar)		X	X					X			
10	Platzierung des Endlagers (Endlagerstufe)	X										
11	Endlagergeometrie (Reduzierung der Flächenausweitung)		X	X					X			
12	Abfallseparierung, Abschottung, Einkapselung		X	X					X			
26	Erstellung eines Bohlochsabschlusses, Bohlochstoppers aus widerstandsfähigem Material		X						X			



**Gesellschaft für Anlagen-  
und Reaktorsicherheit  
(GRS) mbH**

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](http://www.grs.de)

**DBE TECHNOLOGY GmbH**  
Eschenstraße 55  
31224 Peine

**international nuclear safety  
engineering GmbH**  
Jesuitenstraße 4  
52062 Aachen

**ISBN 978-3-939355-56-4**