

Synthesebericht für die VSG

Bericht zum Arbeitspaket 13

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Synthesebericht für die VSG

Bericht zum Arbeitspaket 13

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Klaus Fischer-Appelt
Bruno Baltés
Dieter Buhmann
Jürgen Larue
Jörg Mönig

März 2013

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.

Deskriptoren:

Aussagesicherheit, Ergebniszusammenfassung, Gelingen, Sicherheits- und Nachweiskonzept, VSG-Synthese

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorhabensziele und Randbedingungen	5
2.1	Randbedingungen.....	6
2.1.1	Die Sicherheitsanforderungen des BMU.....	7
2.1.2	Die Erkundung der Salzstruktur Gorleben	12
2.1.3	Abfallinventare	15
3	Durchführung des Vorhabens	17
3.1	Strukturierung und Berichtswesen	17
3.2	Projektpartner.....	20
3.3	Vorhabensebene 1: Grundlagen	23
3.3.1	Arbeitspaket 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose.....	24
3.3.2	Arbeitspaket 3: Abfallspezifikation und -mengengerüst	25
3.3.3	Arbeitspaket 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept	27
3.4	Vorhabensebene 2: Endlagerplanung und -auslegung	29
3.4.1	Arbeitspaket 5: Entwicklung initialer Endlagerkonzepte.....	30
3.4.2	Arbeitspaket 6: Endlagerauslegung und -optimierung	31
3.4.3	Arbeitspaket 11: Bewertung Human Intrusion.....	33
3.4.4	Arbeitspaket 12: Einschätzungen zur Betriebssicherheit	34
3.5	Vorhabensebene 3: Systemanalyse	35
3.5.1	Arbeitspaket 7: FEP-Katalog	36
3.5.2	Arbeitspaket 8: Szenarientwicklung	37
3.5.3	Arbeitspaket 9: Integritätsanalysen	39
3.5.4	Arbeitspaket 10: Radiologische Konsequenzenanalyse	42
3.5.5	Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe	43
3.6	Vorhabensebene 4: Synthese und Empfehlungen.....	44

3.6.1	AP 13: Synthese der VSG.....	44
3.6.2	AP 14: Empfehlungen	44
3.7	Projektkoordination, Kommunikation und Qualitätssicherung	45
4	Das Sicherheits- und Nachweiskonzept	49
4.1	Sicherheitskonzept.....	50
4.1.1	Leitgedanken.....	50
4.1.2	Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase.....	57
4.2	Nachweiskonzept	65
4.2.1	Konzept zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	66
4.2.2	Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum	67
4.2.3	Kritikalitätsausschluss	69
4.2.4	Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	69
4.2.5	Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien	73
4.3	Umgang mit Ungewissheiten	74
5	Umsetzung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Vorhaben VSG	77
5.1	Umsetzung des Sicherheitskonzepts	77
5.1.1	Radioaktive Abfälle	82
5.1.2	Endlagerbergwerke	96
5.1.3	Geologische Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche sowie weiteres Wirtsgestein und Deckgebirge.....	126
5.1.4	Verschlusskomponenten	139
5.2	Umsetzung des Nachweiskonzepts	170
5.2.1	Grundlagen der Systemanalyse.....	172
5.2.2	Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum.....	183
5.2.3	Einschluss der Radionuklide und Einhaltung der radiologischen Schutzziele	205

5.2.4	Nachweis des Kritikalitätsausschlusses	223
5.2.5	Ausweisung von Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	226
5.2.6	Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien	231
5.3	Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG.....	236
5.3.1	Ungewissheiten der Grundlagen der Sicherheitsanalyse.....	236
5.3.2	Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen	240
5.3.3	Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen	244
5.3.4	Umgang mit Modellungswissheiten	244
5.3.5	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von im Endlagersystem ablaufenden Prozessen.....	248
5.3.6	Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten.....	255
6	Zusammenfassung der Ergebnisse	257
6.1	Grundlegende Annahmen	257
6.2	Umsetzung der Sicherheitsanforderungen des BMU im Vorhaben VSG	258
6.2.1	Anforderungen an die Endlagerauslegung.....	259
6.2.2	Anforderungen an die Nachweisführung.....	268
6.2.3	Anforderungen an Qualität, Dauerhaftigkeit und Robustheit des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	289
7	Reflexion und Empfehlungen.....	313
7.1	Reflexion	313
7.1.1	Erkenntnisse aus dem Projektablauf (methodisch).....	313
7.1.2	Erfahrungen in der praktischen Anwendung der Sicherheitsanforderungen des BMU	315
7.1.3	Erkenntnisse aus dem Vorhaben VSG für ein Standortauswahlverfahren	319
7.2	Empfehlungen	333
7.2.1	Weitere Konzeptoptimierung	333
7.2.2	Forschungs- und Entwicklungsbedarf	337

	Literaturverzeichnis	349
	Abbildungsverzeichnis	365
	Tabellenverzeichnis	369
	Verzeichnis der VSG-Abschlussberichte und Memos.....	371
A	Anhang: Zusammenfassung der geowissenschaftlichen Standortbeschreibung	379

1 Einleitung

Die Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) ist ein Forschungsvorhaben, das im Zeitraum zwischen Juli 2010 und März 2013 durchgeführt wurde. Dabei sollte zum ersten Mal in Deutschland eine umfassende, vorläufige Sicherheitsanalyse für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle auf Basis der Kenntnisse an einem konkreten Standort vorgenommen werden, wobei die konzeptionellen Einzeluntersuchungen prototypischen Charakter für zukünftige Sicherheitsanalysen (u. a. im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens) haben. Ziel des vorliegenden Syntheseberichtes ist eine zusammenfassende Würdigung der im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse. Dies betrifft

- die im Vorhaben VSG angewendete Vorgehensweise zur Durchführung einer Sicherheitsanalyse,
- das im Vorhaben entwickelte Sicherheits- und Nachweiskonzept und seine konkrete Umsetzung innerhalb des Vorhabens,
- die aus den Einzelergebnissen abgeleitete Darstellung des Einschussvermögens der konzipierten Endlagersysteme gegenüber aus den radioaktiven Abfällen stammenden Radionukliden unter Berücksichtigung der vorhandenen Ungewissheiten,
- Empfehlungen für zukünftige Sicherheitsanalysen, die sich aus Erfahrungen im Zuge der Bearbeitung des Vorhabens ableiten ließen, insbesondere zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie
- Überlegungen, welche methodischen und technisch-konzeptionellen Elemente, die innerhalb des Vorhabens VSG entwickelt wurden, bei Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen eines zukünftigen Standortauswahlverfahrens verwendet werden können.

In Kapitel 2 werden die vertraglich vereinbarten grundlegenden Vorhabensziele der VSG einschließlich deren Modifikation im Jahr 2012 erläutert. Weiterhin wird auf die dem Vorhaben VSG zugrunde liegenden materiellen und regulatorischen Randbedingungen eingegangen. Die materiellen Randbedingungen bestanden in der Salzstruktur Gorleben, deren Erkundungshistorie zusammenfassend dargestellt wird, sowie in dem Abfallinventar, das im Rahmen des Vorhabens VSG ermittelt worden ist. Die zentralen regulatorischen Vorgaben für das Vorhaben VSG, insbesondere bezüglich der zu führenden Nachweise sowie der zugrunde zu legenden Bewertungsmaßstäbe, bildeten

die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit /BMU 10a/.

Die im Vorhaben VSG entwickelte und angewendete Methodik sowie die am Vorhaben beteiligten Institutionen werden in Kapitel 3 vorgestellt. Es wird erläutert, in welcher Weise die Arbeitsschwerpunkte, die für eine vorläufige Sicherheitsanalyse zu Endlagersystemen mit dem Schwerpunkt der Langzeitsicherheit relevant sind, in eine modulare Projektstruktur, gegliedert in Arbeitspakete, umgesetzt wurden. Auf die Ziele dieser Arbeitspakete und ihre fachliche Verknüpfung untereinander sowie die Dokumentation der Arbeitsergebnisse in Form von Abschlussberichten wird umfassend eingegangen. Die Ausführungen in Kapitel 3 dienen über eine alleinige Vorstellung des Arbeitsprogramms des Vorhabens VSG hinaus vor allem zum Verständnis des fachlichen Zusammenhangs der insgesamt 21 innerhalb der Arbeitspakete erarbeiteten Abschlussberichte (s. die tabellarische Zusammenstellung der Berichte im Anhang B), auf die auch in den nachfolgenden Kapiteln Bezug genommen wird. Weiterhin kann die innerhalb des prototypischen Vorhabens VSG entwickelte Vorgehensweise als hilfreiche Vorlage bei der Planung der inhaltlichen Organisation zukünftiger Sicherheitsanalysen, z. B. im Rahmen eines zukünftigen Standortauswahlverfahrens, dienen.

In Kapitel 4 werden die wesentlichen Aspekte des Sicherheits- und Nachweiskonzepts vorgestellt. Das Sicherheits- und Nachweiskonzept stellt eine mögliche Strategie dar, wie unter den konkreten Standortverhältnissen bei einem gegebenen Abfallinventar die Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU umgesetzt werden sollen. Es wird beschrieben, wie die Sicherheitsanforderungen des BMU durch Zielsetzungen konkretisiert und hieraus Maßnahmen zum Erreichen eines möglichst weitgehenden Einschlusses der Radionuklide in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) abgeleitet wurden. Weiterhin werden die hierzu erforderlichen Nachweise spezifiziert und auf die Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten eingegangen.

In Kapitel 5 wird dargelegt, wie das Sicherheits- und Nachweiskonzept im Vorhaben VSG im Einzelnen umgesetzt wurde. Dabei werden entlang der Struktur des Sicherheits- und Nachweiskonzepts die im Vorhaben VSG innerhalb der einzelnen Arbeitspakete erzielten Ergebnisse rekapituliert und dahingehend bewertet, ob und in welchem Tiefgang diese die Vorgaben des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes erfüllen. Dies betrifft sowohl die Umsetzung der geforderten sicherheitstechnischen Maßnahmen, die Nachweisführung als auch den Umgang mit Daten-, Modell- und Szenarienungewiss-

heiten innerhalb der Arbeitspakete. Weiterhin wird aus den systemanalytischen Ergebnissen des Vorhabens VSG die räumliche Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches hergeleitet. Kapitel 5 dient damit der inhaltlichen Vorbereitung der Sicherheitsaussagen, die im nachfolgenden Kapitel dargestellt sind.

Zentraler Aspekt des Kapitels 6 ist die Überprüfung, ob es mit den Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere gelingt, die langzeitsicherheitsbezogenen Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU aus heutiger Sicht zu erfüllen. Dazu wird in Zusammenfassung der in Kapitel 5 vorgenommenen Ergebnisbewertung die Umsetzung der Anforderungen an die Endlagerkonzepte, die Nachweisführung sowie das dauerhafte Einschlussvermögen und die Robustheit der konzipierten Endlagersysteme beurteilt.

In Kapitel 7 werden die während der Bearbeitung des Vorhabens gewonnenen Erfahrungen und die hieraus abgeleiteten Empfehlungen für die Durchführung nachfolgender Sicherheitsanalysen begründet. Dabei erfolgt eine Reflexion, ob die vorgegeben Vorhabensziele in Gänze erreicht wurden und welche methodischen Verbesserungsvorschläge sich im Sinne von „lessons learned“ aus den Erfahrungen in der Projektbearbeitung ergeben. Gleichmaßen werden die Erkenntnisse, die aus der erstmaligen praktischen Anwendung der Sicherheitsanforderungen des BMU resultieren, herausgestellt. Es wird außerdem diskutiert, inwiefern die Ergebnisse des Vorhabens VSG als Grundlage für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen im Rahmen eines zukünftigen Standortauswahlverfahrens verwendet werden können. Dies betrifft die Fragestellungen, welche methodischen Aspekte des Vorhabens VSG, ggf. in modifizierter Weise, bei (vorläufigen) Sicherheitsuntersuchungen zu Salinar- und ggf. auch Tonsteinstandorten angewendet werden können und welche technisch-konzeptionellen Entwicklungen auf Endlagerkonzepte für andere geologische Gesamtsituationen übertragbar sind. Weiterhin werden Optimierungsvorschläge zu den entwickelten Endlagerkonzepten unterbreitet, die sich aus den Ergebnissen der Sicherheitsanalyse ableiten lassen. Schließlich werden als Ausfluss der während der Projektbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse Empfehlungen zum zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben. Diese beschränken sich allerdings nur auf die in diesem Bericht dokumentierten, wesentlichen Aspekte. Eine zusammenfassende Dokumentation des gesamten im Vorhaben VSG identifizierten Erkundungs- sowie Forschungs- und Entwicklungsbedarfs erfolgt in einem weiteren VSG-Ergebnisbericht /THO 13/.

Der vorliegende Bericht enthält einen Anhang, in dem die wesentlichen Ergebnisse der geowissenschaftlichen Standortbeschreibung und der Langzeitprognose zum Standort Gorleben zusammengefasst werden.

2 Vorhabensziele und Randbedingungen

Im Zusammenhang mit der Aufhebung des Erkundungs-Moratoriums im Jahr 2010 wurde vom Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) beschlossen: „*In einem mehrstufigen Verfahren soll auf der Basis einer Sicherheitsanalyse, eines aktualisierten Endlagerkonzeptes und eines Reviews durch internationale Wissenschaftler zunächst geprüft werden, ob Gorleben als Endlager infrage kommt*“ /BMU 10b/. Aus diesem Grund wurde vom BMU ein entsprechendes Forschungsvorhaben, die vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG), an die GRS vergeben.

Zu Beginn lagen die Ziele des Vorhabens VSG entsprechend dem oben zitierten Beschluss des BMU in einer Aufbereitung und wissenschaftlich nachvollziehbaren Zusammenstellung des Erkundungsstandes zur Salzstruktur Gorleben sowie zu sicherheitsrelevanten Prozessen in Endlagersystemen in Salzstöcken, insbesondere als Grundlage für ein ursprünglich geplantes nachfolgendes internationales Peer Review. Auf dieser Basis sollten drei übergeordnete Ziele verfolgt werden:

- Gestützt auf die Ergebnisse von Analysen zur Integrität der Salzstruktur Gorleben und einer radiologischen Konsequenzenanalyse, die entlang der Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10a/ zu bewerten sind, sollte eine vorläufige Eignungsaussage zum Standort Gorleben abgeleitet werden. Dabei wäre nachvollziehbar darzulegen gewesen, ob und gegebenenfalls unter welchen Umständen am Standort Gorleben wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle sicher endgelagert werden könnten oder ob schon jetzt Fakten vorliegen, die gegen eine Eignung des Salzstocks sprechen.
- Da die sicherheitliche Beurteilung eines Endlagersystems nicht allein auf der Basis der Standorteigenschaften erfolgen kann sondern die Einbeziehung standortspezifisch entwickelter Einlagerungs- und Verschlusskonzepte voraussetzt, sollten Endlagerkonzepte entwickelt werden, welche, soweit dies während der Laufzeit des Vorhabens VSG möglich ist, optimiert werden.
- Weiterhin sollte der aus heutiger Sicht erforderliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf identifiziert und systematisch zusammengestellt werden.

In Einvernehmen mit dem Zuwendungsgeber BMU wurde im Rahmen des 3. Änderungsvertrages zum Vorhaben VSG vom 21.08.2012 vereinbart, auf eine dezidierte

vorläufige Eignungsprognose für den Standort Gorleben zu verzichten. Wohl aber sollte geprüft werden, ob die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Barriere am Standort Gorleben oder an Salzstandorten mit vergleichbarer geologischer Situation aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ zu erfüllen.

In Erweiterung der ursprünglichen Aufgabenstellung soll im vorliegenden Synthesebericht, in dem die Ergebnisse des Vorhabens VSG zusammenfassend gewürdigt werden, dargelegt werden, welche methodischen Ansätze der vorläufigen Sicherheitsanalyse zweckmäßig für einen Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können und welche technischen, konzeptionellen Überlegungen des Vorhabens VSG auf Endlagerkonzepte in anderen geologischen Gesamtsituationen übertragbar sind.

Im Vorhaben VSG wurde der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik (W&T) zugrunde gelegt. Weiterhin wurden die Ergebnisse der im Jahr 2010 wieder aufgenommenen untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben berücksichtigt, soweit diese noch rechtzeitig vor Erstellung der vorläufigen Sicherheitsanalyse vorlagen.

2.1 Randbedingungen

Die Durchführung des Vorhabens VSG erfolgte unter Beachtung einiger Randbedingungen, die in den nachfolgenden Kapiteln detaillierter beschrieben werden. Zu diesen gehören

- die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/, die im Oktober 2010 veröffentlicht wurden,
- der Erkenntnisstand zum konkreten Standort durch die bisherigen Erkundungsarbeiten sowie
- die Mengen und Arten an radioaktiven Abfällen, die für die Entwicklung der Endlagerkonzepte zugrunde zu legen sind.

Im Verlauf des Vorhabens haben sich die regulatorischen Randbedingungen sowie die zu berücksichtigende Menge an radioaktiven Abfällen verändert, wodurch Anpassungen in der Bearbeitung des Vorhabens erforderlich wurden.

2.1.1 Die Sicherheitsanforderungen des BMU

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle enthalten allgemeine Vorgaben hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes. Darüber hinaus enthalten sie Bewertungsmaßstäbe für die Prüfung der Genehmigungsvoraussetzungen eines neu zu errichtenden Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle, die im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens zu beachten sind. Bei der Abfassung der Sicherheitsanforderungen wurden die aktuellen Veröffentlichungen der internationalen Atomenergiebehörde (IAEA) und der internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) berücksichtigt.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert und enthalten Festlegungen zu folgenden Aspekten, die nachfolgend z. T. in verkürzter Form wiedergegeben sind.

Allgemeine Schutzziele und Sicherheitsprinzipien (Abschnitte 3 und 4):

Die allgemeinen Schutzziele betreffen

- a) den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen radioaktiver Abfälle sowie
- b) die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.

Diese beiden Schutzziele sollen durch die Erfüllung folgender Sicherheitsprinzipien erreicht werden:

Zu a):

- Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich¹ konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.

¹ Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt /BMU 10a/. Bezüglich seiner Ausweisung s. Kap. 5.2.5.

- Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.
- Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.
- Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.
- Die Auswirkungen der Endlagerung auf Mensch und Umwelt dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb Deutschlands zulässig.

Zu b):

- Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.
- Es ist eine möglichst zügige Errichtung des Endlagers zu realisieren.
- Für Errichtung und Betrieb einschließlich Stilllegung des Endlagers müssen die finanziellen Mittel zeitgerecht zur Verfügung stehen.

Schrittweises Verfahren und Optimierung (Abschnitt 5):

Da zu erwarten ist, dass zwischen der Festlegung des Standortes und der Stilllegung eines Endlagers mehrere Jahrzehnte vergehen können, soll zu bestimmten Haltepunkten, insbesondere vor wesentlichen Entscheidungen zum weiteren Vorgehen, dem Erkenntniszuwachs zum Endlagersystem und dem fortgeschrittenen Stand von Wissenschaft und Technik Rechnung getragen werden. Dabei soll eine in sich ausgewogene Optimierung der Konzeption und der Auslegung eines Endlagers erfolgen, bei der folgende Optimierungsziele zu berücksichtigen sind:

- Strahlenschutz für die Betriebsphase
- Langzeitsicherheit
- Betriebssicherheit des Endlagers

- Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle
- Sicherheitsmanagement
- technische sowie finanzielle Realisierbarkeit

Ein weiteres Optimierungsziel, die zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten, zum Beispiel bei einem unbeabsichtigten Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, ist ebenfalls, jedoch nachrangig zu den oben genannten Optimierungszielen zu berücksichtigen.

Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Abschnitt 6):

Die Gewährleistung des Strahlenschutzes in der Betriebsphase eines Endlagers (Einlagerungs- und Stilllegungsbetrieb) für Beschäftigte und Bevölkerung wird durch die entsprechenden Vorgaben des Atomgesetzes /ATG 11/ und die entsprechende untergesetzliche Verordnungen, insbesondere die Strahlenschutzverordnung /STV 08/ einschließlich der Vorgabe entsprechender radiologischer Bewertungskriterien, geregelt. Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ konzentrieren sich daher auf die Vorgabe von Bewertungskriterien für den Schutz zukünftiger Generationen vor ionisierender Strahlung in der Nachverschlussphase eines Endlagers, die die oben genannten Regelwerke nicht enthalten. Grundprinzip hierbei ist, dass die in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, dessen Integrität maßgeblich für den Schutz vor den Schäden durch ionisierende Strahlung in der Nachverschlussphase ist, so eingeschlossen sein müssen, dass sie dort verbleiben und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen (Geringfügigkeitsprinzip).

Der Zahlenwert der radiologischen Bewertungskriterien richtet sich dabei nach der Wahrscheinlichkeitsklasse der jeweils betrachteten Entwicklung des Endlagersystems. Im Einzelnen ist für die Nachverschlussphase nachzuweisen, dass durch die Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen

- für wahrscheinliche Entwicklungen nur eine zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr auftreten kann,
- für weniger wahrscheinliche Entwicklungen nur eine zusätzliche effektive Dosis für Einzelpersonen der Bevölkerung im Bereich von 0,1 Millisievert im Jahr auftreten kann.

Dabei sind jeweils Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.

Für unwahrscheinliche Entwicklungen oder solche aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden in /BMU 10a/ keine Werte für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. Allerdings ist für diese Entwicklungen im Rahmen der Optimierung zu prüfen, ob eine Reduzierung dieser Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist.

Anforderungen an Sicherheitsanalysen und ihre Bewertung für Betrieb und Langzeitsicherheit (Abschnitt 7):

Abschnitt 7 der Sicherheitsanforderungen des BMU enthält inhaltliche Anforderungen an die Nachweise, die die Betriebs- und die Nachverschlussphase eines Endlagers betreffen:

a) Betriebssicherheitsnachweise:

Im Hinblick auf den unter radiologischen Gesichtspunkten sicheren Betrieb eines Endlagers während der Einlagerungs- und Stilllegungsphase wird gemäß den Sicherheitsanforderungen ein umfassender Sicherheitsnachweis für alle Betriebszustände des Endlagers benötigt. Dabei sind anlagenspezifische Sicherheitsanalysen unter Berücksichtigung definierter Auslegungstörfällen durchzuführen, die den gemäß Strahlenschutzverordnung notwendigen Schutz von Betriebspersonal, Bevölkerung und Umwelt belegen.

b) Langzeitsicherheitsnachweis:

Für die Nachverschlussphase wird der standortspezifische Nachweis der Sicherheit des Endlagersystems über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre gefordert. Dieser Nachweis muss alle Informationen, Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, umfassen und hat das Vertrauen in diese Bewertung zu begründen. Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Punkte umfassen

- Die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung.

- Das zugrunde liegende Endlagerkonzept und die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren.
- Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen.
- Die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle.
- Die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten.

Weiterhin werden in Bezug auf die Langzeitsicherheit in /BMU 10a/ folgende Einzelnachweise gefordert:

- Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs,
- radiologische Langzeitaussage,
- Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems,
- Ausschluss von Kritikalität.

Endlagerauslegung (Abschnitt 8):

Abschnitt 8 enthält neben dezidierten Anforderungen an die Sicherheitsnachweise für die Betriebsphase eines Endlagers (Abschnitt 8.1) Anforderungen, die im Wesentlichen bei der Betriebsführung und bei der Endlagerauslegung zu berücksichtigen sind und die Langzeitsicherheit in der Nachverschlussphase betreffen:

- Die Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und die Forderung nach Minimierung der Durchörterung bei der Auffahrung von Einlagerungs- und Infrastrukturbereichen des Endlagerbergwerks (Abschnitte 8.2 und 8.3).
- Die Forderung nach räumlicher und zeitlicher Trennung von bergmännischen Arbeiten und radiologisch relevanten Tätigkeiten (Abschnitt 8.4).

Die Forderung, die Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche² möglichst gering zu halten (Abschnitt 8.5).

- Anforderungen an die verwendeten Abfallbehälter bezüglich der Möglichkeit ihrer Rückholung während der Betriebsphase und der Möglichkeit der Bergung über einen Zeitraum von 500 Jahren, wobei die hierzu erforderlichen Maßnahmen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen dürfen (Abschnitt 8.6).
- Anforderungen an ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem welches redundant und diversitär wirkt, seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, wenn einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten (Abschnitt 8.7).
- Die Forderung nach einem umsetzbaren Stilllegungskonzept (Abschnitt 8.8).

Sicherheitsmanagement und Dokumentation (Abschnitte 9 und 10):

Da das Vorhaben VSG nicht die Sicherheitsanalyse eines Vorhabensträgers, sondern ein Forschungsvorhaben ist, sind die in diesen Abschnitten formulierten Anforderungen zu den Organisationsstrukturen des Antragsstellers bzw. zum Inhalt, zur Zugänglichkeit und zum Erhalt der Dokumentation von sicherheitsrelevanten Informationen zur Lage und zu den Charakteristika des Endlagersystems für das Vorhaben nicht einschlägig und werden deshalb hier nicht aufgeführt.

2.1.2 Die Erkundung der Salzstruktur Gorleben

Nach dem Beschluss der Bundesregierung im Jahr 1974, ein „Integriertes Nukleares Entsorgungszentrum“ einzurichten, welches neben Anlagen zur Wiederaufarbeitung, Brennelementherstellung und Abfallbehandlung auch die Errichtung eines Endlagers für alle Arten radioaktiver Abfälle vorsah, wurden mehrere Salzstöcke in Norddeutschland hinsichtlich ihrer potenziellen Eignung für die Endlagerung radioaktiver Abfälle untersucht. Im Ergebnis wurde die Salzstruktur Gorleben-Rambow für eine nachfolgende Erkundung ausgewählt.

² Der Begriff „Einlagerungsbereich“ bezieht sich hier auf die Sicherheitsanforderungen des BMU. Im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG wird eine andere Definition verwendet: Die Grubenbaue mit den Einlagerungstrecken und -bohrlöchern inklusive der Querschläge werden als „Einlagerungsfelder“ bezeichnet. Als „Einlagerungsbereich“ wird die Summe der Einlagerungsfelder inklusive der zugehörigen Richtstrecken bezeichnet.

Im April 1979 begann deren übertägige geologische Erkundung in zwei Phasen: Im Zeitraum von 1979 bis 1984 wurde zunächst ein etwa 390 km² großes Gebiet südlich der Elbe untersucht. Nach der Vereinigung beider deutscher Staaten wurden die Arbeiten im Zeitraum zwischen 1996 und 1998 nach Norden in die Elbe-Löcknitz Niederung ausgedehnt. Im Rahmen des übertägigen Untersuchungsprogrammes wurden intensive seismische Untersuchungen durchgeführt, 44 Bohrungen bis einige Meter unterhalb des Salzspiegels, 4 Tiefbohrungen bis in rund 2000 m Tiefe, 2 Schachtvorbohrungen und 185 hydrogeologische Aufschlussbohrungen geteuft sowie 398 Grundwassermessstellen eingerichtet und Hunderte weiterer Aufschlüsse angelegt. Auf der Grundlage eines zusammenfassenden Zwischenberichts zu den übertägigen Erkundungsergebnissen, der im Mai 1983 von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt veröffentlicht wurde /PTB 83/, stimmte die Bundesregierung im Juli 1983 der untertägigen Erkundung des Salzstocks zu.

Die geologische Erkundung des Salinars von unter Tage aus begann mit dem Abteufen der beiden Schächte. Ab 1995 begann die Auffahrung des Infrastruktur- und des Erkundungsbereichs 1 (EB1) in einer Teufe von 840 m. Im Rahmen der untertägigen Erkundung wurden zahlreiche Bohrungen gestoßen, detaillierte untertägige Kartierungen erstellt sowie geophysikalische, hydraulische, mechanische, mineralogisch-geochemische und sonstige In-situ-Messungen und Laboruntersuchungen durchgeführt.



Abb. 2.1 Übertägige Anlagen des Erkundungsbergwerks Gorleben. Im Vordergrund Schacht Gorleben 1. (Quelle: DBE TECHNOLOGY GmbH)

Im Oktober 2000 wurde die Erkundung unterbrochen. Die Erkundungsarbeiten wurden im November 2010 wieder aufgenommen. Nach Klagen gegen die durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) Niedersachsen genehmigte Verlängerung der Zulassung des Hauptbetriebsplans und durch eine Entscheidung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wurden die Erkundungsarbeiten Ende November 2012 erneut eingestellt. Seither werden bis auf weiteres lediglich Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der bergtechnischen Sicherheit des Erkundungsbergwerks durchgeführt.

Die wesentlichen geowissenschaftlichen Erkenntnisse zu den Verhältnissen am Standort Gorleben, die den Kenntnisstand bis zum Zeitpunkt vor dem Moratorium von 2000 widerspiegeln, sind von der BGR in zusammenfassenden Fachberichten publiziert worden. Vor Beginn des Vorhabens VSG lagen bereits drei deutschsprachige, über den Buchhandel zu beziehende Fachbände vor, die von der BGR zusätzlich in englischer Sprache veröffentlicht wurden /KLI 07a/, /KÖT 07a/ und /BOR 08a/. Im Jahr 2011 erschien der 4. Berichtsband /BRÄ 11/, in dem die geotechnischen Erkundungsergebnisse beschrieben sind. Diese vier Fachberichte bildeten zusammen mit den Ergebnis-

sen der nach 2010 fortgesetzten Erkundung eine wesentliche Grundlage für die Arbeiten im Vorhaben VSG.

2.1.3 Abfallinventare

Kenntnisse zu Art und Menge an radioaktiven Abfällen bilden eine wichtige Grundlage für eine Sicherheitsanalyse, da sie u. a. Auswirkungen auf den erforderlichen Platzbedarf eines Endlagers sowie auf das Einlagerungs- und Verschlusskonzept haben. Zu Beginn des Vorhabens lag keine ausreichende Erhebung zu den im Rahmen des Vorhabens VSG zu berücksichtigenden Abfallarten und -mengen vor. Diese wurden daher im Laufe des Vorhabens ermittelt und dokumentiert (s. Kap. 3.3.2).

Aufgrund politischer Entscheidungen haben sich die zu betrachtenden Abfallmengen während der Laufzeit des Vorhabens VSG geändert. Zu Beginn galt der am 1. Januar 2000 im Atomgesetz umgesetzte Beschluss der damaligen Bundesregierung zum Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie in Verbindung mit der im September 2010 vereinbarten Laufzeitverlängerung der noch am Netz befindlichen 17 Kraftwerke. Aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergie /ATG 11/ im Juli 2011, den der Bundestag als Konsequenz aus den Ereignissen in Fukushima beschlossen hat, reduziert sich das Aufkommen an bestrahlten Brennelementen aus Druck- und Siedewasserreaktoren gegenüber dem Aufkommen, das unter den ursprünglichen Vorgaben der Laufzeitverlängerung berechnet wurde.

3 Durchführung des Vorhabens

3.1 Strukturierung und Berichtswesen

Gemäß den Erfordernissen einer Sicherheitsanalyse zu Endlagersystemen mit dem Schwerpunkt Langzeitsicherheit wurde eine Vorhabensstruktur entwickelt, die sich modular aus vier aufeinander aufbauenden Hauptebenen zusammensetzt. Diese bestehen aus der Zusammenstellung von Grundlagen, der Entwicklung und Auslegung von Endlagerkonzepten, der Durchführung von rechnergestützten Endlagersystemanalysen sowie aus der Synthese und Bewertung der Ergebnisse und hieraus abgeleiteten Empfehlungen. Das Vorhaben VSG ist in 14 Arbeitspakete (AP) gegliedert, die diesen Ebenen zugeordnet sind³:

Ebene 1: Grundlagen

- AP 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose
- AP 3: Abfallspezifikation und -mengengerüst
- AP 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept

Ebene 2: Endlagerplanung und -auslegung

- AP 5: Entwicklung initialer Endlagerkonzepte
- AP 6: Endlagerauslegung und -optimierung
- AP12: Einschätzungen zur Betriebssicherheit

Ebene 3: Systemanalyse

- AP 7: FEP-Katalog
- AP 8: Szenarienentwicklung
- AP 9: Integritätsanalysen
- AP 10: Radiologische Konsequenzenanalyse
- AP 11: Bewertung Human Intrusion

Ebene 4: Synthese und Empfehlungen

- AP 13: Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse (Synthese i. e. S.)
- AP 14: Empfehlungen

³ Die Vorhabensleitung und -koordination erfolgte durch die GRS im Rahmen des Arbeitspaketes 1 (vgl. Kap. 3.7).

Die Vorhabensstruktur folgt weitgehend den Empfehlungen, die von der Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zur Vorgehensweise bei einem Sicherheitsnachweis für ein Endlager für radioaktive Abfälle formuliert worden sind /NEA 04/ (aktualisiert: /NEA 13/). Sie reflektiert auch die Erkenntnis aus /BFS 05/, dass eine sicherheitliche Bewertung und ein Vergleich unterschiedlicher Wirtsgesteine, Geosystemtypen oder auch Standorte nur dann möglich ist, wenn entsprechend auf die Standortverhältnisse zugeschnittene Endlagerkonzepte vorliegen. Als Ergebnis einer vom BfS beauftragten Studie zur Bedeutung des Mehrbarrierenkonzeptes /GRU 05/ wurde deutlich, „*dass im Rahmen von Sicherheitsnachweisen die geologischen und technischen Barrieren eines Endlagers als integriertes System bewertet werden müssen und die Wechselwirkungen zwischen Abfall und Wirtsgestein zu berücksichtigen sind.*“ Deshalb erfolgte im Vorhaben VSG die Sicherheitsanalyse nicht allein anhand der geologischen Standortverhältnisse sondern auch unter Einbeziehung von an die Standortverhältnisse angepassten Einlagerungs- und Verschlusskonzepten, d. h. für ein gesamtes Endlagersystem, bestehend aus der geologischen Barriere und seiner Umgebung, dem verfüllten Endlagerbergwerk sowie den geotechnischen Barrieren.

Die fachliche Beziehung zwischen diesen Arbeitspaketen ist dem in Abb. 3.1 dargestellten Projektstrukturplan zu entnehmen. Ziele der Arbeitspakete und ihre Verknüpfungen untereinander werden in den Kapiteln 3.3 bis 3.6 entlang der vier Hauptebenen erläutert.

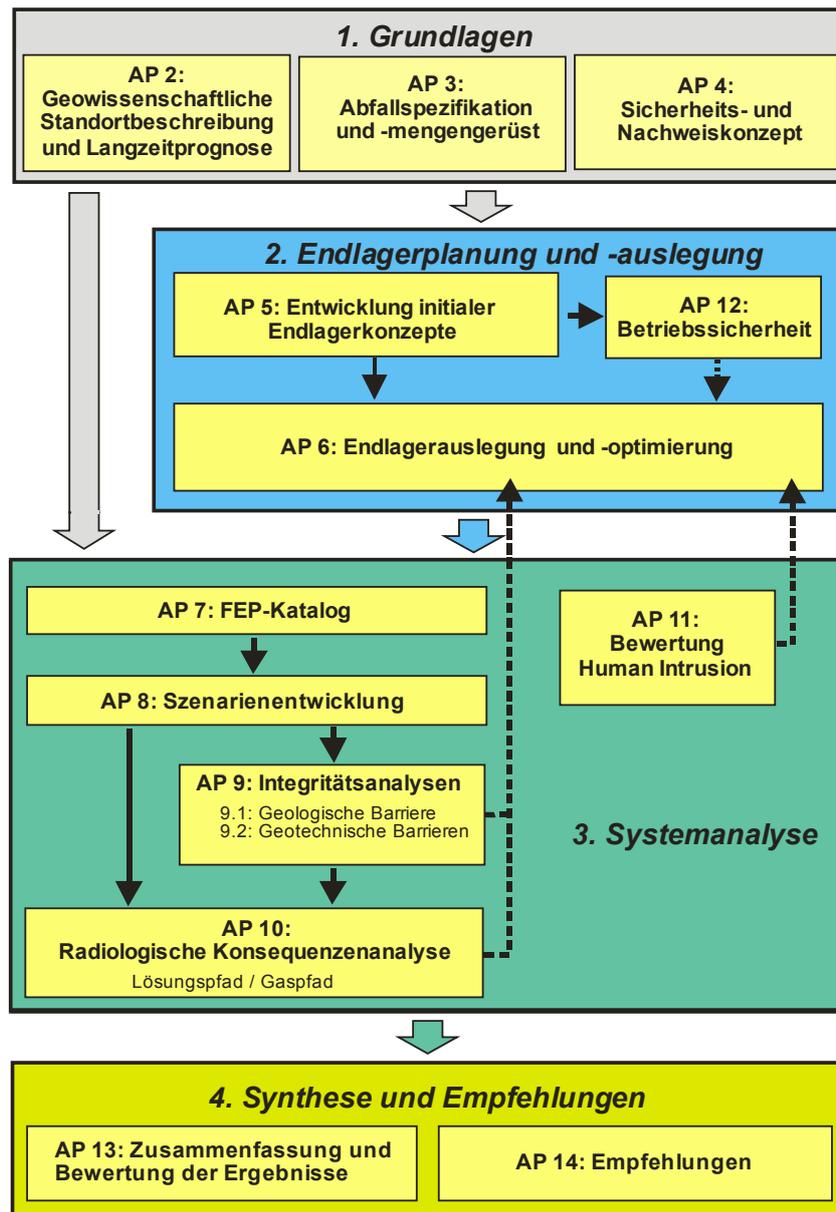


Abb. 3.1 Strukturplan des Vorhabens VSG

Die Ergebnisse der Arbeiten im Vorhaben VSG sind in vielfältigen Berichten dargestellt, die hierarchisch aufeinander aufbauen und deren fachliche Qualitätssicherung in Form eines festgelegten Review-Prozesses erfolgte, siehe Kapitel 3.7:

- Der vorliegende Synthesebericht stellt die oberste Stufe dar. In diesem Bericht werden die wesentlichen Ergebnisse und Argumente der Arbeiten in den Vorhabensebenen 1 bis 3 zusammenfassend dargestellt, bewertet und vor dem Hintergrund der Aufgabenstellung des Vorhabens VSG zu wesentlichen Gesamtaussagen verdichtet.

- Die Ergebnisse der Arbeitspakete 2 bis 12 und 14 sind detailliert in spezifischen Berichten dargestellt. Teilweise wurden in einem Arbeitspaket auch mehrere Ergebnisberichte erstellt. Bei der Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete in den Kapiteln 3.3 bis 3.6 sind die jeweiligen Ergebnisberichte aufgeführt.
- Auf der dritten Stufe stehen technische Berichte (Memos), in denen wichtige Grundlagen und Eingangsdaten für die Bearbeitung bestimmter Arbeitspakete dokumentiert sind. Diese Berichte oder Memos unterlagen nicht dem internen Review- und Qualitätssicherungsprozess des Vorhabens VSG.

3.2 Projektpartner

Der GRS oblag die wissenschaftliche und organisatorische Leitung des Vorhabens, wobei sie von einem Steering Committee begleitet wurde, in das jeder Projektpartner jeweils einen Teilnehmer entsandte. Die GRS bearbeitete einen großen Teil der Arbeitspakete selbst. Da für die Bearbeitung des Vorhabens VSG spezialisiertes Fachwissen unterschiedlicher Disziplinen notwendig war, wurden von der GRS verschiedene Partner in das Projekt eingebunden. Diese sind: Dr. Bruno Baltes, die DBE TECHNOLOGY GmbH, das Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal, das Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal, 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) sowie das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Universität Frankfurt. Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) war im Rahmen einer Beauftragung durch das Bundesamt für Strahlenschutz an dem Vorhaben beteiligt. Die am Vorhaben VSG beteiligten Institutionen werden im Nachfolgenden kurz vorgestellt.



Die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) ist eine gemeinnützige technisch-wissenschaftliche Forschungs- und Sachverständigenorganisation. Sie ist in den drei Arbeitsfeldern Reaktorsicherheit, Entsorgung und Strahlen- und Umweltschutz tätig und verfügt über interdisziplinäres Wissen, fortschrittliche Methoden und qualifizierte Daten, um die Sicherheit technischer Anlagen zu bewerten und weiterzuentwickeln. Durch die enge Verzahnung von Forschung und Begutachtung sowie durch die starke Vernetzung der verschiedenen Arbeitsfelder der GRS ergeben sich Synergien, die einen wichtigen Grundpfeiler der Fachkompetenz der GRS darstellen. Neben der Vorhabensleitung brachte die GRS im Vorhaben VSG ihre

Kompetenzen u. a. aus den Bereichen Langzeitsicherheit, Endlagerkonzepte, Abfallspezifikation, Szenarienentwicklung, Freisetzungsszenarien und Konsequenzenanalyse ein.



Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) ist die zentrale Beratungseinrichtung der Bundesregierung in allen geowissenschaftlichen und rohstoffwirtschaftlichen Fragen. Die BGR ist eine Fachbehörde des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. Mit ihrer Forschung und Beratung deckt die BGR alle geowissenschaftlichen Themen ab, auch das der Endlagerung radioaktiver Abfälle. Die BGR hat Studien zu potenziell geeigneten Standortregionen in Deutschland in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erstellt. Am Standort Gorleben hat die BGR maßgeblich an der Planung, Durchführung und Auswertung der über- und unter-tägigen Erkundung gearbeitet und die Ergebnisse in über 800 Einzelberichten sowie zusammenfassend in der mehrteiligen geowissenschaftlichen Standortbeschreibung Gorleben veröffentlicht. Im Vorhaben VSG lagen die Aufgaben der BGR in der geologischen Standortbeschreibung und der geowissenschaftlichen Langzeitprognose. Weiterhin war die BGR an den Integritätsanalysen zur geologischen Barriere beteiligt.



Die DBE TECHNOLOGY GmbH ist ein Ingenieur- und Beratungsunternehmen, das weltweit im Bereich der nuklearen Entsorgung unterstützend und beratend u. a. für Behörden, Energie-, Entsorgungs- und Bergbauunternehmen tätig ist. Das Know-how der Firma basiert auf 30-jährigen Erfahrungen in Planung, Bau und Betrieb von Endlagern sowie nationaler und internationaler Forschungstätigkeit. Das Spektrum reicht von geowissenschaftlichen und ingenieurtechnischen Untersuchungen, komplexen numerischen Modellrechnungen über betriebliche Planungen bis zu sicherheitstechnischen Bewertungen. Im Vorhaben VSG brachte die DBE TECHNOLOGY u. a. ihre Erfahrungen in den Bereichen Endlagerkonzeption, Entwicklung und Prüfung geotechnischer Barrieren sowie bei der Szenari-entwicklung ein.



Das Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) ist Teil des Schwerpunkts Mensch und Umwelt des Fachbereichs 11 der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt. Das Institut besteht aus fünf Arbeitsgruppen: Aerosol und Umweltforschung, Experimentelle Atmosphärenforschung, Mesoskalige Meteorologie und Klima, Theorie der atmosphärischen Dynamik und des Klimas, und Umweltanalytik. Mit Hilfe experimenteller, theoretischer und modellierender Forschungsarbeiten wird das Verständnis der physikalischen und chemischen Prozesse in Atmosphäre und

Umwelt verbessert und gelehrt. Im Vorhaben VSG beteiligte sich das IAU an der Bewertung der sicherheitlichen Relevanz der in der Salzstruktur Gorleben auftretenden Kohlenwasserstoffvorkommen.



Das Institut für Gebirgsmechanik (IfG) GmbH wurde 1990 durch Mitarbeiter des ehemaligen Institutes für Bergbausicherheit Leipzig gegründet. Es führt wissenschaftlich-technische Grundlagenforschung sowie praktische Untersuchungen und Begutachtungen zu geomechanischen Problemstellungen, vorrangig im Salzbergbau und der Kavernenspeicherung durch. Es besitzt langjährige Erfahrung zur Bewertung der Standsicherheit und des Konvergenzverhaltens von komplexen Grubengebäuden in verschiedenen Gesteinsformationen. Davon ausgehend führte das IfG im Vorhaben VSG vor allem thermo-mechanische Simulationsrechnungen zur Bewertung der geomechanischen Integrität der geologischen Barrieren durch.



Am Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH forschen und entwickeln rund 40 Wissenschaftler und Techniker mit langjähriger nationaler und internationaler Erfahrung. ISTec ist eine Tochter der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Das Institut berät u. a. Anlagenhersteller, Kraftwerksbetreiber, die verarbeitende Industrie, Verkehrsbetriebe und Behörden in diagnose- und sicherheitstechnischen Fragen. ISTec bündelt jahrzehntelange Erfahrungen in Forschung, Entwicklung, Implementierung und Prüfung von Sicherheitstechnologien. ISTec berät und begutachtet bei der Einführung neuer Technologien, bietet umfassenden Service bei Betrieb und Nutzung sowie ganzheitliche technische Lösungen. In das Vorhaben VSG brachte das ISTec seine Expertise zur Abfallmengenenerfassung und -charakterisierung ein.



Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist der Zusammenschluss des Forschungszentrums mit der Universität Karlsruhe. Das Institut für Nukleare Entsorgung (INE) befasst sich mit Methoden für einen wissenschaftlich fundierten Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern auf Basis geochemischer Ansätze. Die Arbeiten konzentrieren sich auf Actiniden und langlebige Spaltprodukte und umfassen die Spanne von grundlegenden Laboruntersuchungen zur Geochemie der Actiniden in aquatischen Systemen, zur Rückhaltung an Oberflächen, die Entwicklung und Anpassung von Speziationmethoden bis hin zu anwendungsorientierten Untersuchungen der Radionuklidrückhaltung im Multibarrierensystem. Im Vorhaben VSG berechnete KIT-INE die Konzentrationen der Radionuklide, die aus bestrahltem Kernbrennstoff bzw. verglastem hochradioaktivem Abfall mobilisiert werden.



Die international nuclear safety engineering (nse) GmbH mit Sitz in Aachen wurde 2010 gegründet und erbringt als Zusammenschluss verschiedener Institute der RWTH Aachen Ingenieur- und Beratungsleistungen in den Bereichen End- und Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle, Entsorgungs- und Gewinnungsbergbau, Sicherheitsanalysen, Simulation in der Kerntechnik, Charakterisierung und Behandlung radioaktiver Abfälle, Anlagenüberwachung und Automatisierung sowie Maschinenteknik und Fördertechnik unter und über Tage. Im Vorhaben VSG war die nse insbesondere bei der Beurteilung der Qualität und Aussagesicherheit der geowissenschaftlichen Standortdaten sowie bei der Endlagerauslegung und Optimierung im Hinblick auf die Rückholung von Abfallbehältern beteiligt.



TU Clausthal Am Institut für Endlagerforschung der TU Clausthal erfolgt eine interdisziplinäre Forschung zu Fragen der Standortcharakterisierung, der Standorterkundung, der geotechnischen Sicherheitssysteme und des Langzeitsicherheitsnachweises. Die Forschungsgruppe „Geochemie“ beschäftigt sich u. a. mit Fragen der Salzgeologie. Die Forschungsgruppe „Endlagersysteme“ befasst sich mit Fragestellungen der Nachweisführung für die Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Der Lehrstuhl „Deponietechnik und Geomechanik“ am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik beschäftigt sich u. a. – gestützt auf numerische Simulationen und Experimente – mit der Sicherheit untertägiger Verschlussbauwerke und Tragsysteme. Die TU Clausthal begleitete das Vorhaben VSG als unabhängiger externes Expertenteam und überprüfte die Qualität ihrer Ergebnisse. Die Review-Tätigkeit der TU Clausthal betraf folgende Arbeitsfelder des Vorhabens VSG: Geowissenschaftliche Standortcharakterisierung und Langzeitprognose, Sicherheits- und Nachweiskonzept, FEP-Katalog und Szenarienentwicklung, Integritätsanalysen, radiologische Konsequenzenanalyse sowie die Ergebnissynthese.

3.3 Vorhabensebene 1: Grundlagen

Innerhalb der Vorhabensebene 1 wurde die Ausgangsbasis für die nachfolgenden Endlagerkonzeptplanungen und Sicherheitsanalysen geschaffen. Dies betraf zum einen die Zusammenstellung und Aufbereitung der für die Analysen erforderlichen Daten und Informationen zu den geologischen und hydrogeologischen Verhältnissen am Standort Gorleben einschließlich einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose.

Zum anderen erfolgte eine Recherche und Zusammenstellung der zu erwartenden Arten und Mengen wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Beides, die geologischen Verhältnisse am Standort Gorleben und die gemäß Ausstiegsbeschluss (Juli 2011) bis Ende 2022 zu erwartenden wärmeentwickelnden Abfälle, bildeten die Randbedingungen für die Arbeiten im Vorhaben VSG. Darüber hinaus wurde eine Konzeptstudie zur Untersuchung der Machbarkeit einer optionalen Einlagerung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen durchgeführt.

Eine weitere Randbedingung bildeten, wie bereits oben erwähnt, die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle. Als weitere maßgebliche Grundlage für alle nachfolgenden Arbeitspakete wurde innerhalb des Vorhabens VSG ein Sicherheits- und Nachweiskonzept entwickelt. Prinzipielles Ziel des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ist es, unter Berücksichtigung der geologischen Situation am Standort Gorleben – möglichst unter Berücksichtigung der Übertragbarkeit auf andere Salzstöcke – und der zu erwartenden Abfallarten und -mengen eine Strategie zu entwickeln, wie gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ ein sicherer Einschluss der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide realisiert und nachgewiesen werden kann.

Die Arbeiten zu den Grundlagen des Vorhabens VSG werden in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

3.3.1 Arbeitspaket 2: Geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose

Das Arbeitspaket 2 wurde schwerpunktmäßig durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) bearbeitet. Die wesentliche Datenbasis für die geowissenschaftliche Standortbeschreibung und Langzeitprognose bilden die vier Fachbände der BGR /KLI 07a/, /KÖT 07a/ /BOR 08a/ (englischsprachige Versionen: /KLI 07b/, /KÖT 07b/ /BOR 08b/) und /BRÄ 11/ in denen die bisher am Standort Gorleben vorliegenden Erkundungsergebnisse zusammengefasst sind.

Da die geowissenschaftlichen Daten und Informationen zu den Verhältnissen am Standort Gorleben im Rahmen der Standorterkundung bis zum Jahr 2000 gewonnen wurden und damit seit ihrer Erfassung eine gewisse Zeit vergangen ist, wurde eine Bewertung der Standortdaten im Hinblick auf deren Vollständigkeit, Aussagekraft und

Ungewissheiten für eine vorläufige Sicherheitsanalyse sowie der Eignung der zugrunde liegenden Untersuchungsmethoden vorgenommen. Diese Aufgabe wurde durch nse, namentlich durch das geologische Institut der RWTH Aachen in Kooperation mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH, wahrgenommen. Diese Institutionen waren zuvor nicht an der Erkundung der Salzstruktur Gorleben beteiligt. Ihre Ergebnisse sind im Bericht /KUK 12/ dokumentiert.

Als Grundlage für die innerhalb der Szenarienentwicklung zu berücksichtigenden natürlichen zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten am Standort Gorleben wurde durch die BGR eine geowissenschaftliche Langzeitprognose erstellt. Diese umfasst eine Prognose zukünftiger klimatischer, (salz-)tektonischer, geomorphologischer und hydrogeologischer Entwicklungen. Die Ergebnisse der Langzeitprognose wurden in einem Abschlussbericht /MRU 11/ dokumentiert.

Zu ausgewählten sicherheitsrelevanten geowissenschaftlichen Aspekten, wie z. B. der Entstehung (vermeintlicher) „kryogener Klüfte“, der Deformation von Anhydrit-Schichten sowie den geologischen und hydraulischen Eigenschaften der Gorleben-Bank, wurden von der BGR aktuelle Erkenntnisse in einem weiteren Bericht dargestellt /HAM 12/, in dem auch einige Ergebnisse der nach dem Herbst 2010 fortgeführten untertägigen Erkundung am Standort Gorleben eingeflossen sind.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Standortcharakterisierung und Langzeitprognose enthält der Anhang am Ende dieses Berichts.

3.3.2 Arbeitspaket 3: Abfallspezifikation und -mengengerüst

Das Arbeitspaket 3 wurde federführend durch die GRS unter Mitarbeit von ISTec sowie nse bearbeitet. Aufgaben waren die Recherche und Dokumentation von Art und Menge sowie die Charakterisierung der radiologischen und stofflichen Eigenschaften der in Deutschland anfallenden wärmeentwickelnden Abfälle. Hierzu gehören:

- bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren, die für eine direkte Endlagerung vorgesehen sind,
- radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe,
- bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren.

Weiterhin wurden zwecks einer optionalen Betrachtung zusätzlich radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, bei denen aus heutiger Sicht nicht ausgeschlossen werden kann, dass diese gemeinsam mit wärmeentwickelnden Abfällen in einem Endlager eingelagert werden sollen, in die Untersuchungen einbezogen. Hierbei handelt es sich um

- graphithaltige Abfälle,
- Urantails aus der Urananreicherung sowie
- sonstige radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung, die z. B. aufgrund ihrer radiologischen Eigenschaften nicht in einem anderen Endlager endgelagert werden können.

Die Aufgabe im Vorhaben VSG bestand darin, zu analysieren, ob eine gemeinsame Endlagerung von wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen möglich bzw. sinnvoll ist oder ob hierdurch so große sicherheitstechnische Nachteile in Kauf genommen werden müssen, dass ein derartiges Konzept hinfällig werden könnte.

Über die Zusammenstellung der Mengengerüste und der Charakteristika hinaus wurden im Arbeitspaket 3 für die verschiedenen Abfalltypen entsprechende Abfallbehältertypen vorgeschlagen und die technischen Charakteristika dieser Behälter beschrieben. Die Angaben zu Art und Menge der für die Endlagerung der radioaktiven Abfälle erforderlichen Behälter bildeten eine wesentliche Grundlage für die Planung der Endlagerbergwerke und der Einlagerungskonzepte im Rahmen der Arbeitspakete 5 und 6.

Während der Laufzeit des Vorhabens VSG haben sich die Abfallmengengerüste aufgrund politischer Entscheidungen mehrfach geändert. Zu Beginn des Vorhabens VSG galt der am 1. Januar 2000 im Atomgesetz umgesetzte Beschluss der damaligen Bundesregierung zum Ausstieg aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie. Mit der im September 2010 vereinbarten Laufzeitverlängerung wurden den noch am Netz befindlichen 17 Kraftwerken, abhängig von ihrem Alter, zusätzliche Laufzeiten von 8 Jahren für ältere und 14 Jahre für jüngere Anlagen zugeordnet. Entsprechend diesen Randbedingungen wurden die bestrahlten Brennelemente aus Leistungsreaktoren unter Berücksichtigung der im Jahr 2000 festgelegten Reststrommengen für die noch am Netz befindlichen Reaktoren, der Einstellung der Wiederaufarbeitung von bestrahlten Brennelementen im Jahre 2005 sowie der im Herbst 2010 vereinbarten Laufzeitverlängerung

für die Kernkraftwerke /ATG 10/ bestimmt. Die entsprechenden Abfallmengengerüste und die Abfallcharakteristika wurden in einem Bericht /PEI 11a/ dokumentiert. Diese Abfallmengengerüste bildeten zunächst die Grundlage für die Entwicklung der initialen Endlagerkonzepte, die die Arbeitsgrundlage für weitere Analysen zu Beginn des Vorhabens VSG bildeten (vgl. Kap. 3.4).

Aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergie /ATG 11/, den der Bundestag als Konsequenz aus den Ereignissen in Fukushima im Juli 2011 beschlossen hat, reduziert sich das Aufkommen an bestrahlten Brennelementen aus Druck- und Siedewasserreaktoren gegenüber dem Aufkommen, das unter den ursprünglichen Vorgaben der Laufzeitverlängerung berechnet wurde. Entsprechend wurden die neuen Abfallmengengerüste berechnet und in einem zweiten, aktualisierten Bericht /PEI 11b/ dokumentiert. Diese aktuellen Abfallmengen wurden den Berechnungen in der Systemanalyse (insbesondere in AP 9 und AP 10) zugrunde gelegt.

Auf die Abfallmengengerüste und die Abfallcharakteristika wird zusammenfassend in Kapitel 5.1.1 eingegangen.

3.3.3 Arbeitspaket 4: Sicherheits- und Nachweiskonzept

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept wurde durch die GRS entwickelt. Ziel des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ist die Darstellung der Strategie, wie unter den konkreten Standortverhältnissen bei einem gegebenen Abfallinventar ein dauerhaft sicherer Einschluss der in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren erreicht werden soll und nachgewiesen werden kann.

Durch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ werden bereits bestimmte Vorgaben bezüglich des Sicherheitskonzeptes gemacht. Da die Sicherheitsanforderungen wirtsgesteinsunabhängig formuliert sind, müssen sie für eine Anwendung auf einen gegebenen Standort mit seiner geologischen Situation konkretisiert werden.

Um zu Beginn des Vorhabens VSG möglichst rasch eine Grundlage für die Entwicklung von Endlagerkonzepten und die Durchführung von Systemanalysen bereitzustellen, wurden zunächst die Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes erarbeitet und in /MÖN 11/ dokumentiert. Da die Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ im

Rahmen des Vorhabens VSG erstmalig auf einen konkreten Standort, für den Endlagerkonzepte zu entwickeln waren, angewendet wurden, ergab sich im Zuge der im Vorhaben gewonnenen Erfahrungen die Notwendigkeit zu weiteren Konkretisierungen. Diese wurden in einem abschließenden Bericht zum Sicherheits- und Nachweiskonzept in /MÖN 12/ dokumentiert. Hauptaspekt der Überarbeitung war eine systematisch strukturierte Ableitung von Zielsetzungen, und, daraus abgeleitet, der strategischen, planerischen und technischen Maßnahmen für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und für die Auslegung des Endlagerbergwerks. Die in den Grundzügen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes erarbeiteten Anforderungen an die Nachweisführung haben sich inhaltlich jedoch nur geringfügig geändert. Auf die Inhalte des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes des Vorhabens VSG wird in Kapitel 4 genauer eingegangen.

Allerdings konnte es nicht Ziel des Vorhabens sein, sämtliche in den Sicherheitsanforderungen geforderten Nachweise zu führen, da es sich bei den im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepten um Konzeptstudien prototypischen Charakters handelte, die z. B. im Hinblick auf die Betriebsabläufe oder die betriebliche Infrastruktur noch keine Detaillierung in einem Tiefgang erlaubten, wie es beispielsweise für die Durchführung von umfassenden Störfallanalysen erforderlich gewesen wäre.

Bei dem im Vorhaben VSG entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzept wurden folgende Aspekte aus den Sicherheitsanforderungen nicht (vollumfänglich) einbezogen:

- Die sicherheitsrelevanten Aspekte der *Betriebsphase* (Abschnitte 8.1 und 8.8 in /BMU 10a/) konnten im Stadium einer vorläufigen Sicherheitsanalyse noch nicht detailliert bewertet werden, da die Planung der Endlagerkonzepte im dazu notwendigen Detaillierungsgrad nicht vorliegt und im Vorhaben VSG auch nicht zu entwickeln war. Dies betrifft beispielsweise den geforderten umfassenden Sicherheitsnachweis für alle Zustände des Endlagerbetriebes (Abschnitt 7.1 /BMU 10a/) sowie das nach Abschnitt 7.4 /BMU 10a/ geforderte Kontroll- und Beweissicherungsprogramm. Es wurde aber überprüft, ob die für das Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und ob aus Sicht der Betriebssicherheit grundlegende Bedenken gegen die Machbarkeit erkennbar sind /PEI 12/.
- Da das Vorhaben VSG nicht die Sicherheitsanalyse eines Vorhabensträgers ist, sondern sich eher im konzeptionellen Bereich bewegt, sind die Sicherheitsanforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen, im Wesentlichen im Ab-

schnitt 9 /BMU 10a/ zum Sicherheitsmanagement, für das Vorhaben VSG nicht einschlägig.

- Entsprechendes gilt für die Anforderung in Abschnitt 10 /BMU 10a/ an den generationenübergreifenden Erhalt der Dokumentation aller für Sicherheitsaussagen und für zukünftig zu treffende Beurteilungen und Entscheidungen relevanten Daten und Dokumente.

Das in Kapitel 4 vorgestellte Sicherheits- und Nachweiskonzept bezieht sich folglich auf die Aspekte und Anforderungen, die die technische Sicherheit in der Nachverschlussphase betreffen.

3.4 Vorhabensebene 2: Endlagerplanung und -auslegung

Unter Endlagerkonzepten werden Entwürfe von übertägigen und untertägigen Anlagen eines Endlagerbergwerks, die durch Schachtförderanlagen verbunden sind, verstanden. Bezüglich der untertägigen Anlagen (Grubengebäude) wurden im Vorhaben VSG mehrere Layout-Varianten betrachtet. Diese unterscheiden sich im Hinblick auf die Anordnung der verschiedenen Abfalltypen, die eingesetzte Einlagerungstechnologie und – hiermit verbunden – die eingesetzten Behältertypen:

Variante A: Optionale Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern in einem Endlagerflügel südwestlich der Schächte Gorleben 1 und 2.

Variante B1: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Endlagerbehältern des Typs POLLUX[®] in horizontalen Strecken in einem Endlagerflügel nordöstlich der Schächte Gorleben 1 und 2.

Variante B2: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern in einem Endlagerflügel nordöstlich der Schächte Gorleben 1 und 2 im Sinne einer Differenzbetrachtung zur Variante B1.

Variante C: Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs) in einem Endlagerflügel nordöstlich der Schächte Gorleben 1 und 2.

Durch die Kombination der Variante A mit jeweils einer der anderen Varianten ergaben sich die im Vorhaben VSG untersuchten Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC.

Die Arbeiten zu den Endlagerkonzeptentwicklungen erfolgten im Vorhaben VSG innerhalb der Arbeitspakete 5 (Entwicklung initialer Endlagerkonzepte) und 6 (Endlagerauslegung und -optimierung).

3.4.1 Arbeitspaket 5: Entwicklung initialer Endlagerkonzepte

Ziel der Arbeiten im Arbeitspaket 5, welches von der DBE TECHNOLOGY bearbeitet wurde, war, möglichst früh während der Vorhabenslaufzeit vorläufige (d. h. noch nicht optimierte) Entwürfe der oben beschriebenen Einlagerungsvarianten zu erarbeiten, um eine Arbeitsgrundlage für den FEP-Katalog, die hierauf aufbauende Szenarienentwicklung sowie für die in der Systemanalyse zu entwickelnden Rechenmodelle zu schaffen. Dabei wurde auf Ergebnisse vorlaufender wissenschaftlicher Studien, wie z. B. das Vorhaben ISIBEL /ISI 08/ zurückgegriffen. Die Entwicklung der initialen Arbeitsmodelle umfasste im Einzelnen:

- Die technische Spezifizierung der für die verschiedenen Abfalltypen zu verwendenden Endlagerbehälter auf der Grundlage der Vorschläge aus AP 3.
- Die Konzeption der Grubengebäude für die oben beschriebenen Einlagerungsvarianten, d. h. die planerische Festlegung von Lage und Abmessungen von Richtstrecken, Querschlägen, Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöchern sowie sonstiger Infrastruktureinrichtungen.
- Die Entwicklung und Beschreibung eines technischen Transport- und Einlagerungskonzepts einschließlich der hierfür erforderlichen über- und untertägigen Infrastruktureinrichtungen und technischen Komponenten.
- Die Entwicklung und Beschreibung eines technischen Konzepts für Stilllegung und Rückbau des Endlagerbergwerks nach erfolgter Abfalleinlagerung.
- Die Entwicklung und Beschreibung eines Verfüll- und Verschlusskonzepts auf der Basis des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes, in Form eines Initialkonzepts bestehend aus den (geo-)technischen Barrieren Salzgrusversatz, Strecken und Schachtabdichtungen, welches im Verlauf des Vorhabens VSG weiterentwickelt wurde.

- Die Beschreibung der Betriebsabläufe bei Auffahrung, Beladung, Rückbau und Verschluss des Endlagerbergwerks einschließlich der Berücksichtigung betriebssicherheitlicher und strahlenschutztechnischer Aspekte.

Die initialen Endlagerkonzepte lagen Anfang 2011 vor. Entsprechend konnten hier noch nicht die Abfallmengengerüste berücksichtigt werden, die sich als Konsequenz des Beschlusses zum Ausstieg aus der Kernenergie vom Juli 2011 /ATG 11/ ergeben haben. Vielmehr basierten sie noch auf denjenigen Abfallmengen, die aus der im Herbst 2010 vereinbarten Laufzeitverlängerung für die Kernkraftwerke resultierten und die im Rahmen des Arbeitspaketes 3 in /PEI 11a/ dokumentiert wurden. Die initialen Endlagerkonzepte wurden im Bericht /BOL 11/ dokumentiert.

3.4.2 Arbeitspaket 6: Endlagerauslegung und -optimierung

Innerhalb des Arbeitspaketes 6 erfolgte eine Modifizierung und Optimierung der in AP 5 entwickelten initialen Endlagerkonzepte. Die Modifizierungen betrafen die thermische Auslegung der Endlagerkonzepte sowie die Erfordernisse, die sich aus den während der Vorhabenslaufzeit veränderten regulatorischen Randbedingungen ergaben. Im letzteren Fall wurden beispielsweise die neuen Abfallmengengerüste infolge des Ausstiegsbeschlusses oder Vorgaben in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ bezüglich der Gewährleistung der Rückholbarkeit von Abfallbehältern während der Betriebsphase berücksichtigt. Die Optimierungsplanungen bezogen sich in Übereinstimmung mit den entsprechenden Optimierungsgeboten in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ (Abschnitt 5) im Wesentlichen auf Langzeitsicherheitsaspekte (Zuverlässigkeit und Qualität der langfristigen Verschlüsse), Fragen der Betriebssicherheit und des betrieblichen Strahlenschutzes, Maßnahmen zur Reduzierung der Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens sowie die Identifizierung von Optimierungsmöglichkeiten für Endlagerbehälter und Rückholungskonzepte. Im Einzelnen wurden bei der Auslegung und Optimierung der modifizierten Endlagerkonzepte folgende Aspekte bearbeitet:

- Modifikation der Grubengebäude für die drei Einlagerungsvarianten gemäß den reduzierten Mengen an bestrahlten Brennelementen aus Druck- und Siedewasserreaktoren, die aus dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie vom Juli 2011 /ATG 11/ resultieren. Die Grundlage hierfür bildete der entsprechend aktualisierte Bericht zu Abfallspezifikation und Mengengerüst (Arbeitspaket 3) /PEI 11b/.

- Thermische Auslegung der Grubengebäude und Bestimmung der Abstände zwischen Endlagerbehältern und Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöchern auf der Grundlage der im Vorhaben VSG zugrunde gelegten Abfallinventare und der in AP 5 entwickelten Endlagerkonzepte unter Berücksichtigung der thermischen Auslegungskriterien des Sicherheits- und Nachweiskonzepts.
- Optimierung der geometrischen Abmessungen der Grubengebäude im Hinblick auf eine möglichst geringe Durchörterung der geologischen Barriere sowie einen möglichst geringen Flächenbedarf.
- Technisch-konzeptionelle Umsetzung der Sicherheitsanforderungen des BMU, die Rückholung von Abfallbehältern aus Strecken und tiefen Bohrlöchern während der Betriebsphase und die Bergbarkeit von Abfallbehältern über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Endlagerverschluss betreffend (/BMU 10a/ Abschnitt 8.6).
- Planerische Umsetzung der im Sicherheits- und Nachweiskonzept /MÖN 11/ bzw. /MÖN 12/ enthaltenen Vorgaben zum Verfüll- und Verschlusskonzept und dessen Optimierung bezüglich der Zuverlässigkeit und der Qualität des Einschlusses der Abfälle. Dies betraf einerseits die Festlegung der Materialeigenschaften und der Einbringtechnologie von Salzgrusversatz zur Verfüllung offener Grubenhohlräume sowie Festlegungen zu Lage und Abmessungen von geotechnischen Verschlussbauwerken (Schacht- und Streckenverschlüsse)⁴.
- Überprüfung und Modifikation der Endlagekonzepte bezüglich betrieblicher Strahlenschutzaspekte. Dies betraf im Wesentlichen die Planung von Strahlenschutzbereichen sowie die auf Modellrechnungen gestützte Entwicklung eines adäquaten Bewetterungssystems, welches infolge der Trennung von Frisch- und Abwetterführung die Erfordernisse des betrieblichen Strahlenschutzes erfüllt. Hierbei wurden auch modifizierte Bewetterungsvarianten entwickelt, die im Fall der vollständigen Rückholung von Abfallbehältern eine ausreichende Frischluftversorgung gewährleisten sollen. Ebenfalls flossen die Ergebnisse einer betriebssicherheitlichen Prüfung der Endlagerauslegung ein, die im Rahmen des Arbeitspaketes 12 (s. u.) durchgeführt wurde.

⁴ Die konkrete Auslegung der geotechnischen Verschlussbauwerke, d. h. die genauen Spezifikationen des Aufbaus der Strecken- und Schachtverschlüsse und der hierfür zu verwendenden Materialien einschließlich der entsprechenden ingenieurtechnischen Nachweisführungen, oblag dagegen dem Arbeitspaket 9.2, welches im Vorhaben VSG der Ebene 3 (Systemanalysen) zugeordnet war.

- Optimierung der Endlagerkonzepte im Hinblick auf eine Verringerung der Wahrscheinlichkeit unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in die Endlagersysteme in der Nachverschlussphase nach Verlust der Informationen zur Existenz eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Hier flossen die Ergebnisse des Arbeitspaketes 11 (s. u.) ein.
- Nachweis der dauerhaften Unterkritikalität in den Abfallgebinden mit bestrahlten Brennelementen, d. h. der Ausschluss sich selbst erhaltender Kettenreaktionen infolge der Veränderung des Radionuklidinventars oder des Zustands der Endlagerbehälter bzw. geochemischer Prozesse in der Nachverschlussphase.

Die Koordination des Arbeitspakets 6 und die Durchführung der Endlagerauslegung und -optimierung oblagen der DBE TECHNOLOGY. Die Analysen zum Kritikalitätsausschluss wurden durch die GRS durchgeführt. Die Konzeptplanungen zur Rückholung von Abfallgebinden aus Einlagerungsstrecken und tiefen Bohrlöchern wurden durch nse (namentlich durch das Institut für nuklearen Brennstoffkreislauf und das Institut für Maschinenteknik der Rohstoffindustrie an der RWTH Aachen) erarbeitet. Die innerhalb des Arbeitspaketes 6 erzielten Ergebnisse sind im Bericht /BOL 12/ umfassend dokumentiert. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse enthalten die Kapitel 5.1.2.1 (Auffahrungs- und Einlagerungskonzepte) und 5.1.2.2 (Verfüll- und Verschlusskonzept). Bei der Optimierung der projektierten Endlagerkonzepte flossen die Ergebnisse zweier weiterer Arbeitspakete ein, deren Aufgabenstellung im Folgenden kurz erläutert wird. Beide Arbeitspakete wurden in der ursprünglichen Projektplanung der Ebene 3 (Systemanalyse) zugeordnet, daher weisen sie hohe AP-Rangnummern auf. Da die Ergebnisse jedoch auch unmittelbar in die Optimierung der Endlagerkonzepte einfließen, werden sie hier zum besseren Verständnis im Zusammenhang mit der Ebene 2 aufgeführt.

3.4.3 Arbeitspaket 11: Bewertung Human Intrusion

Ziel des Arbeitspaketes 11 war es, zunächst eine Identifikation und Beschreibung (unter Annahme heutiger Rohstoffbedürfnisse und Explorationstechnologien) denkbarer zukünftiger menschlicher Aktivitäten vorzunehmen, die nach einem Verlust des Wissens um die Existenz eines Endlagers im Untergrund zu einem unbeabsichtigten Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen können.

Hieraus wurden stilisierte Szenarien abgeleitet und dafür mögliche technische Maßnahmen dahingehend untersucht, ob sie

- die Wahrscheinlichkeit des unbeabsichtigten Eindringens reduzieren können oder
- die radiologischen Konsequenzen nach einem erfolgten menschlichen Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich begrenzen.

Anlass für die Einbeziehung dieses Arbeitspaketes in die Vorhabensstruktur der VSG war die entsprechende Forderung in /BMU 10a/ (Abschnitt 5.2), wonach im Rahmen der Optimierung der Langzeitsicherheit eines konzipierten Endlagers auch auf eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit des Eintretens unbeabsichtigten menschlichen Eindringens und der resultierenden radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung hinzuwirken ist. Dabei ist die diesbezügliche Optimierung eines Endlagers gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU nachrangig zu den primären Optimierungszielen Strahlenschutz und Sicherheit in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement⁵ sowie technischer und finanzieller Realisierbarkeit durchzuführen. Aus diesem Grund wurde in enger Zusammenarbeit mit den Bearbeitern des Arbeitspaketes 6 abgewogen, welche innerhalb des Arbeitspaketes 11 erarbeiteten Optimierungsmaßnahmen zu verwerfen sind, wenn deren Auswirkungen die primären Optimierungsziele signifikant konterkarieren.

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 11, welches von GRS (Arbeitspaketleitung), DBE TECHNOLOGY und nse bearbeitet wurde, wurden in einem Abschlussbericht /BEU 12a/ dokumentiert, eine Zusammenfassung und Diskussion der wesentlichen Ergebnisse enthält Kapitel 5.2.6.

3.4.4 Arbeitspaket 12: Einschätzungen zur Betriebssicherheit

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ enthalten in den Abschnitten 7.1 und 8.1 Nachweisanforderungen, die die Sicherheit des Betriebs eines Endlagers, die Einlagerung von Abfällen und den Verschluss betreffen. Aus diesem Grund wurde der Aspekt der Betriebssicherheit auch im Vorhaben VSG berücksichtigt.

⁵ Nicht berücksichtigt, da das Vorhaben VSG nicht die Sicherheitsanalyse eines Vorhabensträgers darstellt sondern sich eher im konzeptionellen Bereich bewegt.

Im Vorhaben VSG sollte eine Überprüfung der entwickelten Endlagerkonzepte dahingehend erfolgen, ob bereits aus heutiger Sicht Aspekte vorliegen, die Zweifel an der Realisierbarkeit der projektierten technischen Maßnahmen bzw. an der Gewährleistung der Betriebssicherheit hervorrufen. Im Vorhaben VSG erfolgte die Überprüfung der Betriebssicherheit daher vor dem Hintergrund, ob die im Rahmen des Arbeitspaketes 5 entwickelten initialen Endlagerkonzepte dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und insoweit keine grundlegenden Bedenken bezüglich der Durchführbarkeit ggf. später zu führender Sicherheitsnachweise erkennbar sind. Soweit die Ergebnisse der betriebssicherheitlichen Prüfungen im Rahmen der Bearbeitung des Vorhabens VSG umsetzbar waren, flossen diese in die Optimierung der Endlagerkonzepte, die im Arbeitspaket 6 durchgeführt wurde, ein (Abb. 3.1).

Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 12, welches durch die GRS bearbeitet wurde, wurden in einem Abschlussbericht /PEI 12/ dokumentiert.

3.5 Vorhabensebene 3: Systemanalyse

Die Aufgabe der Systemanalyse lag in der Untersuchung und Bewertung der Qualität und der Dauerhaftigkeit des Einschlussvermögens der projektierten Endlagersysteme für die in den Abfällen enthaltenen Radionuklide. Sie umfasst dabei folgende Aspekte:

1. Die systematische Beschreibung des Istzustandes sowie möglicher zukünftiger Entwicklungen des Endlagersystems (Arbeitspakete 7 und 8).
2. Die Analyse des Integritätserhalts der geologischen Barriere und der geotechnischen Verschlussbauwerke (Arbeitspaket 9).
3. Die Analyse des Einschlussvermögens des Mehrbarrierensystems und möglicher radiologischer Konsequenzen infolge der Freisetzung von Radionukliden aus den radioaktiven Abfällen (Arbeitspaket 10).

Die einzelnen Arbeitsschritte der Systemanalyse werden im Folgenden entlang der ihnen zugeordneten Arbeitspakete erläutert.

3.5.1 Arbeitspaket 7: FEP-Katalog

Das Ziel des Arbeitspaketes 7 bestand in der Identifikation von Faktoren, die innerhalb des Nachweiszeitraums das Endlagersystem und seine denkbaren zukünftige Entwicklungen charakterisieren. Diese Faktoren werden gemäß internationaler Vorgehensweise mit dem englischen Akronym FEP (*Features, Events* und *Processes*) bezeichnet:

- Merkmale (*Features*) sind Bedingungen oder Gegebenheiten, durch die ein bestimmtes System oder Teilsystem zu einem Zeitpunkt charakterisiert ist, wie z. B. das Radionuklidinventar oder die Porosität des Versatzes.
- Ereignisse (*Events*) sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen im Vergleich zum Nachweiszeitraum sehr kurzen Zeitraum eintreten, z. B. Erdbeben oder menschliche Eingriffe im Bereich des Endlagers.
- Prozesse (*Processes*) sind Vorgänge und Veränderungen, die über einen im Vergleich zum Nachweiszeitraum länger andauernden Zeitraum ablaufen, wie z. B. Konvergenz, Diapirismus oder der Zerfall langlebiger Radionuklide.

Die Summe der FEP bildet gleichsam eine umfassende Bestandsaufnahme dessen, welche sicherheitsrelevanten Merkmale das Endlagersystem charakterisieren, welche Ereignisse in der Zukunft eintreten können bzw. welche Prozesse derzeit ablaufen oder in der Zukunft ablaufen können.

Die Basis des im Vorhaben VSG entwickelten FEP-Katalogs bildete der im Vorhaben ISIBEL erarbeitete FEP-Katalog /ISI 10/. Im Vorhaben ISIBEL wurde unter Einbeziehung des universellen FEP-Katalogs der OECD-NEA /NEA 00/ erstmals ein FEP-Katalog für die Endlagerung bestrahlter Brennelemente und anderer wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle in einem Salzstock am Beispiel eines generischen Standortes in der norddeutschen Tiefebene unter Nutzung der Daten des Standortes Gorleben erstellt /ISI 10/. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurde die Entwicklung eines FEP-Katalogs im Vorhaben VSG fortgeführt. Die Modifikationen und Erweiterungen betrafen zum Beispiel die Berücksichtigung der im Vorhaben VSG zugrunde gelegten Behälter- und Endlagerkonzepte, der radioaktiven Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren, und der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, der Rückholbarkeit der Abfälle sowie spezieller geologischer Prozesse /WOL 12a/.

Entsprechend internationaler Praxis erfolgte die Auflistung und Beschreibung ebenjener Merkmale und Eigenschaften der einzelnen Komponenten des Endlagersystems und zukünftig möglicher Ereignisse bzw. Prozessabläufe einschließlich ihrer gegenseitigen Beeinflussungen und Abhängigkeiten sowie ihrer Relevanz für Barrierenfunktionen in Form eines FEP-Katalogs. Abgeleitet wurden die FEP unter Berücksichtigung

- der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten des Standortes und der Ereignisse und Prozesse, denen dieser Standort im Nachweiszeitraum natürlicherweise unterworfen sein kann, unter besonderer Berücksichtigung ihres Einflusses auf die geologische Barriere (z. B. Einfluss mehrfacher Inlandsvereisungen),
- der von den eingelagerten radioaktiven Abfällen ausgehenden Prozesse (z. B. thermischer Einfluss der Zerfallswärme auf die geologische Barriere),
- des verschlossenen und verfüllten Endlagers, seiner geotechnischen Verschlussbauwerke und der prozessbedingten Veränderungen, die diese erfahren (z. B. fortschreitende Salzgruskompaktion).

In der Projektstruktur des Vorhabens VSG bildet der FEP-Katalog das zentrale Verbindungselement zwischen den Grundlagen (Standortbeschreibung, geowissenschaftliche Langzeitprognose und Abfallspezifikation, Projektstrukturebene 1), den entwickelten Endlagerkonzepten (Projektstrukturebene 2) und der Systemanalyse (Projektstrukturebene 3). Insbesondere bildet er die Vorstufe für die Szenarienentwicklung, die wiederum die Basis für die Integritätsanalysen und die radiologische Konsequenzenanalyse ist.

Der FEP-Katalog wurde von GRS (Arbeitspaketleitung), BGR, DBE TECHNOLOGY, IfG und KIT-INE erarbeitet. Die Ergebnisse des Arbeitspaketes 7 wurden in einem Abschlussbericht /WOL 12a/ dokumentiert. Dieser Bericht enthält Erläuterungen zu Konzept und Aufbau des FEP-Katalogs, der FEP-Katalog selbst wurde in Form einer CD-ROM dem Abschlussbericht beigelegt /WOL 12b/.

3.5.2 Arbeitspaket 8: Szenarienentwicklung

Ein Endlagersystem wird in der Zukunft genau eine bestimmte Entwicklung erfahren. Diese ist unbekannt, da trotz umfangreicher Kenntnisse zu den verschiedenen Einflussfaktoren die tatsächliche, zukünftige Entwicklung nicht belastbar in allen Einzelaspekten und Details prognostiziert werden kann. So sind Zeitpunkte und Ausprägungen

bestimmter zukünftiger Ereignisse an einem Standort nicht eindeutig bestimmbar oder es sind alternative Entwicklungen vorstellbar, die sich in ihren Auswirkungen auf das Endlagersystem unterscheiden. Hieraus resultieren Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems.

Es ist jedoch möglich, verschiedene denkbare Entwicklungsmöglichkeiten im Sinne von Alternativentwicklungen zu beschreiben. So kann beispielsweise vorausgesetzt werden, dass chemische und physikalische Prozesse in Zukunft so ablaufen wie dies in der Gegenwart geschieht. Weiterhin kann unter bestimmten Voraussetzungen unterstellt werden, dass sich viele klimatische oder geologische Prozesse, die am betrachteten oder ähnlich gearteten Standorten in der letzten Million Jahren abliefen bzw. bis heute andauern, auch innerhalb des Nachweiszeitraums in Zukunft ablaufen werden können. Entsprechende Aussagen gelten für das Auftreten von Ereignissen. Aus diesem Grund fordern auch die Sicherheitsanforderungen des BMU in Abschnitt 7.2 eine umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien /BMU 10a/.

Im Vorhaben VSG wurden innerhalb des Arbeitspaketes 8 für den Standort Gorleben eine systematische Szenarientwicklung auf Basis des FEP-Katalogs und der zu betrachtenden Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC (s. Kapitel 3.4.1) durchgeführt und denkbare Entwicklungsmöglichkeiten identifiziert. Hierbei wurde den oben angeführten (Szenarien-) Ungewissheiten dadurch begegnet, dass insgesamt ein Raum von Entwicklungsmöglichkeiten beschrieben wird, der die tatsächliche, aber unbekannte Entwicklung umfassen soll. Das bedeutet, dass die tatsächliche Entwicklung im Hinblick auf ihre sicherheitsrelevanten Auswirkungen auf das Endlagersystem durch die im Rahmen der Szenarientwicklung abgeleiteten Entwicklungsmöglichkeiten abgedeckt ist. So sollten die hypothetischen langzeitsicherheitlichen Konsequenzen, die aus den identifizierten Entwicklungsmöglichkeiten resultieren, die nach heutigem Verständnis plausiblen Systementwicklungen abdecken und damit die Bandbreite der im Rahmen der praktischen Vernunft denkbaren Konsequenzen erfassen.

Die identifizierten Szenarien wurden entsprechend ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in die Kategorien „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“ eingeordnet. Die Notwendigkeit dazu ergibt sich aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, wobei in Abschnitt 6 in Abhängigkeit von der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenariums unterschiedlich restriktive radiologische Schutzkriterien angesetzt werden.

Die im Rahmen des Arbeitspaketes 8 abgeleiteten Szenarien bildeten die Grundlage für die Ableitung von Rechenfällen für die nachfolgenden rechenmodellgestützten Si-

cherheitsanalysen. Auf der Grundlage dieser Szenarien wurden für die nachfolgenden Sicherheitsanalysen Lastfälle für die geologische Barriere und die geotechnischen Barrieren identifiziert, aus denen die entsprechenden Rechenfälle abgeleitet wurden.

Die Szenarientwicklung wurde unter der Federführung der GRS zusammen mit den Institutionen BGR, DBE TECHNOLOGY, IfG und KIT-INE durchgeführt. Es handelt sich weitgehend um das gleiche Team, welches auch an der Erstellung des FEP-Katalogs beteiligt war. Methodik und Ergebnisse der im Vorhaben VSG durchgeführten Szenarientwicklung wurden ausführlich in einem Abschlussbericht /BEU 12b/ dokumentiert.

3.5.3 Arbeitspaket 9: Integritätsanalysen

Das Ziel des Arbeitspaketes 9 bestand in der Analyse der Integrität der geologischen Barriere und der geotechnischen Verschlussbauwerke. Der Begriff Integrität beschreibt das Vorliegen der einschlusswirksamen Eigenschaften einer Barriere /MÖN 12/. Im Vorhaben VSG wurden gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept die Integritätsuntersuchungen zunächst für die gesamte geologische Barriere, welche die Salzstruktur Gorleben umfasst, sowie für die geotechnischen Verschlussbauwerke durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse zur Integrität der geologischen Barriere wird in einem späteren Schritt die Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches festgelegt. Organisatorisch wurde das Arbeitspaket 9 in 2 Teilarbeitspakete untergliedert:

Arbeitspaket 9.1: Integritätsanalysen zur geologischen Barriere

Ziel des Teilarbeitspaketes 9.1 war die Überprüfung, ob die aus den bisherigen Erkundungsergebnissen abgeleiteten heutigen Eigenschaften der Salzstruktur Gorleben, das Einschlussvermögen gegenüber den in den Abfällen enthaltenen Radionukliden betreffend, auch in Zukunft erhalten bleiben, und zwar auch dann, wenn durch bestimmte Ereignisse oder Prozesse mechanische oder thermische Lastfälle ausgelöst werden, die auf die geologische Barriere einwirken.

Die im Rahmen der Integritätsanalysen zu betrachtenden Lastfälle unterscheiden sich in:

1. Exogene Lastfälle, die natürlichen Ursprungs sind, und auch ohne die Existenz eines Endlagers den Standort betreffen würden. Hierzu gehören z. B. Erdbeben,

oder die thermischen und mechanischen Auswirkungen von Kaltzeiten (Permafrost, Inlandeisüberfahrungen etc.).

2. Endogene Lastfälle, die mittelbar oder unmittelbar durch die Einlagerung radioaktiver Abfälle in die Salzstruktur induziert werden. Hierzu gehören z. B. die mechanischen Auswirkungen von Thermospannungen, die in der Salzstruktur infolge der zerfallsbedingten Wärmeleistung der Abfälle auftreten können oder mechanische Lastfälle die infolge eines Gas- oder Lösungsdruckaufbaus im Endlagerbergwerk auf die geologische Barriere einwirken können.

Das Erfordernis für die Durchführung von Integritätsanalysen der geologischen Barriere leitet sich direkt aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ aus Abschnitt 7.2.1 ab. Hiernach ist für sämtliche wahrscheinliche Entwicklungen nachzuweisen, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre sichergestellt ist. Die Durchführung der Integritätsanalysen der geologischen Barriere erfolgte im Vorhaben VSG durch die GRS (Arbeitspaketleitung) sowie durch die BGR und das IfG. Die Ergebnisse wurden im Bericht /KOC 12/ umfangreich dokumentiert. Eine zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Ergebnisse enthält Kapitel 5.2.2.1.

Arbeitspaket 9.2: Integrität geotechnischer Barrieren

Das Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG basiert bezüglich des Verschlusses der Endlagerbergwerke darauf, dass die bei der untertägigen Hohlraumauffahrung erzeugten Durchörterungen der geologischen Barriere dadurch rückgängig gemacht und langfristig verheilt werden, dass die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche mit Salzgrusversatz verfüllt werden. Durch das Kriechen des Steinsalzes (Konvergenz) kompaktiert der Versatz, wodurch sich dessen Hohlräume verringern, bis er langfristig ähnliche stoffliche Eigenschaften annimmt wie das umgebende Steinsalz. Die Geschwindigkeit der Salzgruskompaktion hängt dabei insbesondere von der vor Ort herrschenden Temperatur, dem Feuchtegehalt des Salzgrusversatzes und der Konvergenzrate des Salzgebirges ab (s. Kap. 5.1.4.6). Bis zu einem Zustand, der demjenigen von intaktem Steinsalz ähnelt, können je nach den oben genannten Einflussparametern Zeiträume zwischen einigen Jahrzehnten und wenigen 1.000 Jahren vergehen. Dies bedeutet, dass die Einschusswirksamkeit des Salzgrusversatzes noch nicht direkt zum Zeitpunkt des Endlagerverschlusses vorliegt.

Wegen der erst langfristigen Wirksamkeit der Salzgruskompaktion erfordert das Verschlusskonzept weitere technische, vorübergehend wirksame Barrieren, die zum Zeitpunkt des Verschlusses eines Endlagers praktisch sofort ihre Dichtwirkung entfalten und deren Funktionstüchtigkeit mindestens so lange gewährleistet sein muss, bis der Salzgrusversatz infolge der kompaktionsbedingten Permeabilitätsabnahme eine ausreichende Dichtwirkung gegenüber Lösungen entfaltet hat. Zu diesen schnellwirkenden Barrieren gehören die Schachtabdichtungen der Schächte Gorleben 1 und 2 sowie eine im Rahmen der Endlagerplanung (AP 5 und 6) festgelegte Anzahl von Streckenverschlüssen. Letztere haben nach dem in AP 6 erarbeiteten Verschlusskonzept einerseits die Aufgabe, die mit Salzgrus versetzten Einlagerungsbereiche für wärmeentwickelnde und vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle hydraulisch voneinander zu trennen. Andererseits sollen sie beide Einlagerungsbereiche gegenüber dem restlichen Grubengebäude, dem Infrastruktur- und den Schachtbereichen abdichten. Aufgrund bestehender Ungewissheiten bei der Prognose der Salzgruskompaktion wurden die Verschlussbauwerke gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG /MÖN 12/ mit einem Zielwert für die Funktionsdauer (Wirkungszeitraum) von 50.000 Jahren ausgelegt.

Aufgabe des Teilarbeitspaketes 9.2 war es, die oben genannten Abdichtbauwerke so zu planen, dass diese eine dem Sicherheitskonzept genügende Abdichtwirkung entfalten, indem sie den Zutritt von Deckgebirgs- und Formationswässern in die Einlagerungsbereiche möglichst vollständig unterbinden, und nachzuweisen, dass diese Abdichtwirkung über die geplante Funktionsdauer erhalten bleibt. Hierzu gehörte die Auslegung der Abdichtbauwerke, d. h. die Konzeptplanung der Abmessungen, der eingesetzten Materialien und der Herstellung von Schacht- und Streckenverschlüssen, wobei die Lage dieser Abdichtungen bereits durch die Auslegung der Endlagerkonzepte im Rahmen von AP 6 vorgegeben war. Weiterhin waren die entsprechenden Nachweisforderungen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes umzusetzen. Letztere beziehen sich auf den Nachweis eines ausreichend hohen hydraulischen Widerstandes und den Nachweis der Funktionstüchtigkeit der geotechnischen Abdichtbauwerke über die vorgesehene Funktionsdauer von ca. 50.000 Jahren (Integrität). Hierbei waren alle thermischen, mechanischen, hydraulischen und geomechanischen Prozesse zu berücksichtigen, die die Funktionsfähigkeit der Abdichtbauwerke infrage stellen.

Die Durchführung der Arbeiten zur Auslegung der geotechnischen Barriere und der hierauf bezogenen Nachweisführung erfolgte im Vorhaben VSG durch DBE TECHNOLOGY (Arbeitspaketleitung) und die GRS. Eine Zusammenfassung der erziel-

ten Ergebnisse enthält Kapitel 5.2.2.2. Die Dokumentation der Arbeiten im Arbeitspaket 9.2 erfolgte im Vorhaben VSG in zwei Abschlussberichten: Der Bericht /MÜL 12a/ stellt die planerische Auslegung (Bemessung) der Abdichtbauwerke vor, der Bericht /MÜL 12b/ dokumentiert die Ergebnisse der vertieften Nachweisführung.

3.5.4 Arbeitspaket 10: Radiologische Konsequenzenanalyse

Zentraler Aspekt der radiologischen Konsequenzenanalyse war die Ermittlung möglicher radiologischer Konsequenzen der verschiedenen zu betrachtenden Szenarien gemäß der in den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderten radiologischen Langzeitaussage. Hiernach ist zu überprüfen, ob die in /BMU 10a/ in den Abschnitten 6.2 und 6.3 dargestellten radiologischen Schutzkriterien erfüllt sind. Entsprechend ist auch im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG die Bewertung der Qualität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf den Einschluss der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide eine der zentralen Nachweisforderungen. Diese Bewertung erfolgt für die verschiedenen Szenarien anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen von Radionukliden über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Hierbei waren auch die in der Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe erzielten Ergebnisse zur Sicherheitsrelevanz der Gas- und Kondensatvorkommen im Hauptsalz der Salzstruktur Gorleben einzubeziehen (s. Kap. 3.5.5).

Die Arbeiten in AP 10 bauen auf den Ergebnissen aller vorherigen Arbeitspakete auf. Im Detail werden die Auswirkungen der verschiedenen Szenarien mittels geeigneter Rechenfälle ermittelt. Bei der Ableitung der Rechenfälle war zu unterscheiden, ob die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien (Referenz- und Alternativszenarien)

- direkt die Radionuklidmobilisierung bzw. ihren Transport im integren Zustand des Barrierensystems betrafen und somit direkt in Rechenfälle zu überführen waren oder
- erst in Integritätsanalysen (AP 9) zunächst dahingehend überprüft wurden, ob sich die Eigenschaften der geologischen bzw. geotechnischen Barrieren so ändern, dass im Rahmen der Konsequenzenanalyse hierzu zusätzliche Rechenfälle abgeleitet werden mussten (vgl. Abb. 3.1).

Die Durchführung der radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgte im Vorhaben VSG durch die GRS (Arbeitspaketleitung) sowie durch KIT-INE (Ableitung der Radionuklidquellterme). Die Ergebnisse wurden in einem umfangreichen Abschlussbericht /LAR 13/ dokumentiert. Eine zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Ergebnisse enthält Kapitel 5.2.3.

3.5.5 Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe

Die Ergebnisse der Erkundung der Salzstruktur vor dem Moratorium im Jahr 2000 ließen Fragen bezüglich der Sicherheitsrelevanz der im Hauptsalz der Staßfurtserie (z2HS) vorkommenden Kohlenwasserstoffe (dispers verteilte Gas- und Kondensat-Einschlüsse) offen. Eine systematische Auseinandersetzung, ob sich durch das Vorkommen von Kohlenwasserstoffen relevante Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Salzstöcken ergeben, lag zum Beginn des Vorhabens VSG nicht vor. Auch bestanden zu diesem Zeitpunkt noch keine ausreichend abgesicherten standortspezifischen Ergebnisse zur Zusammensetzung und den Konzentrationen von Kohlenwasserstoffvorkommen und zu ihrer Verteilung im Hauptsalz der Salzstruktur Gorleben. Diese Fragestellung wurde zwar im Rahmen der nach dem Moratorium fortgesetzten Erkundungsarbeiten durch die BGR intensiv bearbeitet, allerdings war abzusehen, dass diese Arbeiten innerhalb der Vorhabenslaufzeit der VSG nicht abgeschlossen sein würden.

Daraus folgte, dass zusätzlich zu den Erkundungsarbeiten der BGR ergänzende Untersuchungen und Einschätzungen zur sicherheitstechnischen Bedeutung der Kohlenwasserstoffe im Rahmen des Vorhabens VSG erforderlich waren. Aus diesem Grund wurde zu Beginn des Vorhabens die Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe mit Experten unterschiedlicher Fachrichtungen von allen im Vorhaben vertretenen Institutionen eingerichtet. Sie war in der ursprünglichen Projektplanung nicht vorgesehen und ist daher formal keinem Arbeitspaket zugeordnet.

Die Ergebnisse zur Sicherheitsrelevanz der Kohlenwasserstoffe flossen in den FEP-Katalog (AP 7) die Szenarienentwicklung (AP 8), die Integritätsanalysen der geologischen Barriere (AP 9.1) sowie die radiologische Konsequenzenanalyse (AP 10) ein und werden zusammenfassend in Kapitel 5.1.3 gewürdigt. Die Dokumentation der durch die Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe erzielten Ergebnisse erfolgte im Vorhaben VSG im Bericht /BRA 12/.

3.6 Vorhabensebene 4: Synthese und Empfehlungen

Die letzte Ebene des Vorhabens VSG betrifft die Zusammenfassung, Auswertung und Bewertung der in den vorangegangenen Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse. Sie wurde in zwei Arbeitspakete gegliedert.

3.6.1 AP 13: Synthese der VSG

Ziel dieses Arbeitspaketes war die zusammenfassende Darstellung der im Vorhaben VSG geleisteten Arbeiten und die sicherheitstechnischen Bewertung der erzielten Ergebnisse. Die Bearbeitung wurde durch die GRS ausgeführt. Die Dokumentation erfolgt im vorliegenden Bericht.

3.6.2 AP 14: Empfehlungen

Ziel des Arbeitspaketes 14 war die zusammenfassende Dokumentation des zukünftigen Erkundungs- und des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, der während der Bearbeitung des Vorhabens VSG in den einzelnen Arbeitspaketen identifiziert und ausführlich in den Arbeitspaketabschlussberichten dokumentiert wurde.

Bezüglich des Erkundungsbedarfs war es zunächst das Ziel, aus dem Blickwinkel einer Sicherheitsanalyse sicherheitsrelevante Ungewissheiten hinsichtlich der Geologie bzw. der geologischen Entwicklung des Standortes zu identifizieren, um diese nachfolgend durch ein entsprechend ausgerichtetes Erkundungsprogramm gezielt reduzieren zu können. Aufgrund der Einstellung der Erkundung des Standorts Gorleben im November 2012 wurden die Empfehlungen zum Erkundungsbedarf, die zunächst allein auf die Untersuchung der Salzstruktur Gorleben abzielten, auf die Erkundung von Salzstandorten allgemein ausgeweitet.

Bezüglich des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs waren Empfehlungen für zukünftige Untersuchungen zur Verbesserung des Prozessverständnisses, insbesondere zur Reduzierung von Ungewissheiten, sowie zur technischen Realisierbarkeit von sicherheitsrelevanten technischen Komponenten der Endlagerkonzepte und zur Erhöhung der Robustheit des Endlagersystems zu formulieren.

Das Arbeitspaket 14 wurde im Vorhaben VSG durch nse bearbeitet. Die Ergebnisse wurden in einem zusammenfassenden Abschlussbericht /THO 13/ dokumentiert. Auf die wesentlichen Empfehlungen wird in Kapitel 7.2.2 eingegangen.

3.7 Projektkoordination, Kommunikation und Qualitätssicherung

Gegenstand der Projektkoordination war die wissenschaftlich-technische und die administrativ-organisatorische Leitung des Vorhabens. Während die administrativ-organisatorische Projektleitung alleine durch die GRS im Rahmen des Arbeitspaketes 1 wahrgenommen wurde, erfolgte die wissenschaftlich-technische Leitung durch ein Steering Committee, einen wissenschaftlichen Lenkungsausschuss, der aus Vertretern der Hauptprojektpartner GRS, BGR, DBE TECHNOLOGY, IfG, und nse zusammengesetzt war. Im Rahmen der unter Vorsitz der GRS durchgeführten monatlichen Sitzungen des Steering Committees, wurden alle für das Vorhaben VSG grundlegenden wissenschaftlich-technischen und nachweisstrategischen Fragestellungen beraten und über das weitere Vorgehen entschieden.

Die Kommunikation innerhalb des Vorhabens VSG fand hauptsächlich in Form von zahlreichen Arbeitspaket-internen und -übergreifenden Arbeitstreffen statt. Darüber hinaus wurden innerhalb der Projektlaufzeit vier 2-3-tägige Workshops abgehalten, an denen nahezu alle am Vorhaben VSG Beteiligten teilnahmen. Ziel der Workshops war zu Beginn des Vorhabens vor allem die Abstimmung der Bearbeitungskonzepte und der Festlegung fachlicher Schnittstellen zwischen den Arbeitspaketen. Im weiteren Projektverlauf dienten die Workshops vor allem einer ganzheitlichen Präsentation und Diskussion der innerhalb des Vorhabens VSG erzielten Ergebnisse und der Lösung AP-übergreifender fachlicher Problemstellungen.

Die Arbeitspakete wurden durch Arbeitspaketkoordinatoren geleitet. Diese gehörten im Regelfall der schwerpunktmäßig involvierten Institution an. Die Aufgabe der AP-Koordinatoren bestand in der Abstimmung der Arbeiten innerhalb des Arbeitspaketes, der Einberufung und Leitung von AP-Sitzungen, der Darstellung der Arbeitsprogramme und der erzielten Ergebnisse innerhalb des Vorhabens VSG (z. B. auf den Workshops), der Koordination der Berichtserstellung sowie der Zusammenfassung des in ihrem Arbeitspaket identifizierten Forschungs- und Entwicklungsbedarfs. Darüber hinaus waren sie Ansprechpartner der Projektleitung.

Ein weiteres wichtiges Kommunikationswerkzeug war ein für das Vorhaben VSG entwickeltes MS-Sharepoint-Portal, auf das alle am Vorhaben VSG Beteiligten zugreifen konnten. Das Portal diente vor allem zur Ablage von Zwischenergebnissen, Memos, Berichtsentwürfen und verwendeter Literatur sowie zur Ankündigung von Terminen von Arbeitspakettreffen, Workshops etc.

Etwa quartalsweise fanden unter der Leitung des BMU Projektstatusgespräche zur Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben statt. Ziel war hier vor allem die Präsentation der im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse durch die GRS, die Darstellung der Erkenntnisse, die im Rahmen der fortgesetzten Standorterkundung Gorlebens gewonnen wurden, durch das BfS sowie eine gemeinsame Diskussion und Abstimmung zur weiteren Vorgehensweise.

Die fachliche Qualitätssicherung der erarbeiteten Zwischen- und Abschlussberichte erfolgte in Form eines festgelegten Berichts-Review-Prozesses, an dem die Projektleitung und die Mitglieder des Steering-Committees beteiligt waren. Nach Abgabe eines Berichtsentwurfes wurde dieser innerhalb einer 2-wöchigen Review-Phase kommentiert und zur Überarbeitung an die Berichtsaufsteller übersendet. Zusätzlich wurden die Berichtsentwürfe durch das Institut für Endlagerforschung und den Lehrstuhl „Deponietechnik und Geomechanik“ am Institut für Aufbereitung, Deponietechnik und Geomechanik der TU Clausthal (TUC) durchgesehen, welche als unabhängiger externer Experte die Qualität der im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse überprüfte. Die Review-Tätigkeit der TUC betraf die Arbeitsfelder geowissenschaftliche Standortcharakterisierung und Langzeitprognose (AP 2), Sicherheits- und Nachweiskonzept (AP 4), FEP-Katalog und Szenarienentwicklung (AP 7 und 8), Integritätsanalysen (AP 9), radiologische Konsequenzenanalyse (AP 10) sowie die Ergebnissynthese (AP 13 und 14). Nach Überarbeitung der Berichtsentwürfe wurden diese erneut einer einwöchigen, abschließenden Prüfungsphase durch die oben genannten Reviewer unterzogen, in deren Rahmen noch offene Fragestellungen bilateral zwischen Autoren und Reviewern geklärt wurden. Abschließend wurden die Berichte fachlich von der Projektleitung abgenommen. Im Rahmen des fachlichen Review-Prozesses fand auch die Konsistenzprüfung der im Vorhaben VSG verwendeten Daten statt.

Die formale Qualitätssicherung erfolgte ausschließlich durch die GRS. Diese bezog sich vor allem auf die orthographische Prüfung der Berichte, die Prüfung auf Konsistenz und Verfügbarkeit der zitierten Literatur sowie die Sicherstellung eines einheitli-

chen Layouts der VSG-Berichte. Der Druck, Versand der Berichte und ihre Veröffentlichung im Internet erfolgte ebenfalls durch die GRS.

4 Das Sicherheits- und Nachweiskonzept

Dem **Sicherheitskonzept** liegen Leitgedanken (vgl. Kap. 4.1.1) zugrunde, die in übergeordneter und sehr qualitativer Weise beschreiben, wie im konkreten Fall die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Diese Leitgedanken werden auf Basis der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, der vorliegenden Kenntnisse zu den im Endlagersystem möglicherweise ablaufenden Prozessen, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen können, sowie zu den geologischen Standortgegebenheiten entwickelt. Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich konkrete Anforderungen an die Standorteigenschaften, die Endlagerkonzepte, die Endlagerauslegung und die im Rahmen des Vorhabens VSG zu erbringenden Bewertungen ab.

Ausgehend von den Leitgedanken werden Zielsetzungen für das Sicherheitskonzept abgeleitet. Aus diesen Zielsetzungen werden strategische planerische und technische Maßnahmen für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und für die Auslegung des Endlagerbergwerks abgeleitet und ggf. Anforderungen an diese Maßnahmen formuliert.

In ähnlicher Form werden für das **Nachweiskonzept** die erforderlichen Einzelnachweise identifiziert und die Bewertungsmaßstäbe benannt. Mit dem Sicherheits- und Nachweiskonzept werden in Form von überwiegend qualitativen Zielsetzungen und Maßnahmen die Sicherheitsanforderungen des BMU für die Zwecke des Vorhabens VSG präzisiert. Die auf diese Weise abgeleiteten Zielsetzungen und Maßnahmen sind daher auch auf andere Standorte mit Salzstöcken übertragbar, solange das jeweilige Sicherheits- und Nachweiskonzept auf denselben Leitgedanken basiert. Die Einbindung des Sicherheits- und Nachweiskonzepts in die anderen Arbeiten im Vorhaben VSG ist schematisch in Abb. 4.1 dargestellt.

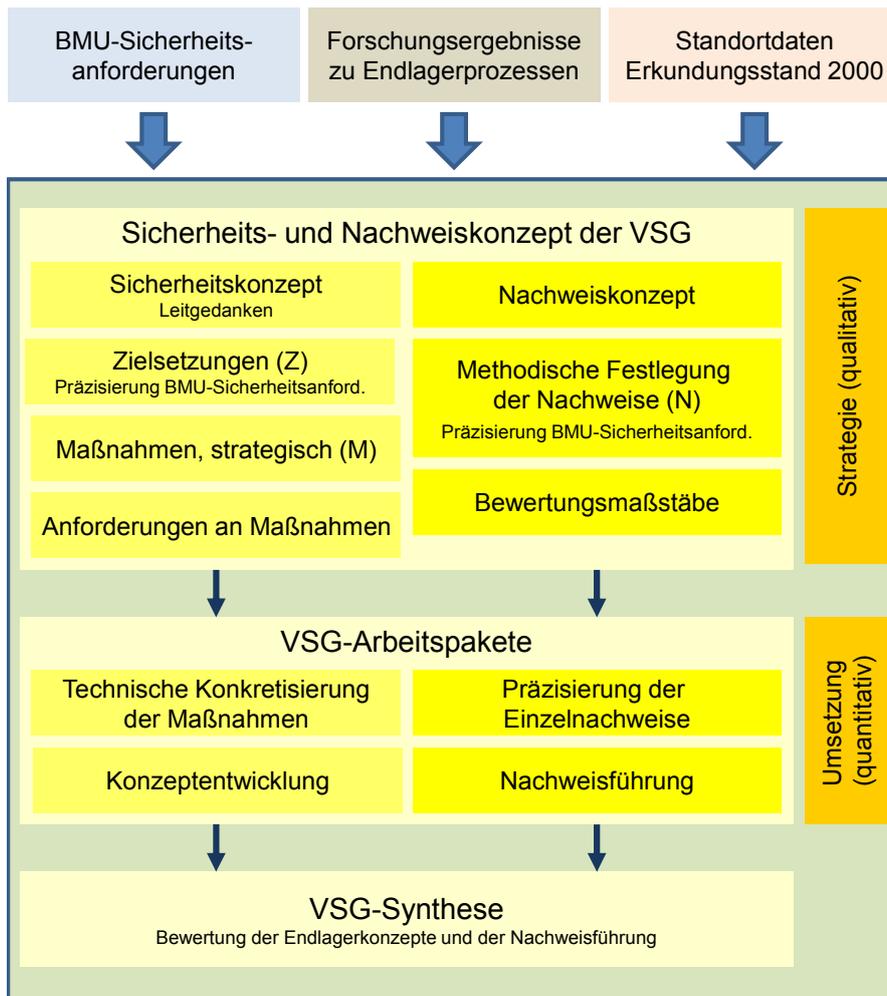


Abb. 4.1 Schematische Darstellung der Einbindung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes in die VSG-Arbeiten

4.1 Sicherheitskonzept

4.1.1 Leitgedanken

Wie bereits einleitend dargestellt, liegen einem Sicherheitskonzept Leitgedanken zugrunde, die in übergeordneter und sehr qualitativer Weise beschreiben, wie im konkreten Fall die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Im Vorhaben VSG sind dies die folgenden Leitgedanken:

- I. Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden. (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1 der BMU-Sicherheitsanforderungen).

- II. Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (→ Abschnitt 4.6 der BMU-Sicherheitsanforderungen).
- III. Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird.

In Übereinstimmung mit den entsprechenden Festlegungen in den Sicherheitsanforderungen des BMU (Abschnitt 8.7 in /BMU 10a/) beruht das Einschlussvermögen des Endlagersystems auf einem gestaffelten System von verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen, wobei die jeweiligen Wirkzeiträume der Barrieren innerhalb des Nachweiszeitraums berücksichtigt werden müssen. Die Sicherheitsfunktionen können dabei zwei übergeordneten Klassen zugeordnet werden: Zum einen tragen sie zum Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bei, zum anderen sorgen sie für den Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und den Erhalt seiner Eigenschaften.

Die sicherheitsrelevanten Komponenten des Endlagersystems sind

- A: die radioaktiven Abfälle inklusive ihrer Behälter,
- B: das Endlagerbergwerk mit seiner Auslegung,
- C: die geologische Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche⁶,
- D: die Verschlusskomponenten Schachtverschlussbauwerke, Streckenverschlüsse und Versatz sowie
- E: das weitere Wirtsgestein außerhalb der Komponente C und das Deckgebirge.

Diese Komponenten tragen mit ihren unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen in ihrer Gesamtheit zum Einschlussvermögen bei. Bei den Endlagersystemkomponenten C und D sind die Sicherheitsfunktionen unmittelbar auf den Einschluss der Radionuklide ausgerichtet, indem sie einen Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindern bzw.

⁶ In diesem Bereich wird in einem späteren Schritt der einschlusswirksame Gebirgsbereich abgeleitet. Da die im Vorhaben VSG erst auf der Basis der Ergebnisse der Integritätsanalysen und der radiologischen Konsequenzenanalyse geschah, erfolgt die Ausweisung von Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im vorliegenden Bericht erst nach der zusammenfassenden Würdigung der Ergebnisse dieser Analysen (vgl. Kap. 5.2.5). Aus diesem Grund wird hier noch „unspezifisch“ von der „geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche“ gesprochen.

begrenzen oder indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich verhindern bzw. behindern.

Bei den **radioaktiven Abfällen inklusive der Behälter** (Komponente A) müssen die Behälter und die Abfallmatrix direkt für einen Einschluss der Radionuklide sorgen. Außerdem müssen die radioaktiven Abfälle inklusive der Behälter so gearretet sein, dass es nicht zu einer Schädigung der geologischen Barriere in ihrer Umgebung, z. B. durch zu hohe Gasbildung oder durch zerfallsbedingte Wärmeleistung, kommen kann.

Das **Endlagerbergwerk** (Komponente B) umfasst den gesamten aufgefahrenen Hohlraum im Untergrund einschließlich der Tagesschächte und weist keine inhärenten Sicherheitsfunktionen auf. Allerdings bestimmen die Dimensionierung der Strecken und die generelle Auslegung, ob durch Prozesse im Endlagersystem die übergeordneten Sicherheitsfunktionen anderer Endlagersystemkomponenten beeinträchtigt werden können. Daraus leiten sich Anforderungen ab, die bei der Ableitung der Zielsetzungen und strategischen planerischen und technischen Maßnahmen für die Entwicklung der Endlagerkonzepte zu berücksichtigen sind.

Ein zentrales Element für den dauerhaften und nachsorgefreien Einschluss der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide im Salzgestein ist die **geologische Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche**. Nach dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG soll diese Barriere aus Steinsalz gebildet werden. Die Gründe für die Auswahl von Steinsalzpartien liegen in den generellen sicherheitsrelevanten Materialeigenschaften von Steinsalz, aus denen die nachfolgend aufgelisteten Erwartungen resultieren. Ob diese Eigenschaften tatsächlich vorliegen, ist standortspezifisch im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen zu überprüfen.

Praktische Dichtheit gegenüber Fluiden (Gase und Lösungen): Von Salzgesteinen kann im unverritzten (d. h. nicht bergbaulich beanspruchten) und tektonisch ungestörten Zustand aus folgenden Gründen erwartet werden, dass sie für Fluide praktisch impermeabel sind:

- Zum einen ist Steinsalz ein polykristallines Sedimentgestein, das aufgrund seiner visko-plastischen Eigenschaften auf langsam ablaufende Beanspruchungen mit Kriechverformungen reagiert, ohne dass wie in kristallinen Tiefengesteinen ein Kluftsystem angelegt wird. Dies bedeutet, dass im unverritzten Steinsalz bei Porositäten im Promillebereich praktisch kein advektiver Stofftransport möglich ist.

- Zum anderen hat Steinsalz im Zentralbereich von Salzstöcken einen geringen Wassergehalt, so dass für Schadstoffe nur eine Festkörperdiffusion entlang von Korngrenzen möglich ist, die um Größenordnungen langsamer abläuft als die Diffusion durch den flüssigkeitsgefüllten Porenraum eines Tonsteins /RÜB 08/.
- Unter den Bedingungen sehr geringer Verformungsraten, wie sie bei der Salzhalokinese vorliegen, sind die ablaufenden mikrostrukturellen Deformationsmechanismen von Bedeutung. Hierbei spielen nicht so sehr das Versetzungskriechen, welches im Kristallgitter des Steinsalzes stattfindet, die dominierende Rolle, sondern Verformungsmechanismen wie „pressure solution“ und dynamische Rekristallisation, die an Korngrenzen unter Anwesenheit geringer Mengen an Lösungen ablaufen /URA 07/. Unter diesen Bedingungen gewinnen auch oberflächenenergiegetriebene Korngrenz- und Rissheilungsprozesse an Bedeutung. Dies führt dazu, dass Fluide auf Korngrenzen oder in Poren eingeschlossen werden.
- Untersuchungen am Zechstein 2 (Steißfurt-Folge) kommen zu dem Ergebnis, dass Methan in Evaporiten der flachen Lagerung seit der Ablagerung und Diagenese der Formation weitgehend unverändert auf den Korngrenzen und den Einschlüssen gespeichert wurde /SIE 07/. Die während der Sedimentation oder Diagenese gebildeten Gase sind in dem Salzgestein der tektonisch vergleichsweise wenig beanspruchten Struktur seit etwa 250 Millionen Jahren fixiert worden. Auf den Korngrenzen von Salzgesteinproben aus Zielitz wurden vor allem Methan und Wasserstoff nachgewiesen. Die Untersuchungsergebnisse liefern ein natürliches Analogon dafür, dass Salzformationen im ungestörten Zustand eine gasdichte geologische Barriere darstellen, selbst für den migrationsfreudigen Wasserstoff.

Dauerhafter Erhalt der Dichtigkeit: Aufgrund der Tatsache, dass die einschlusswirksamen Eigenschaften seit vielen Millionen Jahren (z. B. wegen des o.g. Vorliegens von Gas- und intrasalinaren Lösungseinschlüssen) bestehen, kann auch eine Dauerhaftigkeit dieser Eigenschaften erwartet werden. Es muss jedoch nachgewiesen werden, dass keine Ereignisse oder Prozesse, deren Ursache außerhalb des Steinsalzes liegen, die einschlusswirksamen Eigenschaften beeinträchtigen.

Günstiges Verformungsverhalten und Selbstheilungsvermögen: Aufgrund seines viskoplastischen Verhaltens ist Steinsalz in der Lage, durch Kriechvorgänge temporär offene Hohlräume oder aufgelockerte Bereiche langfristig wieder zu verschließen (Konvergenz). Dabei werden in geschädigten Steinsalzbereichen, z. B. in der konturnahen Auflockerungszone, zusätzlich noch Feuchte-unterstützte Selbstheilungsmechanismen

wirksam, so dass auch diese Bereiche ihre ursprünglichen einschlusswirksamen Eigenschaften zurückgewinnen. Weiterhin besitzt Steinsalz die Fähigkeit, lokale geomechanische Beanspruchungen bruchlos durch duktile Deformation abzufangen.

Temperaturtoleranz: Steinsalz zeichnet sich durch eine hohe Temperaturverträglichkeit, verbunden mit einer guten Wärmeleitfähigkeit aus. Auch diese Eigenschaft ist im Fall der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle für die Dauerhaftigkeit der Einschlusseigenschaften wesentlich.

Im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG wurde festgelegt, dass die Einlagerungsbereiche im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt werden (vgl. Kap. 4.1.2), da aufgrund des derzeitigen Erkundungsstandes davon ausgegangen wird, dass diese Steinsalzpartien die oben genannten Eigenschaften erfüllen.

Bei der Bergwerksauffahrung ist die Durchörterung der geologischen Barriere unvermeidbar. Dadurch werden direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen geschaffen. Außerdem wird die geologische Barriere in konturnahen Bereichen aufgelockert und damit in ihrer Wirkung lokal geschwächt. Die Konvergenz der untertägigen Hohlräume läuft vergleichsweise langsam ab und kann im Übrigen vorübergehend zur Auflockerung konturnaher Bereiche infolge von Spannungsumlagerungen führen.

Aus diesem Grund setzt der in den Leitgedanken II und III geforderte sofortige Einschluss zu Beginn der Nachbetriebsphase eines Endlagers **Verschlusskomponenten** (Schachtverschlussbauwerke, Streckenverschlüsse und Versatz) voraus. Diese müssen gewährleisten, dass aufgrund der unvermeidlichen Auffahrung von Hohlräumen entstandene Perforationen der geologischen Barriere möglichst schnell, dauerhaft und nachsorgefrei verschlossen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen die für den Verschluss gewählten Materialien so beschaffen sein, dass

- Hohlraumverschluss und Verheilung von Auflockerungszonen beschleunigt werden (möglichst schnelles Erreichen eines dauerhaften Einschlusses gemäß Leitgedanken II und III),
- offene und daher potenziell lösungszugängliche Volumina im Endlagerbergwerk möglichst schnell verringert werden (Lösungszutrittsminimierung gemäß Leitgedanke III),

- möglichst schnell geringe Porositäts- und Permeabilitätswerte erreicht werden (möglichst weitgehender Einschluss, der schnell und dauerhaft erreicht werden soll gemäß Leitgedanken I bis III),
- langfristig und dauerhaft möglichst ähnliche hydraulische sowie thermo-mechanische Eigenschaften wie das unverritzte Steinsalz erreicht werden, da dadurch ein langfristig ähnliches geomechanisches Verhalten wie das des Steinsalzes unterstellt werden kann (Gebot der Dauerhaftigkeit und Nachsorgefreiheit des Einschlusses gemäß Leitgedanken II und III) und
- der freisetzbare Feuchtegehalt in Abfallnähe möglichst gering ist, um Korrosionsprozesse und eine damit verbundene Gasbildung in den Einlagerungsfeldern sowie Lösungszutritte zu den eingelagerten Abfällen zu minimieren (Lösungszutrittsminimierung gemäß Leitgedanke III).

Nach derzeitigem Stand von Wissenschaft und Technik gibt es kein Material, welches alle der oben genannten Anforderungen gleichermaßen und unmittelbar, d. h. sofort zu Beginn der Nachbetriebsphase, erfüllt. Um eine dauerhafte und langzeitstabile Hohlraumverfüllung sicherzustellen, soll nach dem Sicherheitskonzept als Versatzstoff der bei der Auffahrung anfallende Salzgrus, und damit dasselbe Salzgestein wie die umgebende geologische Barriere, verwendet werden. Da dieser allerdings erst mit Fortschreiten der Kompaktion infolge der Konvergenz des Gebirges Eigenschaften annimmt, die die oben genannten Anforderungen nach und nach erfüllen, sind zusätzlich geotechnische Verschlussbauwerke wie Schacht- und Streckenverschlüsse vorgesehen, die ihre Dichtwirkung sofort nach Verschluss des Endlagers entfalten und den Zutritt von Lösungen in die Einlagerungsbereiche, auch unter Berücksichtigung von möglichen Einwirkungen und Alterationsprozessen in der Nachverschlussphase, so lange verhindern sollen, bis die Eigenschaften des Salzgrusversatzes allen oben genannten Forderungen entsprechen.

Das **weitere Wirtsgestein⁷** und das **Deckgebirge** oberhalb der geologischen Barriere (Komponente E) bewirken dagegen primär den Schutz der geologischen Barriere unter Erhalt ihrer Eigenschaften vor Prozessen und Ereignissen, die an der Erdoberfläche oder oberflächennah ablaufen bzw. eintreten können. Beispiele für solche externen

⁷ Im Vorhaben VSG umfasste das Wirtsgestein alle den Salzstock aufbauenden Gesteine zwischen der Salzstockbasis und der Hutgesteinsbasis ohne die bergmännisch geschaffenen Hohlräume und deren Auflockerungszonen (s. Glossar in /MÖN 12/).

Einwirkungen sind Salzablaugungsvorgänge (Subrosion) oder die Bildung tiefer glazialer Rinnenstrukturen, die während der Überfahung des Standortes durch Inlandeisgletscher entstehen können. Damit die Endlagerkomponente E ihre Schutzfunktion ausüben kann, müssen die Einlagerungsbereiche ausreichend tief liegen. Insofern impliziert die Forderung nach Dauerhaftigkeit in den Leitgedanken II und III die Notwendigkeit der Existenz oberhalb der geologischen Barriere anschließender Bereiche der Salzstruktur (weiteres Wirtsgestein). Entsprechende Forderungen gelten für das oberhalb der Salzstruktur anschließende Deckgebirge, welches im Wesentlichen als zusätzlicher Erosionsschutz wirkt. Das Deckgebirge übernimmt somit sicherheitskonzeptionell die Rolle einer „verzehrbaren Opferschicht“. Von einer Reduktion von Radionuklid-Aktivitätskonzentrationen infolge von Verdünnungsprozessen in oberflächennahen Grundwasserleitern wurde dagegen im Vorhaben VSG keinerlei sicherheitskonzeptioneller Kredit genommen. Hintergrund ist, dass angesichts des langen Nachweiszeitraums eine belastbare Prognose der hydrogeologischen Situation im Deckgebirge (z. B. nach mehrmaliger Inlandeisüberfahung des Standortes) und damit eine Prognose der entsprechenden Sicherheitsfunktionen des Deckgebirges (Verdünnungspotenzial) nicht möglich ist.

In Abb. 4.2 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen Barrieren in der Nachverschlussphase zeitlich wirken und sich in ihrer Wirkung ergänzen. Der Zeitpunkt $t = 0$ entspricht dem Zeitpunkt, zu dem das Endlagerbergwerk verschlossen wird. Die Farbintensität spiegelt für die einzelnen Barrieren jeweils die Zu- bzw. Abnahme ihrer Barrierenwirkung wider. Die dargestellten Zeitmarken dienen dabei nur einer groben Orientierung und stellen keine Anforderungen oder Vorgaben dar.⁸

⁸ Allerdings ergeben sich für die Brennelement-Behälter quantitative Anforderungen aus Abschnitt 8.6 der BMU-Sicherheitsanforderungen.

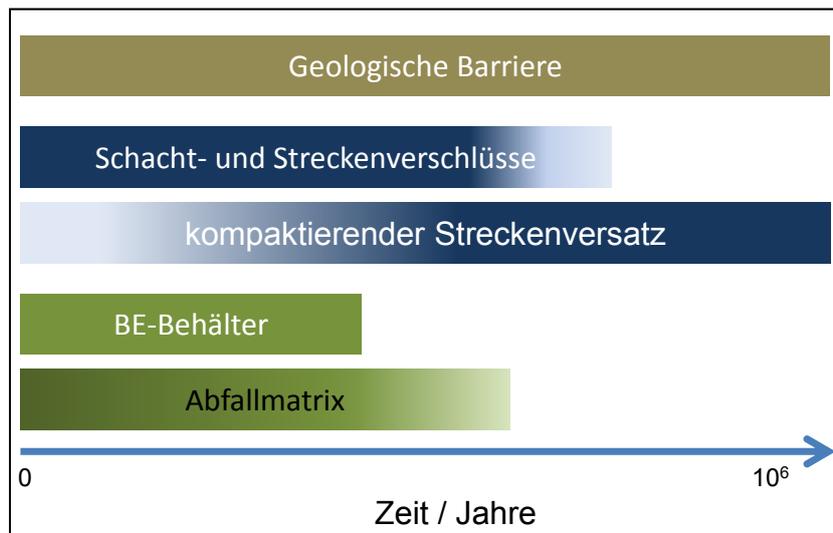


Abb. 4.2 Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase, aus /MÖN 12/

4.1.2 Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase

Für die Konkretisierung des Sicherheitskonzeptes im Vorhaben VSG wurden, ausgehend von den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ und den in Kapitel 4.1.1 genannten Leitgedanken, drei Grundanforderungen definiert, aus denen sich die konkreten Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- A) Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- B) Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierenfunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke/Wartungsfreiheit).
- C) Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden. (Kritikalitätsausschluss).

Aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ ergibt sich außerdem die Grundanforderung, dass die Abfallbehälter für alle wahrscheinlichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von

Aerosolen aus den Behälterinneren kommen darf. Abfallbehälter, für die derartige Nachweise bereits geführt worden sind, existieren jedoch zurzeit nicht. Es wird für das Vorhaben VSG davon ausgegangen, dass in der Zukunft die Abfallbehälter entsprechend ausgelegt werden können und ihre Handhabbarkeit für eine eventuelle Bergung nachgewiesen werden kann.

Weiterhin muss gewährleistet sein, dass in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte eine Rückholung der Abfallbehälter möglich ist. Als Rückholbarkeit wird gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ „*die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet*“. Dabei dürfen Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung getroffen werden, die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht beeinträchtigen. Da die im Rahmen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes des Vorhabens VSG aufgestellten Forderungen, die aus den oben angeführten Leitgedanken abgeleitet wurden, im Sinne der Aufgabenstellung des Vorhabens VSG auf die Langzeitsicherheit abzielen, die Forderung nach Rückholbarkeit jedoch zeitlich der Betriebsphase zuzuordnen ist, enthält das Sicherheits- und Nachweiskonzept keine expliziten Maßnahmen oder Nachweisforderungen zur Rückholbarkeit. Gleichwohl wird gefordert, dass im Rahmen des Vorhabens VSG der Aspekt der Rückholbarkeit im Rahmen der Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusskonzepte und der Betriebsführungsplanung berücksichtigt werden soll. Auf die im Vorhaben VSG entwickelte Rückholungskonzepte wird in Kapitel 5.1.2.2 eingegangen.

In den folgenden Unterkapiteln werden für die drei oben genannten Grundanforderungen die sich daraus ableitenden Zielsetzungen (Z), deren Zuordnung zu den entsprechenden Abschnitten aus /BMU 10a/ vermerkt ist, und entsprechende strategischen Maßnahmen (M) zusammenfassend aufgeführt.

4.1.2.1 Grundanforderung A – Einschlussgedanke

Aus der Grundanforderung, dass die eingelagerten Abfallgebinde schnell und möglichst dicht vom Salzgestein eingeschlossen werden sollen (Einschlussgedanke), lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

Z1: Bei den als wahrscheinlich eingestuften möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems wird angestrebt, dass keine Lösungen zu den Abfällen zu-

treten oder allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen erfolgt (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 in /BMU 10a/).

- Z2: Bei den als weniger wahrscheinlich eingestuften möglichen Entwicklungen des Endlagersystems soll es allenfalls zu einem Zutritt von geringen Lösungsmengen zu den Abfällen kommen (→ Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 in /BMU 10a/).
- Z3: Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, soll der Transport dieser Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert werden. Dies gilt sowohl für den Schadstofftransport in der Gasphase (Gaspfad) als auch in der flüssigen Phase (Lösungspfad, → Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.7 in /BMU 10a/).
- Z4: Die Eigenschaften des Salzgesteins und der technischen Komponenten, die den Einschluss der Radionuklide gewährleisten sollen, sollen gut charakterisierbar sein (→ Abschnitte 5.1 und 8.7 in /BMU 10a/).
- Z5: Das Endlager soll so ausgelegt werden, dass in der Nachverschlussphase keine korrigierenden Eingriffe notwendig sind (→ Abschnitte 4.6, 5.2 und 8.7 in /BMU 10a/).
- Z6: Die technischen Komponenten sollen robust ausgelegt werden, so dass ihre Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungszustände sowie Korrosions- bzw. Degradationsprozesse und möglicher Alterungsprozesse gewährleistet sind (→ Abschnitte 5.1 und 5.2 in /BMU 10a/).
- Z7: Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll durch ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und sich in ihrer zeitlichen Wirksamkeit ergänzen, gewährleistet werden (→ Abschnitte 5.2, 7.2.3 und 8.7 in /BMU 10a/).
- Z8: Im Sinne einer auch im Hinblick auf die Nachweisführung robusten Endlagerplanung, durch welche sichergestellt ist, dass die Anzahl gleichzeitig offener Ein-

lagerungsbereiche⁹ minimiert wird, sollen die Einlagerungsbereiche in einzelne Sektionen unterteilt werden, die möglichst schnell sequenziell beladen, verfüllt und gegen das Grubengebäude abgedichtet werden können. Die Separierung und Beladung der Einlagerungsfelder soll so erfolgen, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten durch physikalische und/oder chemische Prozesse, die das Einschlußvermögen des einschlußwirksamen Gebirgsbereichs negativ beeinflussen können, weitestgehend minimiert werden (→ Abschnitte 5.1 und 8.5 in /BMU 10a/).

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen umgesetzt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben):

- M1: Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks wird so klein wie möglich gehalten, und die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren (→ Z1, Z2, Z3).
- M2: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in einem gut charakterisierbaren Salzberg mit homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf ihre Einschlußseigenschaften, aufgefahren. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt (→ Z4).
- M3: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in Salzgesteinsbereichen angelegt, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevantem Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt (→ Z1, Z2).
- M4: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu den Tagesschächten und den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzsichten und damit zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen (z. B. Hauptanhydrit) sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen errichtet. Für die Arbeiten im Vorhaben VSG wurde als Planungsgrundlage für die Entwicklung der verschiedenen Endlagerkonzepte festgelegt,

⁹ Gemeint sind Einlagerungsfelder. Der Wortlaut entstammt den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/.

für die Auslegung der Grubenbaue einen Mindestabstand von 50 m anzusetzen, der an jeder Stelle des jeweils konzipierten Endlagerbergwerks zwischen Einlagerungsbereichen und der Begrenzung des Hauptsalzes einzuhalten ist (→ Z1, Z2).

M5: In den Tagesschächten und in den Zugangsstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereichen werden Verschlussbauwerke mit einem spezifizierten hydraulischen Widerstand qualitätsgesichert errichtet (→ Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7).

M6: Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche werden mit Salzgrus verfüllt. Die Hohlraumkonvergenz durch das Salzkriechen führt zu einer Kompaktion des Salzgruses und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7).

M7: In den Richtstrecken soll eine hinreichende Dichtwirkung des Versatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Daher wird der Salzgrus in den Richtstrecken, die zu den Einlagerungsbereichen gehören, geringfügig angefeuchtet, um dessen Widerstand gegen die Kompaktion herabzusetzen und somit eine schnellere Kompaktion zu erreichen (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7).

M8: Die in das Endlager abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im Endlager zu begrenzen (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7).

M9: Die Schachtverschlussbauwerke werden so ausgelegt, dass ihre Dichtwirkung auf mehreren Dichtelementen aus unterschiedlichen Materialien beruht, die aufgrund ihres jeweiligen Aufbaus teilweise diversitäre Funktionsweisen besitzen (→ Z6, Z7).

M10: Im Rahmen der Entwicklung und Auslegung von Endlagerkonzepten werden Einlagerungsstrategien entwickelt, die sicherstellen, dass maximal nur das aus betrieblicher Sicht zur Abfalleinlagerung gleichzeitig erforderliche Hohlraumvolumen aufgefahren wird.

M11: Das Einlagerungsregime wird so angelegt, dass Abfälle mit unterschiedlichen Eigenschaften voneinander getrennt werden. Dies betrifft insbesondere Abfälle

mit unterschiedlichen Gasbildungseigenschaften oder chemischen Eigenschaften, die sich auf das geochemische Milieu in Abfallnähe und damit auf die Radionuklidlöslichkeit auswirken können. Durch eine räumliche Trennung wird eine hinsichtlich des sicheren Einschlusses nachteilige Beeinflussung der wärmeentwickelnden Abfälle durch die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (z. B. infolge signifikanter Gasentwicklung) unterbunden (→ Z8).

4.1.2.2 Grundanforderung B – Integritätsgedanke/Wartungsfreiheit

Die Grundanforderung B betrifft die Dauerhaftigkeit eines dichten Einschlusses und zielt insbesondere darauf ab, dass die Sicherheitsfunktionen der einschlusswirksamen Barrieren über den gesamten Nachweiszeitraum weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt werden. Daraus lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

- Z9: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch oberflächennah ablaufende Prozesse beeinträchtigt werden (→ Abschnitte 5.1 und 8.3 in /BMU 10a/).
- Z10: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch thermisch induzierte Prozesse beeinträchtigt werden (→ Abschnitt 5.1 in /BMU 10a/).
- Z11: Kristallwasserhaltige Salzminerale, wie z. B. Carnallit, sollen durch die Temperaturerhöhung im Salzgestein infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle nicht zersetzt werden (→ Abschnitte 5.1 und 6.1 in /BMU 10a/).
- Z12: Gasentwicklung und Gasdruckaufbauraten in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks sollen so gering sein, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Frac entsteht, der die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verletzt (→ Abschnitte 5.1 und 6.1 in /BMU 10a/).
- Z13: Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie seine Eintrittswahrscheinlichkeit sollen durch entsprechende Auslegung des Endlagers sowie administrative Maßnahmen nach Möglichkeit reduziert werden, wenn die dafür zu treffenden Maßnah-

men keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben (→ Abschnitte 5.2 und 9.7 in /BMU 10a/)¹⁰.

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z9 bis Z13 beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen verfolgt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M12: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu Salzbereichen wie z. B. Carnallitit, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale enthalten, errichtet, um eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale unter den gegebenen Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und lokale Temperatur) auszuschließen (→ Z11).

M13: Die Grubenbaue des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungsbereiche werden in einer Teufenlage von mehr als 800 m und mit großer Mächtigkeit der hangenden Salzschieben sowie mit großen Abständen zu den Salzstockflanken errichtet. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass das Endlagerbergwerk in dem Salzstock eingebettet liegt und große Mächtigkeiten der Salzgesteinsbarriere zu den Seiten sowie nach oben zum Salzspiegel vorhanden sind. Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erschweren (→ Z9, Z13).

M14: Das Endlagerbergwerk wird in einem Salzstock errichtet, bei dem der natürliche Salzstockaufstieg praktisch abgeschlossen ist (→ Z9).

M15: Die Temperaturen im Hauptsalz z2HS, in dem die wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt. Die Festlegung dieser Temperaturgrenze dient der Auslegung des Endlagers (→ Z10, Z11).

¹⁰ Aus den in /MÖN 12/ genannten Gründen werden für das Sicherheitskonzept der VSG keine konkreten Maßnahmen zur Erreichung der Zielsetzung Z13 beschrieben. Im Vorhaben VSG wurden die Fragestellungen im Zusammenhang mit Gegenmaßnahmen zum menschlichen Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich jedoch erstmalig in Deutschland systematisch untersucht und bewertet /BEU 12a/. Im vorliegenden Bericht wird auf die Ergebnisse dieser Untersuchung in Kap.5.2.6 eingegangen.

M16: Durch entsprechende Auslegung des Nahbereiches der eingelagerten Abfälle, z. B. durch die Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes und ggf. durch die Verwendung entsprechender Behältermaterialien, werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Frac bis zu dessen Außenrand entsteht und somit zu einem Integritätsverlust der geologischen Barriere führt (→ Z12).

4.1.2.3 Grundanforderung C – Kritikalitätsausschluss

Z14: Eine Kritikalität muss durch entsprechende Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter und durch die Einlagerungsplanung in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (→ Abschnitt 7.2.4 in /BMU 10a/).

M17: Durch eine geeignete Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter, andere technische Maßnahmen, wie die Beigabe von Neutronenfängern, sowie die Einlagerungsplanung wird ausgeschlossen, dass sich spaltbares Material im Endlager in einer kritischen Anordnung ansammelt.

Zur Erreichung der Zielsetzung Z14 tragen indirekt auch die Maßnahmen M3 (Einlagerung in Salzbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit nennenswertem Volumen sind), M4 (Ausreichende Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten, zu Gesteinschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen) und M16 (Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes) bei.

In Kapitel 5.1 wird beschrieben, wie die Maßnahmen M1 bis M16 im Vorhaben VSG konkret umgesetzt wurden und überprüft ob die aus den Maßnahmen abgeleiteten Forderungen hierdurch erfüllt wurden. Die mit der Maßnahme M17 verbundenen Analysen sind im Vorfeld des Vorhabens VSG für verschiedene Endlagerbehälter bereits durchgeführt worden, so dass im Rahmen des Vorhabens VSG nur die zugehörigen Nachweise für den Kritikalitätsausschluss durchgeführt wurden (vgl. Kap. 4.2.3 bzw. 5.2.4).

4.2 Nachweiskonzept

Das Nachweiskonzept beschreibt detailliert die Vorgehensweise, wie im Rahmen des Vorhabens VSG die Sicherheit des Endlagersystems bewertet wird. Im Nachweiskonzept werden auf Basis des Sicherheitskonzeptes die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 10a/ erfüllt werden.

Im Nachweiskonzept werden die zur Durchführung des Vorhabens VSG relevanten nachweisbezogenen Aspekte der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ konkretisiert. Dies betrifft vor allem bestimmte Aspekte zur Optimierung, zum Nachweis des Schutzes vor Schäden durch ionisierende Strahlung und zu Inhalt und Umfang des Sicherheitsnachweises.

Wie beim Sicherheitskonzept ist die Motivation für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes der sichere Einschluss der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Als sicherer Einschluss wird der Zustand des Endlagersystems bezeichnet, bei dem es im Nachweiszeitraum allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt. Dieser Ansatz basiert auf der Anforderung gemäß Abschnitt 4.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, wonach die Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen dürfen. Gleichzeitig muss für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gemäß Abschnitt 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen gezeigt werden, dass dessen Integrität für alle wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten nachgewiesen werden kann.

Aus dem Nachweiskonzept leiten sich alle Arbeiten im Rahmen der Systemanalyse im Vorhaben VSG ab, deren Ergebnisse im vorliegenden Synthesebericht in ihrer Gesamtheit gewürdigt werden. Das Nachweiskonzept umfasst die folgenden Aspekte:

1. Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (→ Abschnitte 5.1, 7.2.1 und 8.3 in /BMU 10a/)
2. Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum
 - Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
 - Integrität der geologischen Barriere (→ Abschnitte 7.2.1 und 7.3 in /BMU 10a/)

- Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke (→ Abschnitte 6.4, 7.2.3 und 7.3 in /BMU 10a/)
3. Kritikalitätsausschluss (→ Abschnitt 7.2.4 in /BMU 10a/)
 4. Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (→ Abschnitte 6.1, 6.2, 6.3, 7.2.2, 7.2.3 und 7.3 in /BMU 10a/)
 5. Radiologische Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (→ Abschnitte 6.2, 6.3, 7.2.2 , 7.2.3 und 7.3 in /BMU 10a/)

Im Folgenden wird auf jeden dieser Aspekte eingegangen. Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ sind diese Aspekte für sämtliche Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems zu bewerten, deren Eintreten als wahrscheinlich oder wenig wahrscheinlich eingestuft wird. Bei Entwicklungsmöglichkeiten, bei denen es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen kann, sind dabei sowohl der Lösungspfad als auch der Gaspfad zu berücksichtigen.

Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ (Abschnitte 5.2, 6.5 und 9.7) sind auch Szenarien mit zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen (Human-Intrusion-Szenarien) zu analysieren, um mögliche Ansatzpunkte für eine Optimierung der Endlagerkonzepte festzustellen. Zur Bewertung der zukünftigen menschlichen Eingriffe werden stilisierte Szenarien eingesetzt (Kap. 5.2.6).

4.2.1 Konzept zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Zu Beginn des Vorhabens VSG lagen keine Erkenntnisse vor, für welche Salzstockbereiche die Integrität nachgewiesen werden muss. Aus diesem Grund wurde der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht vorab, d. h. nicht vor Durchführung der numerischen Analysen zur Integrität der geologischen Barriere und zum Radionuklidtransport, festgelegt sondern anhand der Ergebnisse der numerischen Analysen. Da der Nachweis des sicheren Einschlusses untrennbar mit der Ausweisung von Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches verbunden ist, ist davon auszugehen, dass auch in zukünftigen Sicherheitsanalysen in ähnlicher Weise bei der Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorgegangen wird. Bei entsprechend positiven Ergebnissen der numerischen Analysen zur Integrität der geologi-

schen Barriere und zum Radionuklideinschluss können Lage und Abmessung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgewiesen werden. Die Kriterien zur Abwägung umfassen folgende Aspekte:

- Die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der betreffenden Gebirgsbereiche sowie der geotechnischen Barrieren. Auf diese Aspekte wird zusammenfassend in den Kapiteln 5.1.3 (geologische Barriere) sowie 5.1.4 und 5.2.2 (geotechnische Verschlussbauwerke) eingegangen. Die Grundlage hierfür bilden die Berichte /BOR 08b/ und /BRÄ 11/ (geologische Barriere) sowie die VSG-Berichte /MÜL 12a/ und MÜL 12b/ (geotechnische Verschlussbauwerke).
- Die Qualität des Einschlusses (mittels RGI; Kap. 4.2.4.1) unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Freisetzungsrechnungen einschließlich der ihnen zugrunde liegenden Annahmen bzgl. der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems. Auf diesen Aspekt wird zusammenfassend in Kapitel 5.2.3 eingegangen. Die Grundlage hierfür bildet der VSG-Bericht /LAR 13/.
- Das Ergebnis der Integritätsanalysen für die geologische Barriere. Für die wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten muss gemäß /BMU 10a/ die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum nachgewiesen werden. Auf diesen Aspekt wird zusammenfassend in Kapitel 5.2.2.1 eingegangen. Die Grundlage hierfür bildet der VSG-Bericht /KOC 12/.

In Kapitel 5.2.5 wird durch eine Synthese der zu den Aspekten 1. bis 3. im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse der einschlusswirksamen Gebirgsbereich begründet ausgewiesen.

4.2.2 Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum

Eine zentrale Forderung im Sicherheitskonzept ist, dass der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt und seine gemäß /BMU 10a/ geforderte Barrierenfunktion weder durch interne noch durch externe Prozesse beeinträchtigt wird.

Die Ergebnisse der Analysen im Vorhaben VSG zum Nachweis des Erhalts des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs während des Nachweiszeitraums sind in Kapitel 5.2.2 dargestellt. Dabei wird auf die folgenden Aspekte eingegangen:

- Erhalt der Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
- Erhalt der Integrität der geologischen Barriere,
- Erhalt der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke über den geforderten Wirkzeitraum.

Das unverritzte Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2HS) im einschlusswirksamen Gebirgsbereich stellt den über den gesamten Nachweiszeitraum primär relevanten Teil der geologischen Barriere dar, der den Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sicherstellen muss. Wichtige Voraussetzung dafür ist, dass diese Salzbereiche keine Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen bzw. für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und wasserführenden Schichten außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Biosphäre aufweisen.

Die Integrität der geologischen Barriere wird mit den folgenden Kriterien überprüft:

- **Dilatanzkriterium:** Der Spannungszustand muss unterhalb der Dilatanzgrenze des Gesteins bleiben.
- **Minimalspannungs- bzw. Laugendruckkriterium:** Die minimale Hauptspannung muss größer sein als der rechnerische hydrostatische Druck in der entsprechenden Teufe.

Die Nachweisführung erfolgte im Vorhaben VSG durch geomechanische Modellrechnungen, die entsprechenden Ergebnisse sind zusammenfassend in Kapitel 5.2.2.1 dargestellt.

Das im Vorhaben VSG entwickelte Verschlusskonzept sieht geotechnische Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse als Verschlussbauwerke vor. Sie gewährleisten als schnell wirksame Barrieren im Verbund mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich den Einschluss der Abfälle in dem Zeitraum, in dem der Salzgrusversatz seine Dichtwirkung noch nicht entfaltet. Die Integrität der Verschlussbauwerke muss deshalb mindestens über den Zeitraum gegeben sein, in dem der Salzgrusversatz in den Einlagerungsbereichen noch keine ausreichende Dichtfunktion übernimmt. Der entsprechende Integritätsnachweis für diese Verschlussbauwerke ist mindestens für alle zu betrachtenden Lastfälle, die sich aus den wahrscheinlichen Entwicklungen ableiten, zu

erbringen. Auf die Ergebnisse der entsprechenden Nachweisführung wird in Kapitel 5.2.2.2 eingegangen.

4.2.3 Kritikalitätsausschluss

In einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle muss ausgeschlossen werden, dass sich das eingelagerte spaltbare Material in einer kritischen Anordnung sammelt. Diese Kritikalität kann nur auftreten, wenn eine genügend große Menge an spaltbarem Material in Gegenwart einer ausreichenden Menge Wasser (oder einem anderen Neutronen-Moderator) vorhanden ist. Kritische Anordnungen müssen für alle als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuften Szenarien ausgeschlossen werden /BMU 10a/. Als Indikator für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird der Multiplikationsfaktor k_{eff} verwendet, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltprozess entstehen.

Eine Kritikalität kann bei einem Wert

$$k_{eff} < 0,95$$

ausgeschlossen werden /MÖN 12/. Auf die Ergebnisse der diesbezüglichen Analysen wird in Kapitel 5.2.4 zusammenfassend eingegangen.

4.2.4 Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Der sichere Einschluss der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist ein Leitgedanke des Sicherheitskonzeptes (Kapitel 4.1). Der sichere Einschluss ist dann gegeben, wenn es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt, die im Hinblick auf ihre radiologischen Auswirkungen als geringfügig einzustufen sind. Ein noch besseres Einschlussvermögen ist beim vollständigen Einschluss der Radionuklide gegeben, bei dem keinerlei Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden.

Die Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Radionuklide und sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Ab-

fälle ist daher eines der zentralen Elemente des Nachweiskonzeptes im Vorhaben VSG. Diese Bewertung erfolgt anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Auf diese Weise stellen für die Nachverschlussphase berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Strahlenexpositionen stellen keine Prognose einer tatsächlichen radiologischen Belastung von in der Zukunft lebenden Personen dar, sondern sind gemäß /BMU 10a/ nur als Indikatoren für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau zu interpretieren.

Zur Bewertung des Einschlussvermögens in einem bestimmten Gebirgsbereich werden verschiedene Aufpunkte entlang der Transportwege der Radionuklide festgelegt. Hierbei sind alle Wegsamkeiten, die zu einem Transport von Radionukliden aus dem Gebirgsbereich beitragen können, zu berücksichtigen. Zur Bewertung des Einschlussvermögens werden an den Aufpunkten die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden analysiert und getrennt für den Lösungspfad und den Gaspfad jeweils ein radiologischer Indikator errechnet.

4.2.4.1 Bewertung der Langzeitsicherheit anhand der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage für in Lösung befindliche Radionuklide

Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage für in Lösung befindliche Radionuklide ist gemäß /BMU 10a/ zulässig, wenn rechnerisch gezeigt werden kann, dass die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe bei einer Referenzgruppe von 10 Personen der Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen. Das Berechnungsverfahren für die Analyse nach dem vereinfachten Verfahren ist in /MÖN 12/ beschrieben. Auf die Ergebnisse der Analysen und deren Bewertung wird in Kapitel 5.2.3 eingegangen.

Für die Bewertung der Ergebnisse wird der Indikator RGI¹¹ verwendet, der aus den jährlichen Radionuklidströmen S_i [Bq/a] über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. bei Undurchlässigkeit der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, berechnet wird. Dieser Radionuk-

¹¹ RGI: Radiologischer Geringfügigkeits-Indikator

lidstrom wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge [m^3/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt.

Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i [$\text{Sv/a} / \text{Bq/m}^3$] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift

$$RGI = \frac{10 \cdot \frac{\sum S_i \cdot DKF_i}{W}}{K_{RGI}}$$

Bei einem Wert für den $RGI \leq 1$ ist die Freisetzung geringfügig.

Die Berechnung des RGI-Wertes wird im Rahmen des Vorhabens VSG wie folgt konkretisiert:

- Die Wassermenge, in der die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5000 m^3 pro Jahr für ein Kollektiv von 10 Erwachsenen. Die Wassermenge W pro Person beträgt damit 500 m^3 pro Jahr.
- Die nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i werden gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ ermittelt, siehe Kapitel 4.2.4.3.
- Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für wahrscheinliche Szenarien $0,1$ Personen-Millisievert pro Jahr, für weniger wahrscheinliche Szenarien 1 Personen-Millisievert pro Jahr.

4.2.4.2 Bewertung der Langzeitsicherheit anhand der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage für gasförmig freigesetzte Radionuklide

In den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ wird die vereinfachte radiologische Langzeitaussage nur für in der wässrigen Phase gelöste Radionuklide definiert. Dieses Verfahren ist zur Bewertung der Langzeitsicherheit auf Radionuklide anwendbar, die auf dem Lösungspfad freigesetzt werden oder die gasförmig aus den Abfällen freigesetzt und entlang ihres Transportweges innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in der Porenfeuchte gelöst werden.

Nichtlösliche gasförmige Radionuklide verbleiben in der Gasphase und werden, soweit sie nicht durch Sorptions- und andere Rückhalteprozesse zurückgehalten werden, mit dem Gasstrom transportiert und können mit diesem gegebenenfalls den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen. In /BMU 10a/ finden sich keine Hinweise zu einer vereinfachten radiologischen Langzeitaussage für Radionuklide, die in der Gasphase den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen.

Im Vorhaben VSG wird auch für diese Fälle ein zu den gelösten Radionukliden analoges Verfahren zur Bewertung des Einschlusses im einschlusswirksamen Gebirgsbereich verwendet. Für diese Radionuklide wird, wie im Fall der löslichen Radionuklide, ein Indikator RGI aus dem jährlichen Radionuklidstrom über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs berechnet. Dabei wird, in Anlehnung an /BMU 10a/, ein anerkanntes generisches Expositionsmodell für gasförmige Radionuklide verwendet, welches im Abschlussbericht zur radiologischen Konsequenzenanalyse in /LAR 13/ beschrieben wird.

4.2.4.3 Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden in vier Stufen bewertet, siehe Abb. 4.1, wobei auch die Art des Radionuklidtransports (advektiv oder diffusiv) in die Bewertung einfließt. In den ersten drei, in der Abbildung grün dargestellten Stufen wird der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich nachgewiesen. Bei Nichteinhaltung der Schutzziele – Stufe 4 – wird das Endlagersystem in der der Bewertung zugrundeliegenden Form als ungeeignet bewertet. In diesem Fall kann ggf. durch eine geänderte Auslegung des Endlagerbergwerks sowie durch weitere bzw. andere technische Maßnahmen der sichere Einschluss erreicht bzw. durch den Abbau von Konservativitäten in der Nachweisführung der Nachweis des sicheren Einschlusses geführt werden. Dazu wären neue Sicherheitsanalysen durchzuführen. Erst wenn die Optimierungspotenziale des Endlagersystems ausgeschöpft sind und trotzdem der Nachweis des langzeitsicheren Einschlusses nicht erfolgreich geführt werden kann, kann an dem Standort kein sicheres Endlager errichtet werden. Die Bewertung erfolgt sowohl für eine Freisetzung von Radionukliden über den Lösungspfad als auch über den Gaspfad.

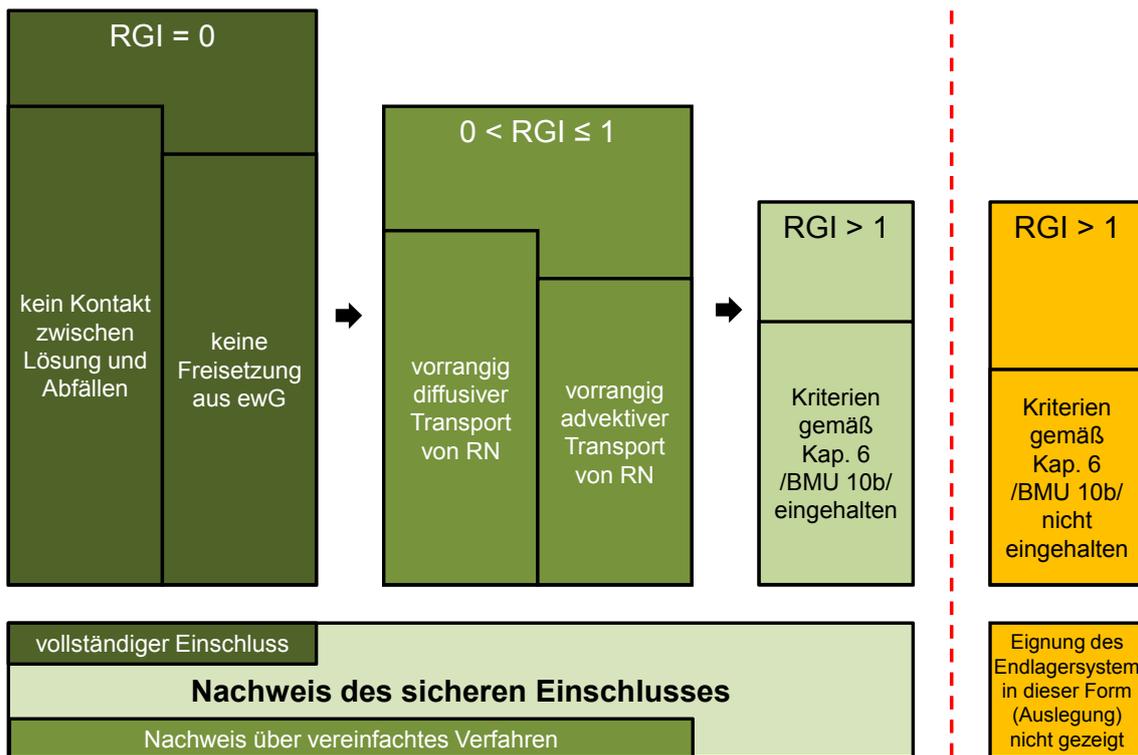


Abb. 4.1 Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage

Bezüglich weiterer Ausführungen und Erläuterungen zum gestuften Bewertungsverfahren wird auf /MÖN 12/ verwiesen.

4.2.5 Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ fordern, Szenarien mit zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen zu identifizieren, um festzustellen, ob und wenn ja welche auslegungstechnischen Optimierungsmaßnahmen möglich sind. Mögliche Ansatzpunkte für die Optimierung sind gemäß /BMU 10a/ die Senkung der Eintrittswahrscheinlichkeit des menschlichen Eindringens oder die Verringerung der radiologischen Auswirkungen, wobei der Maßstab dafür die radiologischen Konsequenzen für die allgemeine Bevölkerung und nicht für die direkt eingreifenden Personen ist. Im Rahmen der Optimierung des Endlagerkonzepts ist der Aspekt Human Intrusion jedoch nachrangig unter Beachtung der Ausgewogenheit der im Abschnitt 5.1 von /BMU 10a/ genannten Optimierungsziele zu berücksichtigen.

In Kapitel 5.2.6 wird darauf eingegangen, welche Ergebnisse im Vorhaben VSG in Bezug auf Human Intrusion erzielt und wie die Ergebnisse zur Optimierung der Endlagerkonzepte verwendet wurden.

4.3 Umgang mit Ungewissheiten

Die allgemeine, international anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten¹² lässt sich in den folgenden Schritten zusammenfassen (VIG 07/):

1. Identifizieren
2. Beurteilen und Quantifizieren
3. Reduzieren und Vermeiden

Diese Vorgehensweise ist dabei als iterativer Prozess zu verstehen, der bei jeder neuen Fassung eines Sicherheitsnachweises (i. S. eines Safety Case) wiederholt werden muss. In einem frühen Stadium wird vor allem das Ziel verfolgt, die Erkundung des Standortes sowie die Auslegung des Endlagers zu steuern. In dieser Phase bestehen vielfältige Möglichkeiten, erkannte Ungewissheiten zu reduzieren und zum Teil sogar zu eliminieren, wobei unter Umständen auch neue Ungewissheiten auftreten können. Letztlich werden aber niemals alle Ungewissheiten zu reduzieren oder gänzlich vermeidbar sein. Die nicht zu vermeidenden Ungewissheiten müssen benannt und ihre Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage bewertet werden. Der Umgang mit Ungewissheiten erstreckt sich sowohl auf das Sicherheitskonzept als auch auf das Nachweiskonzept.

In einer Sicherheitsanalyse müssen die inhärenten Ungewissheiten im Hinblick auf die vorliegenden Standortdaten, die modellhafte Vorstellung des Endlagersystems, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems, aber auch bezüglich der Beschreibung einzelner Prozesse und des Zusammenwirkens von Prozessen identifiziert und ihre Auswirkungen auf die Aussagen zur Sicherheit des Endlagersystems über den Nachweiszeitraum bewertet werden. Die Ungewissheiten werden in der Regel in Szenariengewissheiten (Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems), Daten- und Parameterungewissheiten und Modellungewissheiten eingeteilt.

¹² Auf den Begriff „Unsicherheit“, der teilweise synonym mit dem Begriff „Ungewissheit“ verwendet wird, wird hier verzichtet, da er mit der Unsicherheit im Sinne einer möglichen Gefährdung verwechselt werden kann.

In Kapitel 5.3 wird ausführlich darauf eingegangen, wie mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG verfahren wurde.

5 Umsetzung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Vorhaben VSG

In den folgenden Kapiteln wird dargestellt, wie das Sicherheits- und Nachweiskonzept im Vorhaben VSG konkret umgesetzt wurde:

- In Kapitel 5.1 wird dargelegt, wie die aus den Leitgedanken und Zielsetzungen abgeleiteten Maßnahmen des **Sicherheitskonzeptes** umgesetzt wurden und ob hierdurch die Ziele des Sicherheitskonzeptes erfüllt werden.
- In Kapitel 5.2 werden die im Vorhaben VSG gemäß dem **Nachweiskonzept** geführten Einzelnachweise dargelegt, die Ergebnisse vorgestellt und anhand der Bewertungsmaßstäbe bewertet.
- Die den Nachweisen zugrunde liegenden **Ungewissheiten** werden in Kapitel 5.3 ausgeführt und ihr Einfluss auf die Analyseergebnisse wird bewertet.

5.1 Umsetzung des Sicherheitskonzeptes

In diesem Kapitel wird dargestellt, in welcher Weise die Forderungen des Sicherheitskonzeptes zum Erreichen eines dauerhaft sicheren Einschlusses der Radionuklide im Vorhaben VSG umgesetzt wurden und überprüft, ob dies umfassend und vollständig geschehen ist. Die Bewertung orientiert sich an den sicherheitsrelevanten Komponenten der konzipierten Endlagersysteme, die in Kapitel 4.1.1 vorgestellt wurden. Dazu werden die im Vorhaben VSG erzielten wesentlichen Ergebnisse zu den sicherheitsrelevanten Komponenten zusammengefasst und überprüft, in welcher Weise das Sicherheitskonzept umgesetzt wurde. Insbesondere wird dabei auf die Umsetzung der in Kapitel 4.1.2 dargestellten sicherheitskonzeptionellen Maßnahmen eingegangen.

Wie in Kapitel 4.1.1 dargestellt, beruht das Einschlussvermögen des Endlagersystems auf einem gestaffelten System von verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen, wobei die verschiedenen Komponenten des Endlagersystems in unterschiedlicher Weise zum Einschluss der Radionuklide beitragen. Konsequenterweise beziehen sich auch die im Sicherheitskonzept abgeleiteten planerischen und technischen Maßnahmen auf diese Endlagersystemkomponenten, wobei eine Maßnahme auch auf mehrere Komponenten abzielen kann. Die entsprechende Zuordnung ist, getrennt nach den in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Grundanforderungen (Ein-

schlussgedanke, Integritätsgedanke und Kritikalitätsausschluss) in der Tab. 5.1 dargestellt.

Tab. 5.1 Zuordnung der im Sicherheitskonzept geforderten Maßnahmen (M) zu den Endlagersystemkomponenten

Nr.	Maßnahme	Systemkomponente				
		A: Abfälle	B: Endlagerbergwerke	C: Geologische Barriere	D: Verschlusskomponenten	E: Weiteres Wirtsgestein und Deckgebirge
Aus der Grundanforderung A (Einschlussgedanke) abgeleitete Maßnahmen zu den Endlagersystemkomponenten						
M1	Minimierung des aufzufahrenden Hohlraumvolumens des Endlagerbergwerks, Einsatz gebirgsschonender Verfahren.		X			
M2	Gute Charakterisierbarkeit und Homogenität der Salzbereiche in der Umgebung der Einlagerungsbereiche			X		
M3	Günstige Kriecheigenschaften, Abwesenheit sicherheitsrelevanter Lösungseinschlüsse			X		
M4	Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten und den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzschieben		X			
M5	Anforderungen an Schacht- und Streckenverschlüsse				X	
M6	Hohlraumverfüllung mit Salzgrus				X	
M7	Anfeuchtung des Salzgrusversatzes in den Richtstrecken				X	
M8	Minimierung der mit den Abfällen oder abfallnah eingebrachten Feuchtigkeit	X			X	
M9	Materialdiversität der Schachtverschlussbauwerke				X	

Tab. 5.1 (Fortsetzung) Zuordnung der im Sicherheitskonzept geforderten Maßnahmen (M) zu den Endlagersystemkomponenten

Nr.	Maßnahme	Systemkomponente				
		A: Abfälle	B: Endlagerbergwerke	C: Geologische Barriere	D: Verschlusskomponenten	E: Weiteres Wirtsgestein und Deckgebirge
M10	Minimierung gleichzeitig aufgefahrener Hohlraumvolumina		X			
M11	Räumliche Trennung von Abfällen mit unterschiedlichen Eigenschaften		X			
Aus der Grundanforderung B (Integritätsgedanke) abgeleitete Maßnahmen zu den Endlagersystemkomponenten						
M12	Sicherheitsabstände zu Salzbereichen mit nennenswertem Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale		X Weitgehend identisch mit M4			
M13	Ausreichende Teufenlage der Einlagerungssohle			X Schutz vor exogenen Lastfällen		X Schutz vor exogenen Lastfällen
M14	Weitgehender Abschluss der Halokinese			X		X
M15	Begrenzung der Temperaturentwicklung im Hauptsalz	X (Implizite Forderung: ausreichende Zwischenlagerungsdauer)	x			

Tab. 5.1 (Fortsetzung) Zuordnung der im Sicherheitskonzept geforderten Maßnahmen (M) zu den Endlagersystemkomponenten

Nr.	Maßnahme	Systemkomponente				
		A: Abfälle	B: Endlagerbergwerke	C: Geologische Barriere	D: Verschlusskomponenten	E: Weiteres Wirtsgestein und Deckgebirge
M16	Minimierung der Gasentwicklung im Endlagerbergwerk	X (Implizite Forderung an das Behältermaterial und Minimierung des Restfeuchtegehaltes der Abfälle)			X (Feuchtigkeit Salzgrusversatz)	
Aus der Grundanforderung C (Kritikalitätsausschluss) abgeleitete Maßnahmen zu den Endlagersystemkomponenten						
M17	Kritikalitätsausschluss	X ¹³	X ¹			

¹³ Die mit der Maßnahme M17 verbundenen Analysen sind im Vorfeld des Vorhabens VSG für verschiedene Endlagerbehälter bereits durchgeführt worden, so dass im Rahmen des Vorhabens VSG nur die zugehörigen Nachweise für den Kritikalitätsausschluss durchgeführt wurden. Diese werden im Rahmen der Umsetzung des Nachweiskonzeptes in Kap. 5.2.4 behandelt.

Im Nachfolgenden werden zu jeder der oben angeführten Komponenten die wichtigsten im Vorhaben VSG erarbeiteten Ergebnisse dargestellt und bewertet, ob diese im Sinne der Zielerreichung der VSG vollständig und mit ausreichendem Tiefgang vorliegen. In einem zweiten Schritt wird aufgezeigt, wie die im Sicherheitskonzept (Kap. 4.1) geforderten strategischen Maßnahmen konkret umgesetzt wurden und bewertet, ob dies den Ansprüchen des Sicherheits- und Nachweiskonzepts genügt.

5.1.1 Radioaktive Abfälle

5.1.1.1 Mengengerüste und radiologische Charakterisierung

Im Nachfolgenden wird zunächst ein kurzer Überblick zu den innerhalb des Vorhabens VSG ermittelten Abfallmengengerüsten und der stofflichen und radiologischen Charakteristika der verschiedenen Abfallarten gegeben. Bei der Bestimmung der Abfallmengen wurde als regulatorische Randbedingung der Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergie /ATG 11/, zugrunde gelegt. Bezüglich weitergehender Informationen sei auf den Bericht /PEI 11b/¹⁴ verwiesen.

Im Vorhaben VSG wurden folgende Abfallströme betrachtet:

- Bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren (direkte Endlagerung)
- Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung im Ausland sowie aus der Wiederaufarbeitungsanlage in Karlsruhe.
- Bestrahlte Brennelemente aus Prototyp- und Forschungsreaktoren
- Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Bestrahlte Brennelemente:

Im Vorhaben VSG wurde prognostiziert, dass bis zum Ende der Laufzeit der Kernkraftwerke im Jahr 2022 insgesamt ca. 34.630 Brennelemente, dies entspricht ca. 10.450 t_{SM} (Tonnen Schwermetall) anfallen werden, die direkt endgelagert werden müssen. Die Brennelemente werden entsprechend ihrem Alter zum Beginn der Be-

¹⁴ Mengengerüste gemäß Ausstiegsbeschluss

triebsphase des Endlagers in Altersklassen eingeteilt, um die unterschiedlichen Zwischenlagerzeiten ausreichend zu berücksichtigen. Entsprechend ihrem Einsatz in den Leistungsreaktortypen DWR, SWR und WWER bzw. der Brennelementtypen UO_2 sowie MOX aus der Wiederaufarbeitung teilen sich die bestrahlten Brennelemente wie folgt auf (Tab. 5.2):

Tab. 5.2 Anzahl der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente /PEI 11b/

Anlage	Brennelementtyp	
	UO_2	MOX
SWR	14.350	1.250
DWR	12.450	1.530
WWER	5.050	-

Aufgrund der regulativen Vorgaben zum Ausstieg aus der Kernenergienutzung gemäß /ATG 11/ und eines guten Kenntnisstandes zu den Abbränden in den verschiedenen deutschen Leistungsreaktortypen war es möglich, die zu berücksichtigenden Anzahlen an bestrahlten Brennelementen mit einer für die Endlagerplanung im Vorhaben VSG ausreichenden Sicherheit zu prognostizieren. Der Einfluss von Ungewissheiten, die sich aus der Frage ergeben, ob in Zukunft höhere Abbrände erzielt werden könnten, wird für die im Vorhaben VSG erzielten sicherheitsanalytischen Ergebnisse als nicht ausschlaggebend angesehen, unter anderem deshalb, da dies zu einer Verringerung der zur Endlagerung anstehenden Brennelementanzahl und des entsprechenden Aktivitätsinventars führen würde.

Für die radiologische Charakterisierung wurden für jeden Brennelementtyp Modellbrennelemente definiert, denen hinsichtlich der Anreicherung, ihrer Zusammensetzung und des Abbrands im Reaktor Eigenschaften zugewiesen wurden, die für die Analysen im Vorhaben VSG als ausreichend angesehen wurden. Dabei wurden Abbrände und Anreicherungsgrade aus der Gegenwart und jüngeren Vergangenheit jeweils für alle direkt endzulagernden Brennelemente unterstellt. Für diese Modellbrennelemente wurden Abbrandrechnungen für den Brennstoff sowie Aktivierungsrechnungen für die Hüllrohre und das Strukturmaterial durchgeführt. Ergebnis dieser Modellrechnungen war eine stoffliche und insbesondere radiologische Beschreibung der jeweiligen Modellbrennelemente einschließlich ihrer Wärmeleistung.

Diese homogenisierende Beschreibung der Brennelemente im Hinblick auf ihre individuelle Abbrandhistorie und der hieraus resultierenden stofflichen Zusammensetzung in Form von Modellbrennelementen /PEI 11b/ wird als zielführend angesehen. Eine explizite Bestimmung bzw. Prognose der spezifischen Eigenschaften jedes einzelnen Brennelementes unter Berücksichtigung von Schwankungen der Uran-Anreicherung oder produktionsbedingten Verunreinigungen, der Fahrweise des Reaktors, wie des Abbrandgrades oder der Positionen des Brennelements im Reaktorkern wird angesichts der großen Anzahl von über 30.000 Brennelementen als faktisch unmöglich angesehen und ist überdies für die Belange einer ersten vorläufigen Sicherheitsanalyse unerheblich.

Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung:

Bei den im Vorhaben VSG berücksichtigten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente handelt es sich um:

- Kokillen mit verglasten hochradioaktiven Spaltproduktlösungen und Feedklärschlämmen (CSD-V),
- Kokillen mit verglasten Deko- und Spülwässern (CSD-B) sowie
- Kokillen mit kompaktierten Brennelementhülsen, Strukturteilen und Technologieabfällen (CSD-C).

Die Mengengerüste sind in Tab. 5.3 ausgewiesen.

Tab. 5.3 Mengengerüste der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (Anzahl der Kokillen) /PEI 11b/

Abfallart	Anzahl
CSD-V	3.735
CSD-B	308
CSD-C	4.104

Die Mengen der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente ließen sich aufgrund der regulativen Vorgaben (Beendigung der Wiederaufarbeitung der Brennelemente aus deutschen Leistungsreaktoren im Jahr 2000) und des Kenntnisstandes zu den Wiederaufarbeitungsprozessen in den Anlagen in Sellafield, La Hague und Karlsruhe mit ausreichender Sicherheit prognostizieren. In einer neuen Veröffentlichung, die in der Abschlussphase des Vorhabens VSG erschien, wurde jedoch das Aktivitätsinventar der verglasten Abfälle aus der Wiederaufarbeitungsanlage in La Hague genauer untersucht /MEL 12/. Dabei wurde insbesondere für leicht flüchtige Elemente (Iod, Chlor) festgestellt, dass die bisherigen Inventarangaben überschätzt sind. Diese Erkenntnisse konnten im Vorhaben VSG nicht mehr berücksichtigt werden.

In Analogie zur Vorgehensweise bei den bestrahlten Brennelementen wurden die Kokillen in Altersgruppen gegliedert und zu ihrer Charakterisierung repräsentative Modellkokillen definiert. Das stoffliche und radiologische Inventar der Modellkokille mit den verglasten hochradioaktiven Abfällen wurde über Abbrandrechnungen, das der Modellkokille mit den kompaktierten Strukturteilen über Aktivierungsrechnungen bestimmt. Die homogenisierende Charakterisierung im Hinblick auf die Wärmeleistung und das Radionuklidinventar mit Hilfe von Modellkokillen wird aus den gleichen Gründen wie bei den bestrahlten Brennelementen als zielführend angesehen, da es im Sinne der Aufgabenstellung des Vorhabens VSG nicht erforderlich war, die individuellen Eigenschaften der einzelnen Kokillen auszuweisen, die durch Schwankungen in der Zusammensetzung des jeweils wiederaufgearbeiteten Brennstoffs bestimmt sind.

Bei der Bestimmung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars und der Wärmeleistung der Modellkokillen ist die Zeitspanne zwischen der Entladung der Brennelemente aus dem Reaktor und dem Produktionszeitpunkt der Kokille entscheidend. Die Mindestzeitspanne von vier Jahren, die von der französischen COGEMA angegeben wird /COG 86/, wurde im Vorhaben VSG zugrunde gelegt wobei allerdings die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, dass die Zeitspanne zwischen Entladung aus dem Reaktor

und der Produktion in der Wiederaufarbeitungsanlage in aller Regel deutlich höher ist. Dies führt zu einer Überschätzung der Gesamtaktivität in den Kokillen zum Zeitpunkt der Einlagerung und lässt den Schluss zu, dass innerhalb des Vorhabens VSG eine Vorgehensweise gewählt wurde, die zu einem ausreichend abdeckenden Radionuklidinventar der Kokillen führt.

Radioaktive Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren:

Die im Vorhaben VSG zu berücksichtigenden Abfälle umfassten die Brennelemente bzw. Brennstäbe aus Prototyp- und Forschungsreaktoren. Zu den **Forschungsreaktoren** gehören: FRM II (Forschungsneutronenquelle Garching), FRMZ (Forschungsreaktor Mainz) und BER II (Berliner Experimentierreaktor II)¹⁵. Für bestrahlte Brennelemente aus Forschungsreaktoren, die bis 2016 entnommen werden, existieren abgesehen von den Brennelementen des FRM II Abgabe-, Rücknahme- oder anderweitige Entsorgungsverträge mit dem Ausland. Aufgrund fehlender Angaben zur Aktivität der Abfälle des FRMZ, des kleinen Beitrags zum gesamten innerhalb des Vorhabens VSG berücksichtigten Mengengerüsts und der Erwartung, dass diese Brennelemente von den USA zurückgenommen werden, wurden die Abfälle des FRMZ im Vorhaben VSG vernachlässigt. Damit waren nur die Brennelemente des FRM II und die nach 2016 ggf. anfallenden Brennelemente des Forschungsreaktors BER II zu berücksichtigen.

Mit einem Bruttoabfallvolumen von ca. 2.000 m³ repräsentieren die bestrahlten Brennelemente aus **Prototypreaktoren** den entscheidenden Anteil der wärmeentwickelnden Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren (vgl. Tab. 5.4). Sie stammen aus den Hochtemperaturreaktoren AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich) und THTR 300 (Thorium-Hochtemperaturreaktor Hamm-Uentrop) sowie der KNK II (Kom-

¹⁵ Die Information, dass die Brennelemente aus dem Rossendorfer Forschungsreaktor (RFR) entgegen den ursprünglichen und abgesicherten Planungen ggf. doch für die direkte Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle zu berücksichtigen sind, erreichte das Vorhaben VSG zu einem Zeitpunkt (November 2011), nachdem die konzeptionellen Endlagerplanungen abgeschlossen waren und die darauf aufbauenden Sicherheitsanalysen voll umfänglich begonnen hatten. Vor diesem Hintergrund war zu entscheiden, ob das durch die Brennelemente des RFR veränderte Abfallmengenspektrum zu einer Anpassung des Endlagerkonzepts und einem entsprechenden Neustart der Sicherheitsanalysen im Vorhaben VSG führen muss. Vor dem Hintergrund der Anzahl der zusätzlichen Abfallgebände (18 CASTOR[®]MTR2) sowie ihrer grundlegenden Eigenschaften wurde diese Frage abschlägig entschieden. Sollte sich in den kommenden Jahrzehnten herausstellen, dass der bestrahlte Brennstoff aus dem Betrieb des RFR tatsächlich in Deutschland verbleibt und direkt endzulagern sein wird, stellt er von der Menge und seinen Eigenschaften her keine Größe dar, die einen relevanten Einfluss auf die vorläufigen Sicherheitsanalysen hat. Vor diesem Hintergrund war es vertretbar, die bestrahlten RFR-Brennelemente in den weiteren Analysen zum Vorhaben VSG nicht weiter zu berücksichtigen /PEI 11b/.

pakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe) und dem Nuklearfrachter Otto Hahn.

Die radiologische Charakterisierung dieser Abfälle und die Festlegung ihrer Wärmeleistung erfolgten anhand von Angaben der Abfallverursacher bzw. z. T. durch Abbrandrechnungen.

Tab. 5.4 Mengengerüste der Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren /PEI 11b/

Anlage	Abfallart	Behälter	Bruttovolumen [m ³]
AVR	288.161 BE-Kugeln	152 CASTOR [®] -THTR/AVR	656
THTR 300	617.606 BE-Kugeln	305 CASTOR [®] -THTR/AVR	1312
KNK II + Otto Hahn	2.484 KNK-II-Brennstäbe + 52 Otto-Hahn-Brennstäbe	4 CASTOR [®] -KNK	15,4
FRM II	ca. 120 – 150 MTR-BE	30 CASTOR [®] -MTR	75
BER II ¹⁾	ca. 120 BE (12 pro Jahr)	20 CASTOR [®] -MTR	50

¹⁾ Ohne Vertragsverlängerung

Die radioaktiven Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren ließen sich ebenfalls gut quantifizieren und mit ausreichender Genauigkeit hinsichtlich ihres radiologischen Inventars charakterisieren. Allerdings sind zu den Betriebszeiten der Forschungsreaktoren derzeit noch keine abschließenden Aussagen möglich. Da deren Abfallmengen aber im Vergleich zu denen der Leistungsreaktoren gering sind, wird der Unschärfe der Mengengerüste, die sich aus den nicht präzise prognostizierbaren Betriebszeiten für die Ergebnisse der Systemanalyse des Vorhabens VSG keine entscheidende Bedeutung beigemessen.

Vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle:

1. Verpresste Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung

Die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte sehen vor, bestrahlte Brennstäbe ohne die Brennelement-Strukturteile entweder in POLLUX[®]-Behälter (Streckenlage-

nung) oder in Brennstabkokillen (Bohrlochlagerung) endzulagern. Beide Konzepte bedingen somit die Trennung der Brennstäbe von den Brennelement-Strukturteilen. Für die Brennelement-Strukturteile wurde ein Netto-Abfallaufkommen (ohne Behälter) von 430 m³ zugrunde gelegt. Es wird aus den gleichen Gründen wie bei den bestrahlten Brennelementen davon ausgegangen, dass das Volumen der verpressten Strukturteile aus der Brennelementkonditionierung mit einer für die Endlagerplanung im Vorhaben VSG ausreichenden Sicherheit prognostiziert werden konnte.

Die stoffliche Zusammensetzung und das radiologische Inventar der verpressten Strukturteile wurden durch Aktivierungsrechnungen bestimmt. Die Durchführung von Aktivierungsrechnungen war nur für DWR möglich. Aufgrund der in SWR bestehenden Dampfblasen, die in axialer Richtung des Reaktorkerns eine sehr unterschiedliche Dichte haben, ist die Ableitung von Neutronenflüssen für SWR mit den bestehenden analytischen Instrumentarien nicht möglich. Die Gründe hierfür sind, dass sich die Strukturmaterialien zwischen SWR-Brennelementen und DWR-Brennelementen deutlich unterscheiden und dass die axialen Neutronenflussverhältnisse beim SWR grundverschieden sind von denen des DWR. Daher erfolgte eine Übertragung der Ergebnisse für einzelne Nuklide aus den Aktivierungsrechnungen für DWR-Reaktoren auf SWR-Reaktoren. Bei der Übertragung der Daten von DWR- auf SWR-Strukturteilen wurde angenommen, dass dies zu einer Überschätzung der Inventare in den SWR-Strukturmaterialien führt, da die Dampfblasen in SWR zu verminderten Neutronenflüssen und damit zu geringerer Aktivierung von SWR-Brennelement-Strukturteilen führen. Diese Vorgehensweise bot sich auch für die bestrahlten Brennelemente der WWER-Reaktoren an, für die ebenfalls keine Aktivierungsrechnungen durchgeführt wurden /PEI 11b/.

2. Sonstige Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung

Für diese Abfallarten wurden kalkulatorisch folgende Netto-Abfallvolumina angesetzt:

- Urantails aus der Urananreicherung: 35.000 m³
- Graphithaltige Abfälle: 1.000 m³
- Sonstige radioaktive Mischabfälle: 15.000 m³

Zu diesen Abfallströmen ließen sich aus folgenden Gründen keine belastbaren Aussagen zu den Mengengerüsten sowie zu den stofflichen und radiologischen Eigenschaften ableiten:

- Bei den **Urantails** handelt es sich im abfallrechtlichen Sinne derzeit nicht um radioaktiven Abfall, sondern um Reststoffe, die für weitere Uran-Anreicherungsprozesse verwendet werden können. Da zum Zeitpunkt der Durchführung des Vorhabens VSG die Verträge, die die Abgabe der Urantails nach Russland regelten, ausgelaufen waren, war eine weitere Verwertungsmöglichkeit für die anfallenden Urantails nicht absehbar. Insofern sollte im Rahmen des Vorhabens überprüft werden, ob eine Entsorgung in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle sicherheitstechnisch möglich ist und somit eine Option darstellt. Bei der Bestimmung der Abfallmengen wurde ein zu berücksichtigendes Nettovolumen von 35.000 m³ angesetzt, welches aus der in der atomrechtlichen Genehmigung festgesetzten Beschränkung der Lagerkapazitäten für die Urantrennanlagen in Gronau abgeleitet wurde /PEI 11b/. Weiterhin wurde unterstellt, dass die primär als Uranhexafluorid (UF₆) vorliegenden Urantails für den Fall der Endlagerung in Uranoxid (U₃O₈) überführt werden. Eine alternative Transformation der Urantails in metallische Form würde zwar das Volumen reduzieren, ist jedoch technisch schwierig und wirtschaftlich aufwendig. Aus den oben genannten Gründen ist somit zusammenfassend festzustellen, dass es derzeit unklar ist, ob Urantails überhaupt zur Entsorgung anstehen und wenn ja, in welchen Mengen und in welcher chemischen Form.
- Für **graphithaltige Abfälle** sollte im Vorhaben VSG aufgrund der hohen Tritium- und ¹⁴C-Inventare eine sicherheitstechnische Machbarkeit der Entsorgung in einem Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle ebenfalls geprüft werden. Das angesetzte Mengengerüst beruht auf groben Abschätzungen bezüglich des Anfalls an graphithaltigen radioaktiven Abfällen, primär Kohlestein, der in Hochtemperaturreaktoren als Neutronenreflektor eingesetzt wurde.
- Bei den **sonstigen radioaktiven Mischabfällen** wurde ebenfalls unterstellt, dass sie aufgrund ihrer radiologischen Eigenschaften nach heutigen Maßstäben nicht oder nur bedingt in einem Endlager für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle endgelagert werden können. Eine einigermaßen belastbare Quantifizierung dieses Abfallstroms ist zum heutigen Kenntnisstand praktisch unmöglich. Es kann zum heutigen Zeitpunkt lediglich als gesichert angesehen werden, dass es solche Abfälle geben wird. Für das Vorhaben VSG wurde angenommen, dass dieser Abfallstrom nicht größer sein wird als 15.000 m³.

Das radiologische und stoffliche Inventar der drei genannten Abfallströme konnte nur grob, häufig auf der Basis von Literaturrecherchen, abgeschätzt werden.

Trotz der oben angeführten Schwierigkeiten war die Informationslage zu den sonstigen vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen für die Entwicklung der Endlagerkonzepte und die Durchführung der Systemanalyse im Sinne der Aufgabenstellung des Vorhabens VSG ausreichend. Hintergrund ist, dass es nicht darum ging, verbindliche quantitative Mengengerüste aufzustellen und eine durchgängig belastbare stoffliche und radiologische Charakterisierung der Inventare dieser Abfälle vorzunehmen. Vielmehr sollte, wie bereits einleitend in Kapitel 3.3.2 erwähnt, im Sinne einer optionalen Studie untersucht werden, ob es sicherheitstechnisch möglich und sinnvoll ist, eine gemeinsame Endlagerung von wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in separaten Endlagerflügeln vorzunehmen oder ob sich die gemeinsame Endlagerung beider Abfallgruppen als derart nachteilig für das Einschlussvermögen der konzipierten Endlagersysteme erweist, dass dieses Konzept zukünftig nicht mehr verfolgt werden sollte.

Für eine Machbarkeitsstudie zu dieser optionalen Einlagerungsvariante reichte es aus, dass

- es für die angesetzten Abfallarten plausible Gründe für die gemeinsame Endlagerung mit wärmeentwickelnden Abfällen gibt,
- bei der stofflichen Charakterisierung möglichst alle unter Endlagerbedingungen sicherheitsrelevanten Eigenschaften dieser Abfallgruppe ausgewiesen werden (z. B. Gasbildung), damit in der Systemanalyse die entsprechenden Auswirkungen repräsentativ für diese Abfallgruppe untersucht werden können,
- die angesetzten Abfallmengen so hoch sind, dass die Auswirkungen ihrer stofflichen Eigenschaften nicht von vornherein als vernachlässigbar eingestuft werden müssen.

Fazit:

Aus den oben angeführten Gründen wird zusammenfassend davon ausgegangen, dass das zugrunde gelegte Abfallspektrum für die Zwecke einer initialen vorläufigen Sicherheitsanalyse vollständig ist und die Prognose der Mengengerüste sowie die ra-

diologische und stoffliche Charakterisierung – der jeweiligen Zielsetzung im Vorhaben VSG entsprechend – mit ausreichendem Tiefgang erfolgte.

5.1.1.2 Umsetzung der Anforderungen des Sicherheitskonzepts an die radioaktiven Abfälle

Folgende Maßnahmen, die im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG /MÖN 12/ gefordert werden, betreffen (auch) die radioaktiven Abfälle:

Maßnahme M8: Minimierung der abfallnah eingebrachten Feuchtigkeitsmenge (Restfeuchte der Abfälle) sowie

Maßnahme M16: Minimierung der Gasentwicklung im Endlagerbergwerk

Beide Maßnahmen zielen darauf ab, die Korrosion der Abfallbehälter und damit den Behälterausfall sowie die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im Endlager zu begrenzen. Sie betreffen neben dem Feuchtegehalt des Salzgrusversatzes auch die Restfeuchtegehalte der Abfälle und ihrer Behälter. Weiterhin soll durch die Begrenzung der mit den Abfällen eingebrachten Feuchtigkeitsmengen die Mobilisierung von Radionukliden durch Lösungsvorgänge reduziert werden.

Generell gilt, dass die in den radioaktiven Abfällen enthaltene Restfeuchte möglichst gering sein soll. Dies hat dreierlei Gründe:

- Die in den Abfällen bzw. den Abfallbehältern enthaltene Restfeuchte führt zur Korrosion der metallischen Behälterinnenwandungen und kann in Abhängigkeit von der Dicke der Behälterwandungen bei ausreichender Feuchtigkeitsmenge Undichtigkeiten, z. B. durch Lochfraß, verursachen. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU die Bergbarkeit von Abfallgebinden mit wärmeentwickelnden Abfällen über einen Zeitraum von 500 Jahren fordern. Bis zu diesem Zeitpunkt muss gewährleistet sein, dass die Behälter soweit intakt bleiben, dass sie als Einheit geborgen werden können. Somit ist sicherzustellen, dass die in den Abfällen oder Behältern enthaltene Restfeuchte so gering ist, dass es während des o. g. Zeitraums nicht zu einer die mechanische Festigkeit beeinträchtigenden Korrosion des Behälters von innen nach außen kommt.
- In Anwesenheit von Feuchtigkeit kommt es zur anaeroben Korrosion der metallischen Behälterwandungen und zur Bildung von Wasserstoffgas. Bei Anwesenheit

von organischen Bestandteilen (z. B. Polyethylen bzw. Harz im Abschirmmaterial der Endlagerbehälter, Behälterlackierungen oder zellulosehaltige Bestandteile in den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Mischabfällen) kommt es durch bakterielle Zersetzung der verfügbaren Kohlenstoffverbindungen ebenfalls zur Gasbildung (hauptsächlich Methan CH_4 und Kohlendioxid CO_2). Generell ist zu verhindern, dass es im Endlager durch Korrosionsgasbildung und die stattfindenden Gasflüsse zu Gasdrücken kommt, die deutlich über dem lithostatischen Druck liegen, wobei noch zu berücksichtigen ist, dass durch Kompaktion des Salzgruses das Gas zusätzlich komprimiert wird. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die Aufreißfestigkeit des Steinsalzes, d. h. die mechanische Zugspannung, die das Gestein noch rissfrei aufnehmen kann, überschritten wird und in der Folge weitreichende Wegsamkeiten (Fracs) für Lösungen und Gase im umgebenden Gestein entstehen, die über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinausreichen. Weiterhin können Gasdrücke im Endlager den Transport von gelösten oder gasförmigen Radionukliden, die aus den Abfällen freigesetzt wurden, antreiben.

- Der Kontakt von Wasser mit den radioaktiven Abfällen führt in den Behältern zu Lösungsvorgängen und hiermit verbunden zur Freisetzung von Radionukliden, deren Ausmaß von der Beschaffenheit der Abfälle, der verfügbaren Lösungsmenge sowie dem geochemischen Milieu abhängt. Bezüglich einer umfassenden Darstellung der einzelnen Prozesse, die zur Radionuklidlösung führen, wird auf den FEP-Katalog des Vorhabens VSG /WOL 12b/ verwiesen. Weiterhin beeinflusst die Anwesenheit von Wasser durch die Korrosion der Brennelemente die Mobilisierung von gasförmigen Radionukliden aus der sogenannten instant release fraction (IRF), einem leicht löslichen Spaltproduktanteil (z. B. Spaltgase, ^{137}Cs , ^{135}Cs und ^{129}I), der sich im Ringspalt und Plenum des Brennstabs sowie auf Bruchflächen und Korngrenzen des Kernbrennstoffes befindet (vgl. hierzu /LAR 13/).

Aus den oben angeführten Gründen dient die Minimierung der Wassergehalte in den Abfällen sowohl dem Schutz der geologischen Barriere in der näheren Umgebung des Endlagerbergwerks (Komponente C) als auch der Minimierung der Freisetzung von Radionukliden in gasförmiger oder gelöster Form.

Die im Vorhaben VSG angesetzten Wassergehalte der einzelnen Abfalltypen – bezogen auf den jeweilig verwendeten Behältertyp – sind in Tab. 5.5 angegeben. Hierbei handelt es sich um mobile Wassergehalte, also solche, die tatsächlich für die oben

beschriebenen Reaktionen zur Verfügung stehen und nicht im Beton gebunden sind oder als Kristallwasser vorliegen.

Die Behälter der bestrahlten Brennelemente aus Leistungs-, Forschungs- und Prototypreaktoren weisen sehr geringe Restwassergehalte auf. Bei der Ableitung dieser Werte konnte beispielsweise davon ausgegangen werden, dass spätestens während des Beladens eines POLLUX[®]-10-Behälters mit heißen Brennelementen die bis dahin vorhandene Restfeuchte soweit verdampft, dass die verbleibende Restfeuchte in etwa der Luftfeuchtigkeit entspricht.

Tab. 5.5 Mobile Wassergehalte pro Behälter für das Einlagerungskonzept AB1 (Streckenlagerung, s. Kap. 5.1.2.1, aus /LAR 13/)

Abfallart	Behältertyp	Behälteranzahl	Mobiler Wassergehalt pro Behälter [kg]
Brennelemente aus Leistungsreaktoren	POLLUX [®] -10	2.120	0,06
Radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	POLLUX [®] -9	906 ¹⁾	15,6 ¹⁾
Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren	CASTOR [®]	511	0,12
Verpresste Strukturteile	Gussbehälter Typ II	2.620	1,91
Urantails	Stahlcontainer Typ VI	7.217	77,59
Graphitabfälle	Betonbehälter ²⁾ Gussbehälter Typ II	313 2.300	35,14
Sonstige radioaktive Mischabfälle	Stahlcontainer Typ IV Gussbehälter Typ II Betonbehälter Typ I	1.695 1.150 800	506,19 47,73 20,125

¹⁾ Die eingebrachte Feuchte bezieht sich alleine auf die durch die CSD-C-Abfälle eingebrachte Feuchtigkeit (0,5 Gew.-%) und wurde in /LAR 13/ modelltechnisch bedingt über alle Behälter, auch CSD-B und CSD-V, homogenisiert.

²⁾ Die Behälteranzahl bezieht sich auf die Angaben in /BOL 11/. In /BOL 12/ werden davon abweichend 2.300 Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung genannt. Die Gesamtmasse an Feuchtigkeit in den Abfällen ändert sich dadurch nicht.

Die Feuchtegehalte der CSD-C-Kokillen haben ihre Ursachen in den jeweiligen Wiederaufarbeitungsprozessen und sind insoweit als nicht einheitlich anzunehmen. Es

wurde angenommen, dass die Kokillen die gleiche Feuchtigkeit (0,5 Gew.-%) wie die verpressten Brennelement-Strukturteile enthalten. Eine signifikante sicherheitstechnische Relevanz der Restfeuchten in den Behältern mit Wiederaufarbeitungsrückständen hat sich weder aus den Ergebnissen der Integritätsanalysen der geologischen Barriere noch aus denen der radiologischen Konsequenzenanalysen ergeben.

Die Restwassergehalte der verpressten Strukturteile der Brennelemente aus Leistungsreaktoren, die auf überschlägigen Abschätzungen beruhen, haben sich im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse als in der frühen Nachbetriebsphase unter den in /LAR 13/ dargestellten Modellvorstellungen zur IRF als äußerst sensitiv für die Mobilisierung gasförmiger Radionuklide aus der instant release fraction erwiesen. Aus diesem Grund sollten die Restfeuchten im Rahmen zukünftiger Untersuchungen möglichst genau bestimmt und ggf. durch Konditionierungsmaßnahmen (Trocknen) weiter reduziert werden.

Bei den sonstigen vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen (Urantails, graphithaltige Abfälle und sonstige Mischabfälle) ist zu berücksichtigen, dass die ermittelten Feuchtemengen in der Regel ebenfalls nur auf groben Abschätzungen beruhen, da keine belastbaren Aussagen zu den stofflichen Charakteristika und somit auch nicht zu den Feuchtemengen in Abfällen und Behältern vorlagen /PEI 11b/. In der Regel wurden wie bei den Strukturteilen massenbezogene Restfeuchten von 0,5 % angesetzt.

Fazit:

Als Quintessenz der vorangegangenen Ausführungen lässt sich ableiten, dass die mit den Maßnahmen M8 und M16 verbundene Anforderung der Minimierung der Restfeuchte als erfüllt angesehen werden kann, soweit dies die wärmeentwickelnden Abfälle betrifft und diese Anforderung an die Konditionierung zukünftig qualitätsgesichert umgesetzt wird. Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen kann diese Aussage aufgrund bestehender Ungewissheiten nicht getroffen werden. Da sich die Restfeuchtegehalte in den Abfallbehältern als sehr sensitive Einflussgröße insbesondere für die Freisetzung volatiler Radionuklide gezeigt hat (vgl. Kap. 5.2.3 und /LAR 13/) wird (unabhängig von dem Entsorgungsweg) empfohlen, diese Abfälle so zu konditionieren, dass möglichst geringe Restfeuchten verbleiben. Dies kann zum Beispiel durch Trocknung oder bei einem Teil der Mischabfälle durch Veraschung geschehen. Weiterhin sollte der Restfeuchtegehalt eines Abfallgebindes verlässlich bestimmt und deklariert werden.

Maßnahme M15: Begrenzung der Temperaturen im Hauptsalz auf 200 °C

Diese Maßnahme zielt auf die thermische Auslegung des Endlagerbergwerks ab. Die Begrenzung der Maximaltemperaturen im Endlagerbergwerk, die der Vermeidung negativer Veränderungen der Abfälle (verringerte Stabilität der Brennstäbe bzw. Umwandlung des Glaskörpers bei den CSD-V) sowie der Vermeidung der Kristallwasserfreisetzung im Carnallit dient, kann durch die Kombination mehrerer Einzelmaßnahmen erreicht werden:

1. durch entsprechend gewählte Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken bzw. der Einlagerungsbohrlöcher,
2. durch entsprechend gewählte Abstände zwischen den Behältern innerhalb einer Einlagerungsstrecke bzw. innerhalb eines Einlagerungsbohrloches,
3. durch die Beladungsdichte eines Behälters,
4. durch die Abklingzeit, beispielsweise durch die Zeitspanne zwischen der Entnahme eines Brennelements aus dem Reaktorkern und seiner Einlagerung im Endlagerbergwerk oder durch die Zwischenlagerzeit eines verglasten Abfallgebindes,
5. durch die Anordnung (Mischung) stark und weniger stark wärmeentwickelnder Abfälle in einem gemeinsamen Einlagerungsfeld¹⁶.

Aus der Einzelmaßnahme 4 ergeben sich Anforderungen an die wärmeentwickelnden Abfälle bezogen auf die Mindestdauer der Zwischenlagerung. Bei der thermischen Auslegung der konzipierten Endlagerbergwerke, die im Abschlussbericht /BOL 12/ dokumentiert ist, wurde die Kombination der oben genannten Einzelmaßnahmen im Sinne der Einhaltung der oben angeführten Temperaturvorgabe optimiert. Hieraus wurden je nach Brennelementtyp erforderliche Zwischenlagerungszeiträume (bezogen auf den Zeitpunkt der Entnahme aus dem Reaktor) zwischen < 5 Jahren für (WWER-Brennelemente) und 49 Jahren für eine Kombination einer Behälterbeladung von DWR- und Mischoxid(MOX)-Brennelementen im Verhältnis von 89 zu 11 ermittelt¹⁷.

¹⁶ Diese Maßnahme wurde im Vorhaben VSG nicht verfolgt, da sie der sicherheitskonzeptionellen Forderung nach räumlicher Trennung der Abfallarten widerspricht (vgl. Maßnahme M11, Kap. 5.1.2.3).

¹⁷ Für die Einlagerung von MOX-Brennelementen, die im Vergleich zu UO₂- Brennelementen eine höhere und erheblich langsamer abklingende Wärmeleistung aufweisen, wurde in /BOL 12/ für DWR-Brennelemente eine Behälterbeladung vorgegeben, die zum überwiegenden Anteil aus UO₂-Brennstäben besteht und zu einem geringen Anteil aus denen der MOX-Brennelementen. Das in im Vorhaben VSG verwendete Verhältnis in der Behälterbeladung von 89 % UO₂-Anteil und 11 % MOX-Anteil entspricht dem Mischungsverhältnis, welches sich aus dem Verhältnis der Gesamtmengen von DWR-UO₂-Brennelementen und DWR-MOX- Brennelementen ableitet.

Für verglaste wärmeentwickelnde Rückstände aus der Wiederaufarbeitung wurden erforderliche Zwischenlagerungszeiten von minimal 28 Jahren berechnet /BOL 12/.

Fazit:

Es wird eingeschätzt, dass diese Zwischenlagerzeiten in der Praxis realisiert werden können. Insofern wird davon ausgegangen, dass die die wärmeentwickelnden Abfälle betreffenden Anforderungen der Maßnahme M15 umsetzbar sind.

Maßnahme M17: Kritikalitätsausschluss

Auch diese Maßnahme stellt Anforderungen an die Eigenschaften der radioaktiven Abfälle bzw. an die Abfallbehälter. Wie jedoch bereits in Kapitel 4.1.2 erwähnt, wurden die unter M17 geforderten **Analysen** bereits im Vorfeld des Vorhabens VSG für verschiedene Endlagerbehälter durchgeführt, so dass im Rahmen des Vorhabens VSG nur die zugehörigen **Nachweise** für den Kritikalitätsausschluss durchgeführt wurden /MÖN 12/. Insofern wird dieser Aspekt im Zusammenhang mit dem Nachweis des Kritikalitätsausschlusses in Kapitel 5.2.4 behandelt.

5.1.2 Endlagerbergwerke

5.1.2.1 Auffahrungs- und Einlagerungskonzepte

Aus den im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepten resultieren Bergwerk-Layouts, die durch das jeweilige Auffahrungs- und Einlagerungskonzept sowie das Verfüll- und Verschlusskonzept charakterisiert werden. Da das Verfüll- und Verschlusskonzept die Verschlusskomponenten Schacht-, und Streckenverschlüsse bzw. Versatz betrifft, wird es zusammenfassend in Kapitel 5.1.4 beschrieben.

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG wird in Übereinstimmung mit den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ gefordert, dass bis zum Verschluss der Schächte eine Rückholung von Abfallbehältern mit wärmeentwickelnden Abfällen gewährleistet sein muss. Folglich beinhalten die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte auch Strategien zur Rückholung wärmeentwickelnder Abfälle in Abhängigkeit von den jeweils konzipierten Einlagerungsvarianten. Im Nachfolgenden wird zunächst ein kurzer Überblick zu innerhalb des Vorhabens VSG entwickelten Auffah-

rungs- und Einlagerungskonzepten gegeben. Bezüglich weitergehender Informationen zu Hohlraumgeometrien und -dimensionen, Einlagerungstechnik, infrastrukturellen Anlagen oder Betriebsführung sei auf die entsprechenden VSG-Abschlussberichte /BOL 11/ und /BOL 12/ verwiesen.

Wie in Kapitel 3.4.1 erwähnt, wurden im Vorhaben VSG Konzepte für die Einlagerung aller wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in einem Endlagerflügel nordöstlich der Schächte Gorleben 1 und 2

- in horizontalen Strecken (Variante B1),
- in Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern (Variante B2) sowie
- in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Variante C),

jeweils in Kombination mit der optionalen Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern in einem Endlagerflügel südwestlich der Schächte (Variante A) entwickelt. Allen Einlagerungsvarianten gemein ist, dass

- der Zugang zu dem jeweiligen Endlagerbergwerk von über Tage aus über die beiden bestehenden Tagesschächte Gorleben 1 und 2 erfolgt, an die sich südlich ein Infrastrukturbereich mit einem Gesamtvolumen von etwa 110.000 m³ anschließt,
- die Auffahrung der jeweils erforderlichen Einlagerungsfelder in einer Teufe von 870 m u. GOK, d. h. 30 m unterhalb des derzeitigen Erkundungsbergwerks, im Zentralteil des Salzstockes erfolgt,
- die für die Infrastruktur der Einlagerung erforderlichen Richtstrecken und Querschläge in Richtung Nordosten für die wärmeentwickelnden Abfälle und bestrahlten Brennelemente und für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle in Richtung Südwesten aufgefahren werden (vgl. Abb. 5.1),
- eine räumliche Trennung der Abfallarten derart erfolgt, dass die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (Uran-Tails, graphithaltige Abfälle sowie sonstige Mischabfälle) in einem Endlagerflügel südwestlich der Schächte (Westflügel) und die wärmeentwickelnden Abfälle (einschließlich der Brennelement-Strukturteile und der CSD-B/CSD-C Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) nordöstlich der Schächte (Ostflügel) einzulagern sind,

- bestehende Salzrechte nicht berücksichtigt wurden; die Planung der Einlagerungsbereiche und die Wahl der Streckenführungen erfolgte allein nach berg- und sicherheitstechnischen Maßstäben auf Grundlage des BGR-Arbeitsmodells zum strukturellen Aufbau des Salzstocks Gorlebens /BFS 90/.

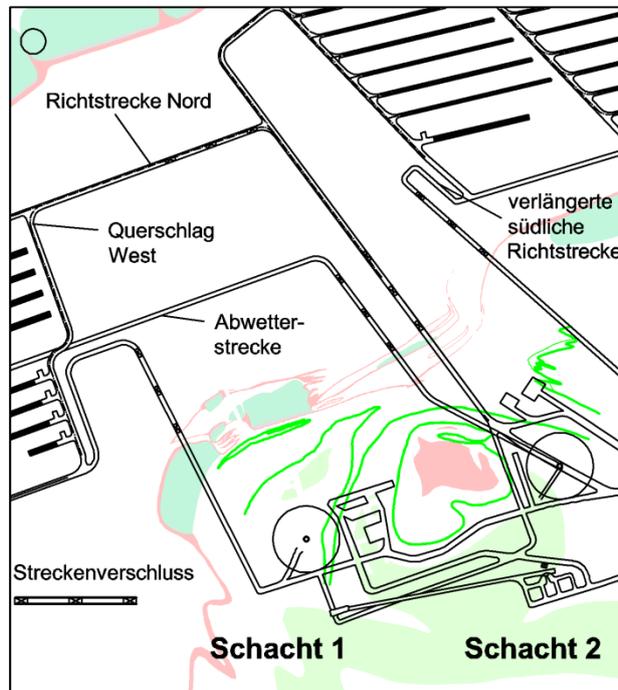


Abb. 5.1 Position von Schächten, Infrastrukturbereich, Richtstrecken und Querschlägen im schachtnahen Bereich (Beispiel optimiertes Streckenlagerungskonzept), aus /BOL 12/

Entsprechend den konzipierten Einlagerungsvarianten unterscheiden sich die Einlagerungskonzepte:

Für radioaktive **Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung**, die im Rahmen der Planungen als Option mit betrachtet wurden, wurde die Einlagerung in Kammern geplant (Variante A). Dementsprechend wurde im Westflügel ein Einlagerungsbereich mit insgesamt drei Feldern, jeweils eines für Uran-Tails, graphithaltige Abfälle und sonstige Mischabfälle, vorgesehen. Bei dem in Abb. 5.2 dargestellten Endlager-Layout handelt es sich um das im Hinblick auf einen möglichst geringen Flächenbedarf optimierte Endlagerkonzept des Westflügels.

Die Einlagerungskonzeption sieht eine getrennte Einlagerung der drei Abfalltypen in verschiedenen Feldesteilen vor:

- West 1 für 7.217 Stahlblechcontainer Typ VI für Uranoxid (U_3O_8),
- West 2 für 1.695 Stahlblechcontainer Typ IV, 1.150 Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung und 800 Betonbehälter Typ I aus Normal- und aus Schwerbeton für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Mischabfälle,
- West 3 für 2.300 Gussbehälter Typ II ohne Blei-Abschirmung für graphithaltige Abfälle.

In der Kombination mit den nachfolgend beschriebenen Varianten zur Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und Brennelement-Strukturteilen bleibt das Endlagerkonzept zur Variante A stets unverändert.

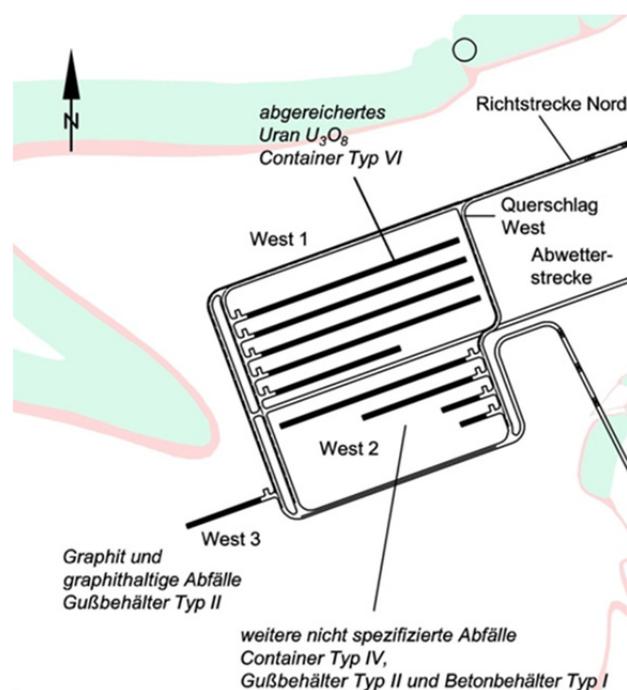


Abb. 5.2 Variante A: Optimierte Einlagerungsfelder (West 1 bis West 3) für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westflügel, aus /BOL 12/

Im Fall der **Streckenlagerung wärmeentwickelnder Abfälle** (Variante B1) erfolgt planerisch eine Auffahrung der erforderlichen Einlagerungsfelder ausgehend von süd-west-nordost verlaufenden Richtstrecken und den davon in einem Winkel von 120° abzweigenden Querschlägen. Ausgehend von den Abfallmengengerüsten, die sich aus

dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergienutzung ergeben, und den Ergebnissen von im Vorhaben VSG durchgeführten thermischen Auslegungsrechnungen zur Bestimmung der zur Einhaltung einer thermischen Auslegungstemperatur von maximal 200 °C erforderlichen Behälter- und Streckenabstände¹⁸ werden zwölf Einlagerungsfelder mit selbstabschirmenden Endlagerbehältern benötigt /BOL 12/ (Abb. 5.3).

Bezüglich ihrer Beladung mit verschiedenen Behältertypen teilen sich die Felder wie folgt auf:

- Ost 1 für 511 CASTOR[®]-THTR/AVR/KNK, CASTOR[®] MTR 2 und 102 POLLUX[®]-9 (CSD-B/C)
- Ost 2 für 389 POLLUX[®]-9 (CSD-B/C) und 165 POLLUX[®]-9 (CSD-V)
- Ost 3 für 250 POLLUX[®]-9 (CSD-V) und 58 POLLUX[®]-10
- Ost 4 bis 11 für 1894 POLLUX[®]-10 und
- Ost 12 mit 168 POLLUX[®]-10 und 2.620 Gussbehälter Typ II

Alternativ zur Endlagerung bestrahlter Brennelemente und wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in POLLUX[®]-Behältern wurde im Vorhaben VSG auch die direkte Endlagerung von bestrahlten Brennelementen und Wiederaufarbeitungsabfällen in **Transport- und Zwischenlagerbehältern** (Typ CASTOR[®]; Variante B2) in einer Differenzbetrachtung zur Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern untersucht. In diesem Konzept wird die Einlagerung der Transport- und Lagerbehälter in horizontalen Streckenstummeln vorgesehen, die jeweils westlich und östlich der Querschläge abzweigen (Abb. 5.4).

Der Flächenbedarf wird in etwa so groß eingeschätzt, wie der für die Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern (Variante B1). Die erforderlichen Zwischenlagerzeiten (bezogen auf den Zeitpunkt der Entladung aus dem Reaktor) bewegen sich dabei im Bereich von 40 bis 45 Jahren bei der Einlagerung von Brennelementen und bei 65 bis 70 Jahren bei der Einlagerung von verglasten Abfällen aus der Wiederaufarbeitung.

¹⁸ Ausgehend von einer Zwischenlagerzeit von ca. 50 Jahren /BOL 12/.

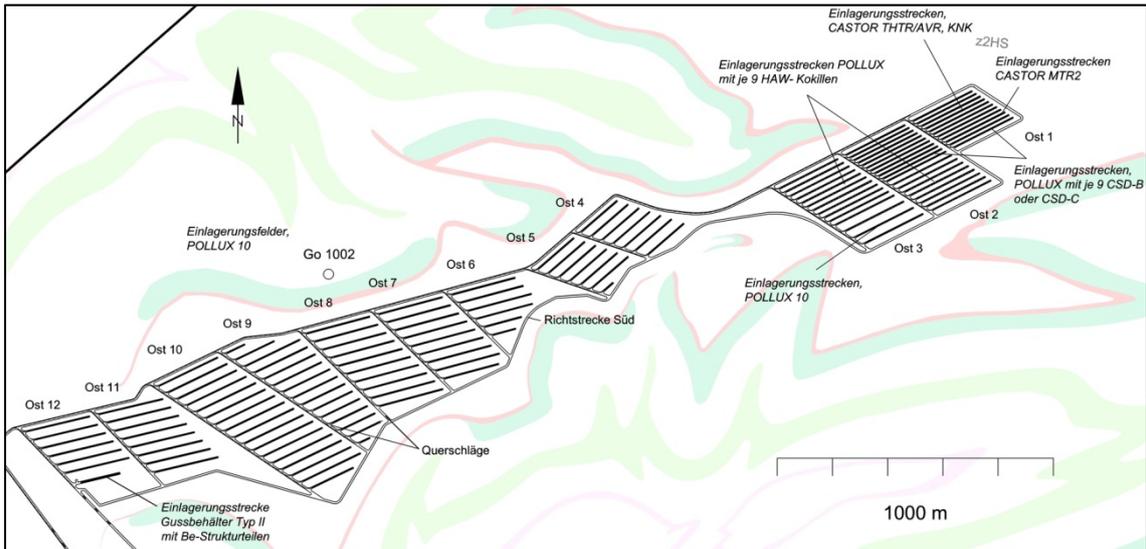


Abb. 5.3 Variante B1: Einlagerungsfelder (Ost 1 bis 12) für die Streckenlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel, aus /BOL 12/

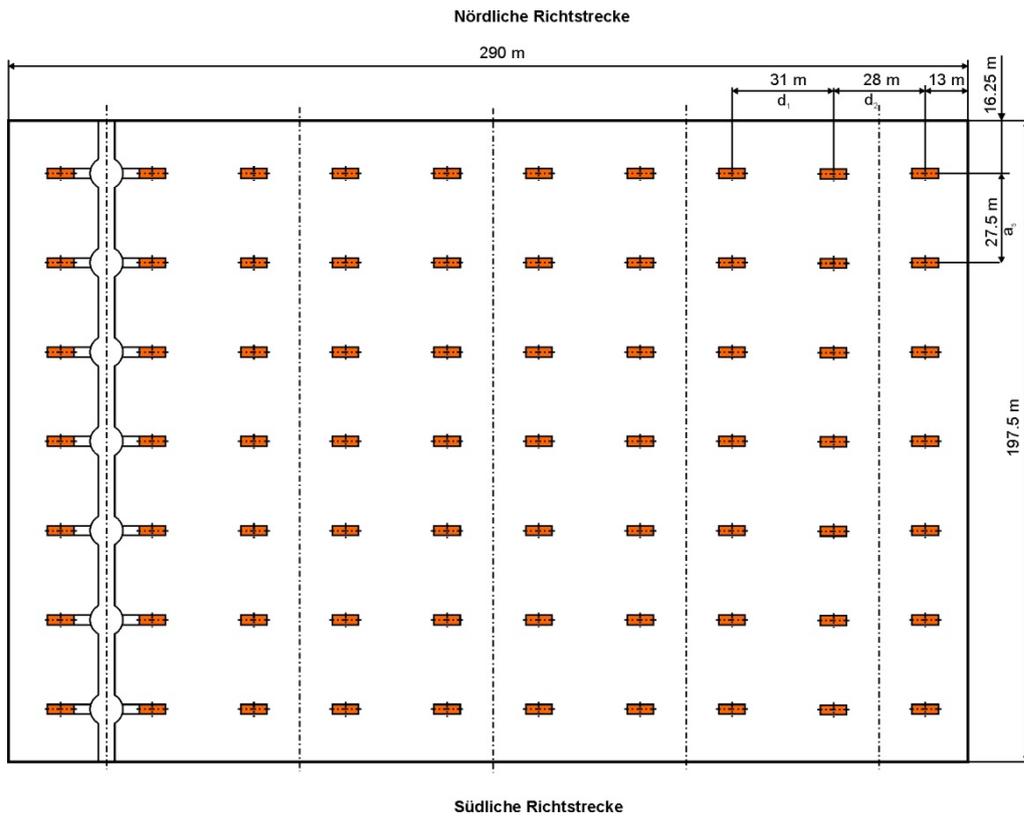


Abb. 5.4 Variante B2: Einlagerungsfeld für 70 Transport und Lagerbehälter, aus /BOL 12/

Im Fall der **Bohrlochlagerung wärmeentwickelnder Abfälle** (Variante C) erfolgt konzeptionell die Einlagerung von bestrahlten Brennelementen und wärmeentwickelnden Abfällen in vertikalen, bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern (mit 0,6 m Durchmesser), die für eine Rückholung verrohrt werden /NSE 12/. Die Beladung der Bohrlöcher erfolgt durch eine Einlagerungsmaschine von Überfahrungsstrecken aus, die die nördliche und die südliche Richtstrecke verbinden. Die Überfahrungsstrecken weisen einen Mindestquerschnitt von rund 40 m² auf. Direkt über den Bohrlöchern wird dieser in Abhängigkeit von der Größe der Bohranlage und der Technik zum Einbau der Verrohrung und der Einlagerungstechnik um wenige m² erweitert.

Innerhalb des Vorhabens VSG wurden Rückholungskonzepte für die verschiedenen Varianten der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle entwickelt (vgl. Kap. 5.1.2.2). Als Konsequenz erfolgt die Einlagerung von bestrahlten Brennelementen und wärmeentwickelnden Abfällen mittels rückholbarer Brennstabkokillen (BSK-R) bzw. modifizierter Triple Packs in verrohrten Bohrlöchern. Da die Kokillen nicht selbstabschirmend sind, wird ein innerbetrieblicher Transport in selbstabschirmenden Transferbehältern bis zum Ablassen der Kokille in das Bohrloch unterstellt.

Auf Basis der Ergebnisse der thermischen Auslegungsrechnungen werden für die Kokillen mit wärmeentwickelnden Abfällen und bestrahlten Brennelementen¹⁹ im Ostflügel des Salzstockes Gorleben insgesamt drei Einlagerungsfelder (s. Abb. 5.5) mit Überfahrungsstrecken für verrohrte, bis zu 300 m tiefe Bohrlöcher benötigt. Jedes Bohrloch wird mit jeweils maximal 50 BSK-R²⁰ (bestrahlte Brennelemente/Strukturteile) respektive Triple-Pack (Wiederaufarbeitungsrückstände) gefüllt.

Im Einlagerungskonzept zur Variante C werden die drei Feldesteile folgendermaßen beladen:

- Feld Ost 1: 1.471 Triple-Pack CSD-B und -C, 290 Kokillen THTR/AVR, KNK und MTR 2 und 600 Triple-Pack-HAW-Kokillen
- Feld Ost 2: 645 Triple-Pack-HAW-Kokillen und 4650 BSK-R
- Feld Ost 3: 2.418 BSK-R und 874 BSK-R mit Brennelement-Strukturteilen

¹⁹ Ausgehend von einer Zwischenlagerzeit von ca. 50 Jahren /BOL 12/.

²⁰ BSK-R: Brennstabkokille-Rückholbar

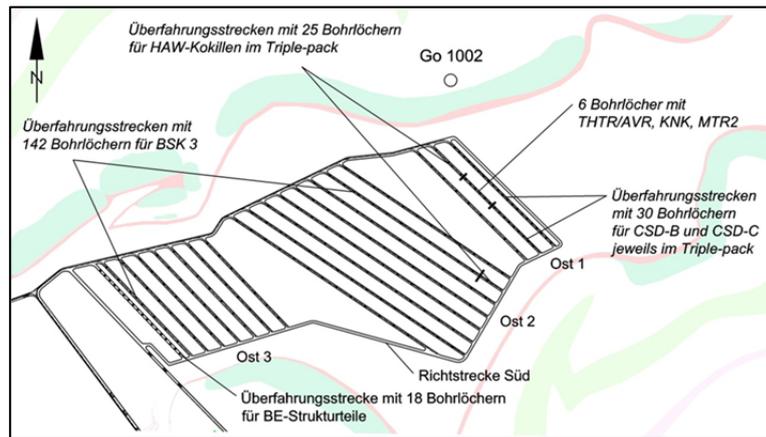


Abb. 5.5 Variante C: Bohrlochlagerung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen sowie Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel des Salzstockes, aus /BOL 12/

Fazit:

Zusammenfassend ist festzustellen, dass keine grundlegenden Zweifel an der technischen Umsetzbarkeit der im Vorhaben VSG entwickelten Auffahrungs- und Einlagekonzepte bestehen. In die Entwicklung der Endlagerkonzepte flossen die Ergebnisse jahrzehntelanger Forschung und Entwicklung zur technischen Ausgestaltung der Endlagerung von radioaktiven Abfällen im Steinsalz allgemein (z. B. /DBE 89/) sowie aus dem konventionellen Salzbergbau ein. Dies gilt auch für die in diesem Bericht nicht aufgegriffenen Aspekte des Endlagerbetriebes, der Betriebssicherheit und des betrieblichen Strahlenschutzes, die ausführlich in /BOL 11/ und /BOL 12/ beschrieben sind. Auch die Einschätzung der betrieblichen Machbarkeit der entwickelten Endlagerkonzepte, die im Arbeitspaket 12 vorgenommen wurde, ergab keine grundlegenden Zweifel an der Machbarkeit und Umsetzbarkeit der entwickelten Endlagerkonzepte aus betriebssicherheitlicher Sicht /PEI 12/.

Obenstehendes bedeutet jedoch nicht, dass sämtliche, im Rahmen des Vorhabens VSG entwickelten technischen Konzepte bereits heutzutage Genehmigungsreife aufweisen. Insbesondere zu folgenden Aspekten wird zukünftiger Entwicklungsbedarf gesehen:

- **Endlagerbehälter:** Für die zu berücksichtigende Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen wurden in der Konzeption Endlagerbehälter unterstellt, die geeignet sind, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Für keinen dieser Behälter gibt es bisher genehmigungsreife Planungen oder bereits erteilte

Zulassungen. Insofern wird es als notwendig angesehen, die Behälter bis zur Genehmigungsreife weiterzuentwickeln. Der Entwicklungsbedarf betrifft neben den Aspekten der Betriebssicherheit und des betrieblichen Strahlenschutzes den Nachweis der technischen Machbarkeit einer Rückholung während der Betriebsphase und der Handhabbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Endlagerverschluss im Sinne der in den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderten Bergbarkeit /BMU 10a/.

- **Transport- und Einlagerungstechnik Streckenlagerung:** Die prinzipielle technische Machbarkeit von Transport- und Einlagerungstechniken für Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde Abfälle konnte für die Variante B1 (Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern) und Variante C (Brennstabkokillen) im Rahmen von Demonstrationsversuchen in übertägigen Anlagen gezeigt werden /BOL 11/. Die Zulässigkeit der Übertragung aller dabei erzielten Ergebnisse auf die untertägigen Bedingungen in einem Endlagerbergwerk unter Beachtung aller sinngemäß anzuwendender Anforderungen aus dem kerntechnischen Regelwerk ist jedoch zu zeigen und wäre durch gezielte Demonstrationsprogramme zu überprüfen.
- **Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern:** Für den Transport und die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern (Typ CASTOR[®]) bestehen nur konzeptionelle Planungen. Derzeit gibt es keine Schachtförderanlage, die in der Lage ist, 160 Mg schwere Behälter nach unter Tage zu fördern. Ebenso ist der Transport im Bergwerk sowie die Einlagerung unter Bergbaubedingungen zunächst übertägig und in der Folge untertägig zu demonstrieren. Insgesamt muss die Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit eines solchen Einlagerungskonzeptes im Rahmen zukünftiger Planungen und Demonstrationsprojekten nachgewiesen werden. Gleiches gilt für die Demonstration der Rückholbarkeit von Transport- und Lagerbehältern während der Betriebsphase eines Endlagers.
- **Einlagerung in tiefen Bohrlöchern:** Bei der Endlagerung von rückholbaren Kokillen in bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern wird aus technischer Sicht Neuland beschritten. Um die Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit nachzuweisen, wird es als erforderlich angesehen, konkrete Anforderungen an die Präzision der Bohrlochausführung sowie deren technischen Ausbau (Verrohrung) aus betrieblichen Sicherheitsanalysen abzuleiten und ihre Umsetzbarkeit unter realen Bedingungen einschließlich der Berücksichtigung der Rückholbarkeit der Kokillen (vgl. Kap. 5.1.2.2) zu erproben bzw. zu demonstrieren.

5.1.2.2 Rückholungskonzepte

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ wird gefordert, dass der Aspekt der Rückholbarkeit von Behältern mit radioaktiven Abfällen bis zum Verschluss des Endlagers bei der Planung der Einlagerungs-, Verfüll- und Verschlusskonzepte sowie der Betriebsführung zu berücksichtigen ist. Da sich der materielle Gültigkeitsbereich der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ ausschließlich auf die Endlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen erstreckt, beziehen sich die entsprechenden Forderungen folglich nicht auf die im Westflügel eingelagerten Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Variante A). Die Entwicklung von Rückholungskonzepten betrifft somit ausschließlich alle wärmeentwickelnden Abfälle, deren Einlagerung planerisch im Vorhaben VSG bei allen Varianten (B1, B2, C) im Ostflügel der Endlagerbergwerke vorgesehen ist.

Im Vorhaben VSG, welches sich erstmalig in Konzeptstudien mit der auch in Deutschland geforderten Rückholbarkeit auseinandergesetzt hat, wurde bei der Entwicklung der Rückholungskonzepte als Prämisse davon ausgegangen, dass sämtliche wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle insgesamt rückzuholen sind. Diese Prämisse impliziert, dass bei der Neuauffahrung des jeweiligen Endlagerbergwerks zum Zwecke der Rückholung keine Rücksicht auf den Integritätserhalt der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche zu nehmen ist²¹. Bei jeder der konzipierten Einlagerungsvarianten sind für die Rückholung der Abfallbehälter aus dem versetzten Endlager prinzipiell neue Auffahrungen erforderlich.

Die im Vorhaben VSG entwickelten konzeptionellen Rückholungskonzepte zielen darauf ab, dass die Rückholung der Endlagerbehälter weitestgehend durch Umkehrung des Einlagerungsprozesses erfolgt. Dabei sollen soweit möglich Techniken eingesetzt werden, die bereits bei der Einlagerung vorgesehen sind.

²¹ Hieraus resultiert sicherheitskonzeptionell ein gewisser Widerspruch: Der materielle Gültigkeitsbereich der Sicherheitsanforderungen des BMU beschränkt sich ausschließlich auf wärmeentwickelnde Abfälle. Folglich wurden die Rückholungskonzepte im Vorhaben VSG nur für diese Abfallgruppe entwickelt. Unter der Annahme, dass die Gesamtheit dieser Abfälle ohne Rücksicht auf die Integrität der geologischen Barriere in der Umgebung der Endlagerbergwerke im Ostflügel zurückgeholt werden müssen, stellt sich die Frage, ob und wie unter diesen Randbedingungen der langfristig sichere Einschluss der verbleibenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel realisiert werden kann.

Die wesentlichen Prozessschritte der Rückholung, die für alle Einlagerungsvarianten wärmeentwickelnder Abfälle gelten, sind:

- Wiederauffahren von versetzten Richtstrecken und Querschlägen,
- Auffahren von durchschlägigen Rückholstrecken parallel zu den versetzten Einlagerungsstrecken bei der Streckenlagerung oder Aufwältigen der Überfahrungsstrecken bei der Bohrlochlagerung,
- Kühlung der aufgefahrenen Rückhofelder.

Die weiteren Rückholungsmaßnahmen unterscheiden sich je nach gewählter Einlagerungsvariante. Bei der **Streckenlagerung** von wärmeentwickelnden Abfällen und bestrahlten Brennelementen in POLLUX[®]-Behältern bzw. Transport und Lagerbehältern erfolgen die Maßnahmen:

- Freilegen der Endlagerbehälter,
- Ziehen der Endlagerbehälter auf eine Rückholstrecke,
- Aufnahme und Transport der Endlagerbehälter unter und über Tage.

Die grundsätzliche Machbarkeit einer Rückholung wurde im Ergebnis der Studie /ENG 95/ für eingelagerte POLLUX[®]-Behälter bestätigt. Für die Transport- und Lagerbehälter (z. B. CASTOR[®]-V/19 oder V/52) gilt diese Aussage sinngemäß. Der Zeitbedarf zur Rückholung umfasst ca. 40 Jahre. Vergleichbare Überlegungen wurden auch für die Rückholung von Transport- und Lagerbehältern (Variante B2) angestellt. Weitere Informationen zur Reihenfolge der Rückholung aus den einzelnen Feldesteilen, zur Auslegung der Bewetterung sowie zum zeitlichen Ablaufplan der Rückholung können dem Arbeitspaket-Abschlussbericht /BOL 12/ entnommen werden.

Die im Rahmen des Vorhabens VSG durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass im Gegensatz zur Streckenlagerung bei der **Bohrlochlagerung** von wärmeentwickelnden Abfällen und bestrahlten Brennelementen in Kokillen gegenüber früheren Endlagerkonzepten umfangreiche Änderungen der Einlagerungstechnik sowie der Auslegung der Endlagerbehälter erforderlich sind. Konkrete Einzelheiten zu dem technischen Rückholungskonzept für die Bohrlochlagerung enthält /NSE 12/. Im Einzelnen betreffen die Änderungen:

- **Die Bohrlochkonfiguration:** Die im Vorhaben VSG durchgeführten Untersuchungen zur Rückholbarkeit ergaben, dass eine Rückholung von Kokillen aus unverrohrten Bohrlöchern aufgrund der enormen Mantelreibungskräfte und bei einer Abweichung der Bohrlochachse aus der Lotrechten technisch nicht möglich ist. Infolgedessen wurde im Vorhaben VSG der Einsatz einer Bohrlochverrohrung (Liner) konzipiert. Die rechnerisch ermittelte notwendige Wandstärke der Verrohrung von 50 mm ist gegen die zu erwartenden Gebirgsdrücke ausgelegt. Die Bohrlochverrohrung wird durch Verschweißen oder Verschrauben einzelner Abschnitte in einer Gesamtlänge von 300 m ausgeführt. Sie weist einen Innendurchmesser von 620 mm auf und besitzt am unteren Ende einen halbkugelförmigen verschweißten Verschluss. Im Wechsel mit der Beladung des Bohrlochs mit rückholbaren Kokillen (s. u.) wird der verbleibende Ringspalt zwischen Kokillenaußenwand und der Innenwand der Verrohrung mit einem dauerhaft rieselfähigen Versatzmaterial (z. B. Quarzsand) befüllt, um die thermische Anbindung an die Verrohrung und das anschließende Gebirge zu gewährleisten.
- **Die Form der Kokillen:** Die BSK-Behälter für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren sowie Triple Packs, die jeweils drei Kokillen mit Wiederaufarbeitungsrückständen CSD-V/B/C aufnehmen, wurden hinsichtlich ihrer Rückholbarkeit optimiert. Dies betraf einerseits die Modifikation der Form des Kokillendeckels (Steigung von 20°) um bei Befüllung oder Rückholung das Abfließen des Versatzmaterials zu erleichtern. Andererseits wurde die Kokillenwandung konisch, d. h. von oben nach unten sich leicht verjüngend, ausgeführt um durch die Reduktion der Mantelreibung im Fall der Rückholung das Ziehen der Kokille aus der Verrohrung zu erleichtern.
- **Die technische Ausgestaltung der Einlagerungsmaschine:** Nach dem im Vorhaben VSG entwickelten Rückholungskonzept soll die Rückholung der modifizierten Kokillen durch die erneute Nutzung der bereits für die Beladung der Bohrlöcher verwendeten Einlagerungsmaschine erfolgen. Für den Rückholvorgang soll diese mit weiteren technischen Vorrichtungen ausgestattet werden. Hierzu gehören ein

Manipulator zur Tragpilzreinigung, eine Schwungmasse am Greifer zum Freirütteln der Kokillen aus dem umgebenden Versatzmaterial sowie eine Absaugeinrichtung, um die Kokillen unter Strahlenschutzbedingungen vom Versatzmaterial zu befreien.

Weitere Informationen zur Reihenfolge der Rückholung aus den einzelnen Feldesteilen, zur Auslegung der Bewetterung, den einzelnen Handhabungsschritten sowie zum zeitlichen Ablaufplan der Rückholung sind dem Arbeitspaket-Abschlussbericht /BOL 12/ zu entnehmen.

Fazit:

Aus heutiger Sicht bestehen keine grundlegenden Zweifel an der technischen Umsetzbarkeit der entwickelten Rückholungskonzepte. So kann für die Auffahrung der Rückholstrecken prinzipiell die gleiche Technik wie beim Auffahren des Endlagerbergwerks (z. B. Teilschnittmaschinen) eingesetzt werden. Für die POLLUX[®]-Behälter wurde die Machbarkeit der Rückholung bereits in einer Studie /ENG 95/ untersucht und als prinzipiell gegeben bewertet. Sinngemäß lassen sich diese Ergebnisse auch auf Transport und Lagerbehälter (z. B. CASTOR[®]-V/19 oder V/52) übertragen, wobei hier allerdings die erheblich höhere Masse zu berücksichtigen ist.

Auch im Fall der Rückholung von Kokillen aus 300 m tiefen Bohrlöchern baut das entwickelte Konzept darauf, dass soweit wie möglich vorhandene Technologie eingesetzt wird. Dies betrifft zum einen den Einsatz einer geringfügig modifizierten Einlagerungsmaschine (s. o.), deren Funktionalität unter Übertagebedingungen in einem prototypischen Versuchsstand im niedersächsischen Landesbergen demonstriert wurde /FIL 10/. Zum anderen wurde bei der Konzeption des Abteufens und der Verrohrung 300 m tiefer Bohrlöcher gezeigt, dass die hierfür erforderlichen Technologien in der Bohr- und Öl-Industrie bereits vorhanden sind.

Dennoch ist festzustellen, dass bis zur Genehmigungsreife der im Vorhaben VSG erstmalig entwickelten Rückholungskonzepte noch deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, zum Teil aber auch regulatorischer Klärungsbedarf besteht. Dies betrifft:

- die Definition von verbindlichen Kriterien zur Notwendigkeit einer Rückholung von Abfallbehältern (vgl. Kap. 7.1.2),

- die Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit der im Vorhaben VSG vorgesehenen Behälter im Hinblick auf ihre Rückholbarkeit (Kap. 7.2.2.2),
- die Weiterentwicklung des Konzeptes zur Rückholung von Kokillen aus tiefen verrohrten Bohrlöchern (Kap. 7.2.2.2),
- den Nachweis der generellen Praxistauglichkeit des Rückholungsbetriebes (Kap. 7.2.2.2).

5.1.2.3 Umsetzung der Anforderungen des Sicherheitskonzepts an die konzipierten Endlagerbergwerke

Maßnahme M1: Minimierung des aufzufahrenden Gesamthohlraumvolumens des Endlagerbergwerks, Einsatz gebirgsschonender Verfahren

Maßnahme M1 zielt insgesamt darauf ab, die Durchörterung der geologischen Barriere (Komponente C) in der Umgebung des Endlagerbergwerks ebenso wie mechanische Beanspruchungen im Zusammenhang mit der bergbaulichen Auffahrung des Bergwerks auf das anstehende Salzgestein und damit auf die geologische Barriere so klein wie möglich zu halten. Die Maßnahme leitet sich direkt aus den Sicherheitsanforderungen des BMU (Abschnitt 8.2 in /BMU 10a/) ab. Übergeordnetes Ziel des Sicherheitskonzepts (Kap. 4.1) ist die möglichst weitgehende Schonung der einschlusswirksamen Eigenschaften der geologischen Barriere, die den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen bzw. den Transport von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (vgl. Kap. 5.2.5) so weit wie möglich unterbinden soll.

Bereits bei der Planung der initialen Endlagerkonzepte /BOL 11/ war ein wesentliches Ziel, den unter Tage benötigten Flächen- und Hohlraumbedarf der Grubengebäude durch eine entsprechende Planung von Streckenquerschnitten, Anzahl und Längen der Strecken und sonstiger Grubenbaue auf das Notwendigste zu beschränken.

Im Rahmen der Endlagerauslegung und -optimierung /BOL 12/ wurden die Endlagerkonzepte entsprechend der zwischenzeitlich getroffenen Entscheidung zum Ausstieg aus der Nutzung der Kernenergie und der damit verbundenen Mengenreduzierungen an DWR- und SWR-Brennelementen unter den gleichen Aspekten modifiziert. Ein weiteres Optimierungsergebnis war eine weitere Minimierung der aufzufahrenden Hohlraumvolumina im Bereich des Westflügels (Variante A) unter Nutzung einer erforderli-

chen Mindestpfeilerbreite zwischen Strecken und Kammern, die mindestens der doppelten lichten Weite der breitesten von zwei Strecken entsprechen muss (Abb. 5.2). Hierdurch wurden die Einlagerungsfelder West im Hinblick auf ihren Flächenbedarf deutlich komprimiert.

Dem Gebot der Minimierung des aufzufahrenden Gesamthohlraumvolumens des Endlagerbergwerks entsprechend wurde in /BOL 12/ auch eine einsöhlige Wetterführung favorisiert, damit keine zusätzlichen Hohlräume (z. B. Wetterbohrlöcher zu einer zweiten Wettersohle) aufgefahren werden müssen.

Fazit:

Insgesamt ist festzustellen, dass die Maßnahme M1 bei der Auslegung der Grubengebäude auf konzeptioneller Basis umgesetzt wurde. Die Anzahl, Längen und Querschnitte der Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsbohrlöcher ergeben sich aus der Anzahl und der Abmessungen der Behälter. Die Behälter- und Strecken- bzw. Bohrlochabstände untereinander wurden als Ergebnis der thermischen Auslegungsrechnungen ermittelt. Unter Berücksichtigung der im Vorhaben VSG vorgegebenen Begrenzung der Maximaltemperatur im Steinsalz auf 200 °C handelt es sich um Mindestabstände für die gewählten Behälterkonzepte. Die geplanten Querschnitte der Richtstrecke Nord und der Querschläge von 24 m² orientieren sich an dem Platzbedarf für gleisgebundene Transporttechnik und eines parallelen Fahrwegs. Sie wird weiterhin maßgeblich durch die Querschnitte der zu transportierenden Behälter bestimmt. Im Fall der Bohrlochlagerung gilt dies analog, wobei jedoch aufgrund des Platzbedarfs der Einlagerungsmaschine die Querschnitte der nördlichen Richtstrecke sowie der Überfahrungsstrecken deutlich größer sein müssen. Bei der südlichen Richtstrecke, die einen Fahrweg und ein Transportband aufnehmen muss, reduziert sich in beiden Fällen der Querschnitt auf ca. 23 m².

In künftigen Optimierungsschritten können sicherheitstechnische Zielsetzungen, z. B. eine Minimierung der Temperaturerhöhung im Salzstock oder am Salzspiegel oder für eine noch schnellere Umschließung der Abfälle, von Bedeutung sein. Eine weitere Hohlraumreduktion ist ggf. auch durch eine diesbezügliche zukünftige Optimierung der untertägigen Transporttechnologie (z. B. Gleislosförderung) denkbar.



Abb. 5.6 Beispiel für eine Teilschnittmaschine (Westfalia-Luchs), aus /BOL 11/

Bereits bei der Planung der initialen Endlagerkonzepte /BOL 11/ wurde vorgesehen, dass insbesondere abfallnahe Grubenräume gebirgsschonend hergestellt werden. So sollen Bohr- und Sprengverfahren im Bereich der Einlagerungssohle nicht zum Einsatz kommen. Die Konzeption der Auffahrung der gesamten Einlagerungssohle sieht stattdessen den Einsatz von Teilschnittmaschinen vor, deren mit Meißeln bestückte Schneidköpfe, die sich an beweglichen Auslegern befinden, das feste Salzgestein aus dem Gebirge präzise ausfräsen können (Abb. 5.6).

Im Gegensatz zu Bohr- und Sprengverfahren werden hierdurch mechanische Beanspruchungen der Gebirgskontur infolge von Erschütterungen und Druckbeanspruchungen erheblich reduziert, wodurch die geologische Barriere geschont wird. Der Einsatz von Teilschnittmaschinen wird auch für das Nachschneiden der Konturen bei der Instandhaltung der Endlagerbergwerke (insbesondere der Richtstrecken) vorgesehen.

Fazit:

Der Einsatz von Teilschnittmaschinen im Salzbergbau ist Stand der Technik, diese Verfahren kommen auch bei derzeitigen Endlagerprojekten im Steinsalz zum Einsatz. Insofern wird die Maßnahme M1 als konzeptionell erfüllt und im Sinne einer zukünftigen praktischen Realisierbarkeit als umsetzbar angesehen, ohne dass hierzu signifikanter Entwicklungsbedarf gesehen wird. Der Einsatz schneidender Vortriebstechnologie ist auch bei einer eventuellen Rückholung der wärmeentwickelnden Abfälle vorzusehen.

Maßnahme M4: Einhaltung von Sicherheitsabständen zu den Tagesschächten und den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzsichten

Die Sicherheitsabstände zwischen den Einlagerungsbereichen und den Tagesschächten ergeben sich vorwiegend aus der Notwendigkeit, letztere vor unzulässigen bergbaubedingten und thermo-mechanischen Belastungen infolge der Wärmeentwicklung der Abfälle zu schützen. Die Schächte Gorleben 1 und 2 wurden im, verglichen mit dem Staßfurt-Steinsalz standfesteren, Leine-Steinsalz abgeteuf. Bei der Dimensionierung der Radian der die beiden Schächte umgebenden Sicherheitspfeiler sind im Bergbau zunächst die einschlägigen regulatorischen Anforderungen, z. B. die Allgemeine Bergverordnung /ABU 66/, die einen Sicherheitspfeiler um Schächte von mindestens 50 m vorschreibt, zu beachten. Im Falle eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle ist weiterhin die Zusatzbelastung aus den thermo-mechanischen Einwirkungen der Einlagerungsfelder mit wärmeentwickelnden Abfällen zu berücksichtigen. Die hierfür erforderlichen Abstände können nur mit Hilfe von modellgestützten thermischen Auslegungsrechnungen ermittelt werden.

Als erste Planungsgrundlage für die Entwicklung initialer Endlagerkonzepte im Arbeitspaket 5 /BOL 11/ wurde im Vorhaben VSG ein Abstand von ca. 300 m vom östlichen Schacht 2 zum 1. Einlagerungsfeld für wärmeentwickelnde Abfälle im Ostflügel vorgegeben, der nach /DBE 89/ als sicher ausreichend angesehen wird. Im Zuge der Auslegung und Optimierung der Endlagerkonzepte in Arbeitspaket 6 wurden zum Nachweis des schadlosen Wärmeeintrages in das umgebende Gebirge thermische Auslegungsrechnungen durchgeführt, wobei auch die thermo-mechanischen Einwirkungen auf die beiden Schächte untersucht wurde. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass bei der Einhaltung einer Mindestdistanz von 300 m zwischen dem schachtnächsten Einlagerungsfeld mit wärmeentwickelnden Abfällen (Streckenlagerung: Feld Ost 12; Bohrlochlagerung: Feld Ost 3) und dem östlichen Schacht 2

- im Fall der Streckenlagerung an der Schachtachse Maximaltemperaturen von ca. 43 °C (Teufe 870 m, Abb. 5.7) und
- im Fall der Bohrlochlagerung an der Schachtachse Maximaltemperaturen von ca. 47 °C (Teufe 870 m, Abb. 5.8)

nicht überschritten werden. Dabei liegen die aus der Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle resultierenden Temperaturerhöhungen unterhalb von 10° K /BOL 12/. Sie liegen damit weit unterhalb des maximal zulässigen Temperaturanstiegs in den

Schacht- und Streckenverschlussbauwerken aus Sorel- bzw. Salzbeton, der nach /MÜL 12a/ bei 35 K liegt.

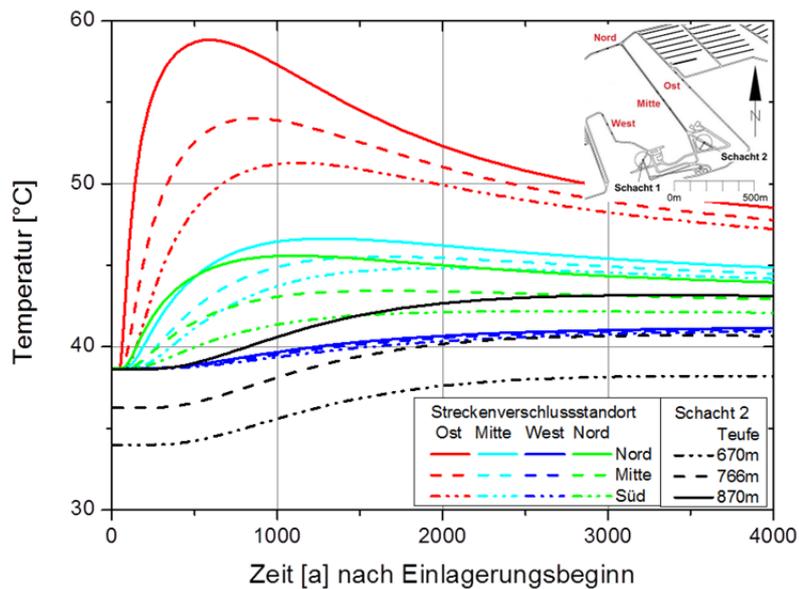


Abb. 5.7 Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den geplanten Verschlussstandorten und entlang der Schachtachse im Fall der Streckenlagerung (Variante B1), aus /BOL 12/

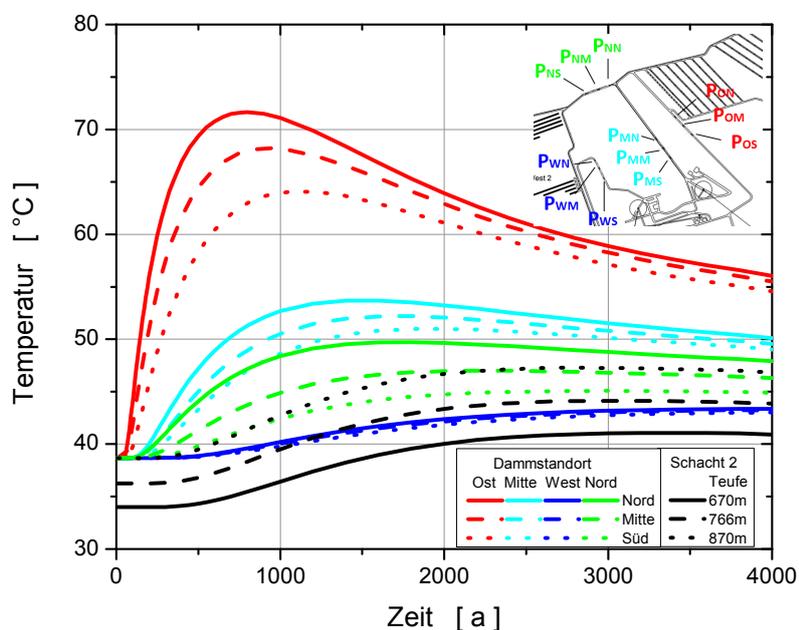


Abb. 5.8 Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Streckenverschlüssen und entlang der Schachtachse im Fall der Bohrlochlagerung (Variante C), aus /BOL 12/

Fazit:

Aufgrund der geringen Maximaltemperaturen bzw. Temperaturdifferenzen ergibt sich, dass bei dem gewählten Mindestabstand von 300 m zwischen wärmeentwickelnden Abfällen und den Schächten aus thermo-mechanischer Sicht keine schädlichen Einwirkungen auf die Schachtausbauten bzw. -fundamente zu besorgen sind, weshalb die erste Teilforderung aus Maßnahme M4 als umgesetzt angesehen wird.

Die zweite Forderung, die sich aus der Maßnahme M4 ergibt, betrifft den Sicherheitsabstand der Endlagerbergwerke zu Schichten außerhalb des Hauptsalzes. Dieser dient der Gewährleistung einer ausreichend mächtigen geologischen Barriere im Hauptsalz zwischen den Einlagerungsbereichen und solchen Schichten, die bezüglich ihrer Eigenschaften heterogener und damit schwieriger zu charakterisieren bzw. bezüglich ihrer Entwicklung schlechter zu prognostizieren sind. Dies betrifft zum Beispiel die an das Hauptsalz angrenzenden Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie potenziellen Fließwegen für Lösungen (z. B. Hauptanhydrit).

Auf Basis der umfangreichen Erfahrungen im Salzbergbau wurde zu Beginn des Vorhabens VSG abgeleitet, dass ein Sicherheitsabstand in der Größenordnung von einigen Zehner Metern ausreicht, um potenziell schädliche Einwirkungen der Schichten außerhalb des Hauptsalzes (z. B. Lösungszutritte) für die einschlusswirksamen Eigenschaften der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche im Nachweiszeitraum ausschließen zu können /MIN 10/. Bei der notwendigerweise iterativen Vorgehensweise im Vorhaben VSG handelt es sich hierbei um einen anfangs angesetzten „initialen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“, bei dem vermutet wurde, dass er die entsprechenden Anforderungen aus /BMU 10a/ erfüllen könnte. Erst nach Abschluss der Integritätsanalysen und der radiologischen Konsequenzenanalyse konnte der Erhalt der Einschlusswirksamkeit (Integrität) dieser Gebirgszone für den Nachweiszeitraum belegt werden und der „endgültige“ einschlusswirksame Gebirgsbereich abgeleitet werden (vgl. im Sinne der Begründung Kap. 4.2.1 und zur Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs Kap. 5.2.5).

Für die Arbeiten im Vorhaben VSG wurde als Planungsgrundlage für die Entwicklung der Endlagerkonzepte ein Mindestabstand von 50 m festgelegt, der an jeder Stelle der konzipierten Endlagerbergwerke einzuhalten ist und dessen Dimensionierung bereits Ungewissheiten bei der Detektion von geologischen Schichtgrenzen, der möglichen

Existenz von Klüften begrenzter Reichweite am Außenrand des Hauptsalzes sowie der Ausdehnung der Auflockerungszone um die Grubenbaue berücksichtigt.

Wie aus Abb. 5.9 und Abb. 5.10 hervorgeht, orientiert sich die Kontur der konzipierten Einlagerungsfelder für die Streckenlagerung (Variante AB1) und die Bohrlochlagerung (Variante AC) an der Lage der Hauptanhydrit- (dunkelgrün) und Carnallit-Vorkommen (rot) im Übergangsbereich zwischen dem älteren und dem jüngeren Steinsalz. Zu diesen Schichten und den beiden die Einlagerungsbereiche begrenzenden Richtstrecken wird ein Abstand von 50 m eingehalten, in dem keinerlei Auffahrungen zulässig sind. Auch im Fall der Variante AB2 (Einlagerung von Transport und Lagerbehältern) sind neben bergbaulichen, maschinen- und sicherheitstechnischen Randbedingungen und Anforderungen die Sicherheitsabstände zu Anhydrit- und Kaliflözen bestimmend für die Größe eines Einlagerungsfeldes.

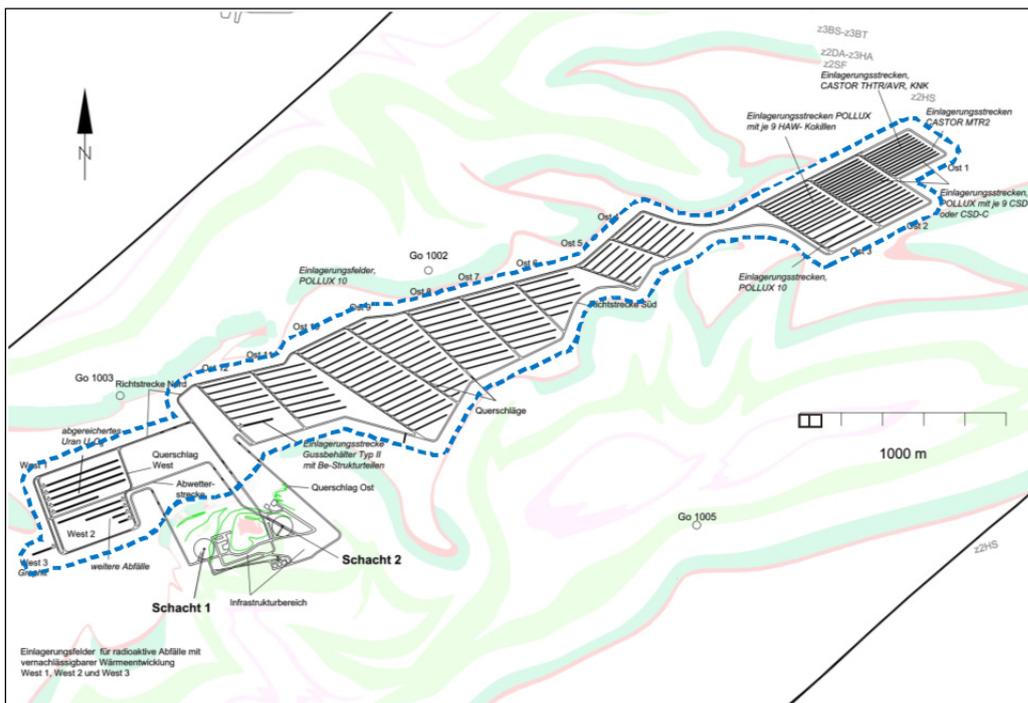


Abb. 5.9 Planerische Umsetzung des Sicherheitsabstandes (blau gestrichelte Linie) im Fall der Einlagerungsvariante AB1 (Streckenlagerung)

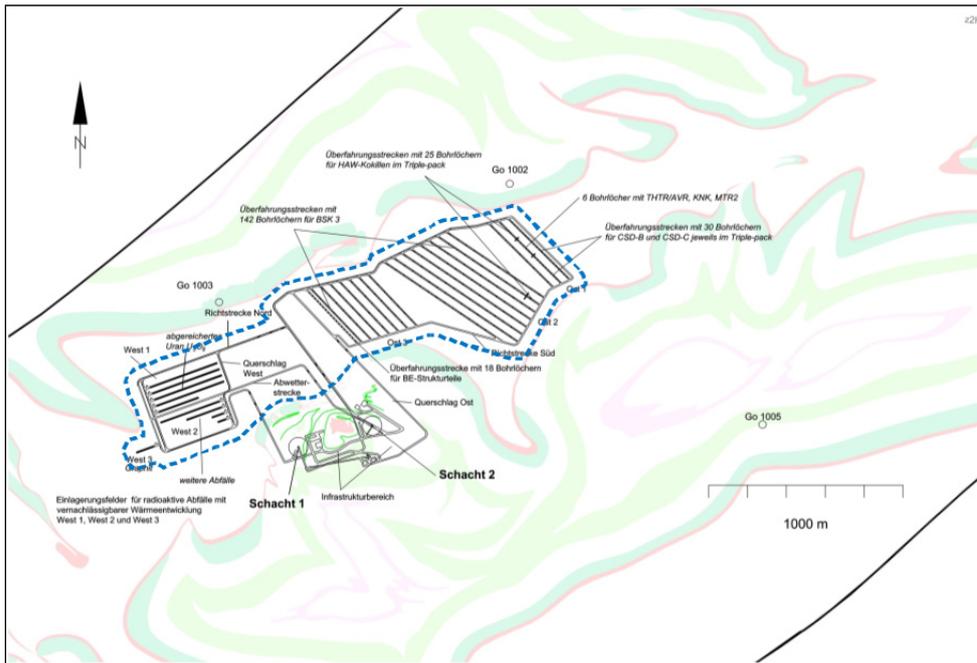


Abb. 5.10 Planerische Umsetzung des Sicherheitsabstandes (blau gestrichelte Linie) im Fall der Einlagerungsvariante AC (Bohrlochlagerung)

Auch die zweite Forderung der Maßnahme M4 wurde im Vorhaben VSG bei der Planung der Endlagerbergwerke konzeptionell vollständig umgesetzt. Bezüglich der praktischen Umsetzbarkeit der Sicherheitsabstände am Standort Gorleben steht dies unter dem Vorbehalt, dass die planerischen Grundlagen für die Entwicklung der Endlagerkonzepte dem tatsächlichen geologischen Internaufbau der Salzstruktur Gorleben entsprechen. Die Planungsbasis bildete eine aus Erkundungsergebnissen für den Erkundungsbereich EB 1 (Horizontalschnitte der 840 m und 880 m Sohle) und Prognosemodellen von 1989 für alle anderen Erkundungsbereiche /BFS 90/ abgeleitete geologische Karte für die Erkundungssohle in 840 m Teufe. Bei der Endlagerplanung wurde diese auch für den Einlagerungshorizont (870 m Teufe) zugrunde gelegt, weil es zwar keine vollständigen Erkundungsergebnisse für exakt diesen Horizont gibt, jedoch angenommen werden kann (durch die sich vertikal wenig ändernden Eigenschaften infolge des Salzstockaufstiegs), dass 30 m unterhalb der Erkundungssohle keine wesentlich anderen geologischen Strukturen bestehen /BOL 11/. Dies bedeutet, dass die für die Einpassung der Endlagerkonzepte verwendete Kartengrundlage zum großen Teil auf geowissenschaftlichen Interpretationen der übertägigen Erkundungsergebnisse zum Salzstock Gorleben beruht. Insofern kann eine abschließende Planung der Endlagerkonzepte im Hinblick auf die zuverlässige Einhaltung realer Sicherheitsabstände erst dann erfolgen, wenn die zur Verwirklichung der Strecken- bzw. Bohrloch-

lagerung erforderlichen Areale in ihrer Gesamtheit auch untertägig mit ausreichender Zuverlässigkeit erkundet wurden.

Maßnahme M10: Einlagerungsstrategie: Minimierung des gleichzeitig aufgefahrenen Hohlraumvolumens

Maßnahme M10 zielt darauf ab, während des Einlagerungsbetriebs unnötig lange Standzeiten offener Hohlräume zu vermeiden und damit die Auswirkungen von Prozessen, die zur Auflockerung der geologischen Barriere nahe der Hohlraumkontur führen, zu minimieren. Ein weiteres Ziel ist, dass die Kompaktion des Salzgrusversatzes bereits zu einem frühen Stadium ablaufen soll, damit der Einschluss der radioaktiven Abfälle zu einem möglichst frühen Zeitpunkt erreicht werden kann. Insofern wird gefordert, dass maximal nur das aus betrieblicher Sicht zur Abfalleinlagerung gleichzeitig erforderliche Hohlraumvolumen aufgefahren wird und eine Einlagerungssektion (Strecke/Bohrloch) nach vollständiger Beladung umgehend verfüllt und mit geeigneten geotechnischen Maßnahmen gegen den restlichen Grubenraum verschlossen wird.

Beide Forderungen wurden bei der Konzeption der Endlagerkonzepte folgendermaßen umgesetzt:

Die Hohlräumeauffahrung, die Beladung und die Verfüllung erfolgt sequenziell strecken- bzw. bohrlochweise, d. h. es wird eine Einlagerungssektion jeweils einzeln aufgefahren, verfüllt und verschlossen, eine gleichzeitige Beladung mehrerer Einlagerungssektionen findet nicht statt. Bei der Planung des Einlagerungsregimes wurde davon ausgegangen, dass pro Woche (bei fünf Arbeitsschichten) rechnerisch 1,8 POLLUX[®]-10-Behälter eingelagert werden können /BOL 11/. Damit beträgt die offene Standzeit einer Strecke, die mit maximal 28 Behältern beladen wird, knapp 16 Wochen, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Strecken im Rückbau zwar umgehend versetzt werden, zur Entwicklung eines ausreichenden Stützdrucks nach Aufkriechen des Gebirges auf den Salzgrusversatz aber einige Jahre vergehen können. Bei der Bohrlochlagerung können rechnerisch in einer Woche ca. 5,8 Kokillen in ein Bohrloch eingelagert werden, die erforderliche Zeit für die Beladung eines gesamten Bohrlochs mit max. 50 Kokillen beträgt damit etwa 9 Wochen. Aufgrund der vorliegenden Erfahrungen im Salzbergbau wird sich dabei im Umfeld der Einlagerungshohlräume nur eine sehr begrenzte Auflockerungszone ausbilden, die keine Relevanz für die Integrität der Steinsalzbarriere besitzt.

Die Einlagerung erfolgt vom schachtentferntesten Einlagerungsfeld aus im Rückbau in Richtung der Schächte, d. h. nach Westen. Dies bedeutet im Fall der Streckenlagerung (Variante B1), dass zunächst die Strecken des östlichsten Feldes 1 mit Behältern beladen und nach Beladung umgehend mit Salzgrusversatz verfüllt werden. Auch die nicht mehr benötigten östlichsten Abschnitte der beiden Richtstrecken werden mit Salzgrusversatz versetzt. Hiernach wird mit der Auffahrung eines neuen Querschlagens mit der Beladung des Feldes Ost 2 begonnen. Da die Strecken nach ihrer Verfüllung nicht mehr zugänglich sind und zusätzlich das Gebot der räumlichen Trennung der verschiedenen Abfalltypen besteht (s. Maßnahme M11), beginnt die Einlagerung mit den bereits bei Einlagerungsbeginn komplett vorliegenden Abfallkategorien im Bereich der wärmeentwickelnden Abfälle /BOL 11/. Entsprechendes gilt für das Einlagerungsregime im Fall der Bohrlochlagerung. Hier werden zunächst die Bohrlöcher des Feldes Ost 1 befüllt und die Deckel der Bohrlochliner verschlossen. Die nicht mehr benötigten östlichsten Abschnitte der beiden Richtstrecken werden mit Salzgrus versetzt. Hiernach wird mit der Auffahrung einer neuen Überfahrungsstrecke mit der Beladung des nächsten Feldes (Ost 2) begonnen. Die infrastrukturell nicht mehr benötigten östlichen Abschnitte der beiden Richtstrecken werden mit Salzgrus versetzt.

Die längsten offenen Standzeiten ergeben sich demnach für die Richtstreckenabschnitte und Querschläge im schachtnahen Bereich zwischen den Bergwerksflügeln sowie für die Schächte und den Infrastrukturbereich. Diese müssen aus infrastrukturellen Gründen (Transport, Bewetterung etc.) von Betriebsbeginn bis zum Abschluss der jeweiligen Verschluss- und Verfüllmaßnahmen in den beiden Endlagerflügeln über einen Zeitraum von ca. 40 Jahren /BOL 11/ offen gehalten werden. Für die dafür notwendige Gewährleistung der Firstsicherheit wird in /DBE 98/ allerdings davon ausgegangen, dass nur ca. 10 % der Firstflächen der lange offen zu haltenden Richtstrecken, Querschläge und Nischen im Infrastrukturbereich geankert und eventuell mit Netzen gegen Steinfall gesichert werden müssen.

Fazit:

Aus den oben genannten Gründen wird festgestellt, dass die geforderte Maßnahme M10 konzeptionell insgesamt umgesetzt und auch in der Realität betriebstechnisch mit heutiger Bergbautechnologie umsetzbar ist. Es ist anzunehmen, dass durch die Weiterentwicklung der Transport- und Einlagerungstechnologie in Zukunft noch kürzere Einlagerungszeiten erreichbar sind.

Maßnahme M11: Räumliche Trennung von Abfällen mit unterschiedlichen Eigenschaften

Ziel der Maßnahme ist, dass sicherheitsrelevante chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen Abfällen verschiedener Eigenschaften weitestgehend vermieden werden und die Prognose des Freisetzungsverhaltens (Quellterm) erleichtert wird. Die Forderung betrifft insbesondere Abfälle mit unterschiedlichen Gasbildungseigenschaften oder chemischen Eigenschaften, die sich auf das geochemische Milieu in Abfallnähe und damit auf die Radionuklidlöslichkeit auswirken können. Im Besonderen wird im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG die getrennte Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen (einschließlich der Brennelement-Strukturteile) und der im Vorhaben VSG optional zu betrachtenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in separaten Einlagerungsbereichen gefordert. Diese sind durch geotechnische Bauwerke hydraulisch voneinander zu trennen. Hierdurch soll eine hinsichtlich des sicheren Einschlusses nachteilige Beeinflussung der wärmeentwickelnden Abfälle durch die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (z. B. infolge signifikanter Gasentwicklung) reduziert werden.

Die räumliche Trennung der verschiedenen Abfallarten wurde in den im Vorhaben VSG entwickelten Einlagerungskonzepten folgendermaßen umgesetzt:

Bei der Kombination der Einlagerungsvarianten zur Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und Brennelement-Strukturteile (Varianten B1, B2, C) mit der optionalen Variante A (Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung) erfolgt, wie in Kapitel 5.1.2.1 beschrieben, durch eine räumliche Trennung der Abfallarten, indem die Einlagerung der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (Uran-Tails, graphithaltige Abfälle sowie sonstige Mischabfälle) in einem Endlagerflügel südwestlich der Schächte (Westflügel) und die der wärmeentwickelnden Abfälle (einschließlich der Brennelement-Strukturteile und der CSD-B/CSD-C-Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) nordöstlich der Schächte (Ostflügel) vorgesehen ist. Dabei handelt es sich im Grunde um zwei eigenständige Endlager, die je eine eigene Zugangsstrecke (Querschlag Ost bzw. Querschlag West) zum Infrastrukturbereich besitzen und sich eine Zugangsstrecke (Querschlag Mitte) teilen (vgl. Abb. 5.1). In der Richtstrecke Nord, die beide Endlagerflügel verbindet wird zur Trennung der wärmeentwickelnden Abfälle von den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen eine separate Streckenabdichtung vorgesehen.

Auch innerhalb des West- und des Ostflügels ist jeweils eine Separierung der verschiedenen Abfallarten planerisch vorgesehen:

Bei der optionalen Einlagerungsvariante für **Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung** (Variante A) im Westflügel sieht die Einlagerungskonzeption die getrennte Einlagerung der drei Abfallarten Uran-Tails, graphithaltige Abfälle und sonstige Mischabfälle in jeweils einem Feldesteil vor:

- West 1 für Uranoxid (U_3O_8),
- West 2 für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Mischabfälle und
- West 3 für graphithaltige Abfälle.

Dabei erfolgt die Trennung der Feldesteile West 1, West 2 und West 3 untereinander durch jeweils eigene Einlagerungsstrecken, die durch Verschlussbauwerke (Dichtpfropfen) von den beiden Richtstrecken (Nord, Süd) getrennt sind (s. Abb. 5.2).

Beim **Streckenlagerungskonzept** (Variante B1) sind insgesamt 12 Feldesteile vorgesehen, dabei wurde in erster Linie der Wärmeeintrag der Abfälle und in zweiter Linie die Abfallartentrennung berücksichtigt. Das Einlagerungskonzept sieht hier folgende Beladung vor:

- Ost 1 für Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B/C),
- Ost 2 für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V/B/C),
- Ost 3 für Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V) und bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren,
- Ost 4 bis 11 für bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren und
- Ost 12 für bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren und Brennelement-Strukturteile.

In den Einlagerungsfeldern Ost 1, Ost 3 und Ost 12, die für verschiedene Abfallarten vorgesehen sind, soll eine Strecke jeweils nur mit einer Abfallart beladen werden. Durch diese Trennung werden einerseits die wärmeentwickelnden Behälter mit Brennelementen aus Leistungsreaktoren (Ost 4 bis 12), die aufgrund des erhöhten Wärmeeintrags eine schnelle Kompaktion des Salzgrusversatzes bewirken, schachtnäher und

die etwas kühleren Abfallgebände der Wiederaufarbeitung CSD-V (Ost 3 bis 2), CSD-C, CSD-B (Ost 2 bis 1) und die Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren (Ost1) schachtferner eingelagert.

Im **Bohrlochlagerungskonzept** (Variante C) erfolgt die Trennung der Abfall- und Behältertypen, indem die drei Feldesteile folgendermaßen beladen werden:

- Feld Ost 1 für Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V/B/C),
- Feld Ost 2 für Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren sowie Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V/B/C) und bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren und
- Feld Ost 3 für bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren und Brennelement-Strukturteile.

Die Trennung der verschiedenen Abfallarten erfolgt planerisch so, dass ein Bohrloch jeweils mit einheitlichen Abfall- und Behältertypen beschickt wird. D. h., dass jeweils ein Bohrloch komplett mit Triple-Pack CSD-B und -C, oder Triple-Pack-HAW-Kokillen oder THTR/AVR-, KNK und MTR 2-Kokillen oder BSK-R oder BSK-R mit Brennelement-Strukturteilen beladen wird und keine Mischungen dieser Abfalltypen innerhalb eines Bohrlochs erfolgt.

Fazit:

Zusammenfassend ist für die dem Vorhaben VSG zugrunde gelegten Behälterkonzepte und die entwickelten Einlagerungsvarianten festzustellen, dass das Gebot der Trennung von Abfällen mit unterschiedlichen Eigenschaften konzeptionell umgesetzt wurde. Auf diese Weise wurden im Hinblick auf weitere Aspekte, wie z. B. Gasflüsse in den versetzten Strecken oder die Bestimmung der Radionuklidfreisetzung (Quellterme) aus den Abfällen, Endlagerkonzepte entwickelt, die verglichen mit solchen, bei denen keine strikte Trennung der Abfallarten erfolgt, in ihrem sicherheitsrelevanten Verhalten deutlich besser zu prognostizieren sind, was sich positiv auf die Belastbarkeit (Robustheit) sicherheitsgerichteter Aussagen auswirkt. Allerdings konnte auch bei den konzipierten Endlagerkonzepten eine Interaktion zwischen den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen im Westflügel und den wärmeentwickelnden Abfällen im Ostflügel nicht völlig unterbunden werden. So wurde bei den Integritätsanalysen zur geologischen

Barriere /KOC 12/ beispielsweise für das Streckenlagerungskonzept (Einlagerungsvariante AB1) festgestellt, dass in den ersten zehn Jahren nach Verschluss des Endlagers Gas vom Ost- in den Westflügel über den Streckenverschluss der nördlichen Richtstrecke, die beide Bergwerksflügel miteinander verbindet, transportiert wird. Danach stellt sich ein erhöhter Gasdruck auf der westlichen Seite des nördlichen Streckenverschlusses ein. Dementsprechend kehrt sich die Strömungsrichtung des Gases um und verläuft nun vom Westflügel in den Ostflügel (vgl. Kap. 5.2.3). Um diese Ausgleichsströmungen zu reduzieren, wird im Sinne einer Vereinfachung des Prozessverhaltens der Endlagersysteme empfohlen, zukünftig eine direkte Verbindung zwischen beiden Endlagerflügeln zu vermeiden und auf den Abschnitt der nördlichen Richtstrecke, die beide Flügel verbindet, zu verzichten (s. Kap. 7.2.1).

Maßnahme M12: Einhaltung von Sicherheitsabständen zu Salzbereichen mit nennenswertem Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale in Verbindung mit

Maßnahme M15: Begrenzung der Temperaturen im Hauptsalz

Intention der Maßnahmen M12 und M15 ist es, eine thermische Zersetzung von temperaturempfindlichen kristallwasserhaltigen Salzmineralen unter den gegebenen Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und lokale Temperatur) auszuschließen. Zu den Salzgesteinen mit kristallwasserhaltigen Salzmineralen in der Nähe der Einlagerungsbereiche zählt der Carnallit im Kaliflöz Staßfurt (z2SF), welcher zusammen mit dem Hangendsalz (z2HG) und den Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE) an das Hauptsalz (z2HS) angrenzt (vgl. Anhang A 3.5).

Der thermische Schutz kristallwasserhaltiger Salzminerale soll durch die Kombination zweier Maßnahmen erreicht werden: Durch das Einhalten ausreichender Sicherheitsabstände zu Salzgesteinen mit kristallwasserhaltigen Salzmineralen (z. B. Carnallit, $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) soll in Verbindung mit einer für die Endlagerauslegung vorgegebenen Maximaltemperatur an den Grenzflächen des Salzes zu den Behältern von 200 °C (Maßnahme M15) sichergestellt werden, dass derartige Salzbereiche stabile und gut prognostizierbare Eigenschaften behalten und die an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich angrenzenden Salzbereiche (z. B. durch Kristallwasserfreisetzung) keine Eigenschaften annehmen, die zur Beeinträchtigung der Einschlusseigenschaften der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche führen können /MÖN 12/.

Die auslegungsbestimmende Temperaturgrenze von 200 °C soll weiterhin sicherstellen, dass negative Veränderungen der Abfälle (verringerte Stabilität der Brennstäbe bzw. Umwandlung der Glasmatrix bei den CSD-V) vermieden werden und die thermische Stabilität des Polyhalits²², das u. a. im Hangendsalz (z2HG) vorkommt, ein ebenfalls kristallwasserhaltiges Salzmineral, sicher gewährleistet ist /MÖN 12/.

Für die Arbeiten im Vorhaben VSG wurde als Planungsgrundlage für die Konzeption der Endlagerbergwerke ein genereller Mindestabstand von 50 m zu lithologischen Einheiten außerhalb des Hauptsalzes und damit zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen (z. B. Hauptanhydrit) festgelegt, der an jeder Stelle der konzipierten Endlagerbergwerke einzuhalten ist (vgl. Maßnahme M4).

Insofern bestand die Aufgabe bei der thermischen Auslegung der Endlagerkonzepte einerseits darin, nach Festsetzen einer Mindestabklingzeit für die wärmeentwickelnden Abfälle²³ (vgl. Kap. 5.1.1.2) durch eine entsprechende Wahl der Abstände zwischen den Einlagerungsstrecken bzw. der Einlagerungsbohrlöchern, der Abstände zwischen den Behältern innerhalb einer Einlagerungsstrecke bzw. innerhalb eines Einlagerungsbohrloches und der Beladungsdichte eines Behälters rechnerisch nachzuweisen, dass die auslegungsbestimmende Maximaltemperatur von 200 °C an den Grenzflächen des Salzes zu den Behältern eingehalten wird. Andererseits war durch die thermische Auslegung der konzipierten Endlagerkonzepte sicherzustellen, dass (bei dem vorgegebenen Sicherheitsabstand von 50 m) die Temperaturen im Kaliflöz Staßfurt unterhalb des Schmelzpunktes von Carnallit bleiben. Dieser liegt unter dem in 870 m Tiefe vorhandenen Gebirgsdruck bei 167,5 °C /POP 93/.²⁴

Methodik und Ergebnisse der thermischen Auslegungsrechnungen für die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle im Ostflügel sind ausführlich in /BOL 12/ dokumentiert.

²² $K_2Ca_2Mg[SO_4]_4 \cdot 2H_2O$, Beginn der Kristallwasserfreisetzung bei ca. 230 °C

²³ Für die Auslegung des Grubengebäudes bei gleichzeitigem Anspruch möglichst geringen Flächenbedarfs bedeutet dies, dass bei der zugrunde gelegten Konditionierung der ausgedienten Brennelemente für die Streckenlagerung (Variante B1) und die Bohrlochlagerung (Variante C) eine Zwischenlagerzeit von ca. 50 Jahren anzusetzen ist /BOL 12/.

²⁴ Im dichten Salzgebirge wirkt ein „Selbststabilisierungsmechanismus“, der infolge des Anstiegs des Wasserdampfpartialdruckes eine signifikante Carnallitzerersetzung verhindert, so dass der Carnallit bis zum Schmelzpunkt von 167,5 °C stabil ist /POP 93/. Nur unter Dilatanzbedingungen (Auflockerung mit Absenkung des Wasserdampfpartialdruckes), d. h. an den Stellen, wo der Carnallit durch eine Strecke bzw. Bohrloch direkt aufgeschlossen ist, würde es bei Temperaturen über 80 °C zu einer weitergehenden Carnallitzerersetzung kommen. Diese Bedingungen sind im vorliegenden Fall nicht gegeben.

Die Berechnungen wurden mit den Programmen FLAC3D und LinSour in mehreren Skalenschritten durchgeführt; angefangen mit der Modellierung eines Einzelbehälters über die Betrachtung von Einlagerungsfeldern mit sehr großer räumlicher Ausdehnung, hin zu einem Einlagerungsfeld in tatsächlich ausgelegter Geometrie.

Abb. 5.11 zeigt Ergebnisse der thermischen Berechnungen zur Variante B1 (Streckenlagerung). Die stärksten Temperaturerhöhungen treten im zentralen Bereich des Ostflügels (Felder Ost 7 und Ost 10, Abb. 5.11 links) auf, da hier die Felder mit den meisten Strecken liegen und der Wärmestrom folglich am höchsten ist. Aus Abb. 5.11 und weiteren in /BOL 12/ dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass die Temperaturgrenze von 200 °C zu jedem Zeitpunkt an jedem Punkt im Endlagerbergwerk für das Streckenlagerungskonzept eingehalten wird. Das Temperaturverhalten für Bewertungspunkte im Sicherheitsabstand von 50 m zur Umfahrung (das entspricht ca. 75 m zum eingelagerten Abfall in der randnächsten Strecke) ist im rechten Teil der Abb. 5.11 dargestellt. Als Maximaltemperatur ergibt sich ein Wert von ca. 78 °C, die deutlich unter dem Schmelzpunkt von Carnallit von 167,5 °C unter den gegebenen Gebirgsbedingungen liegt.

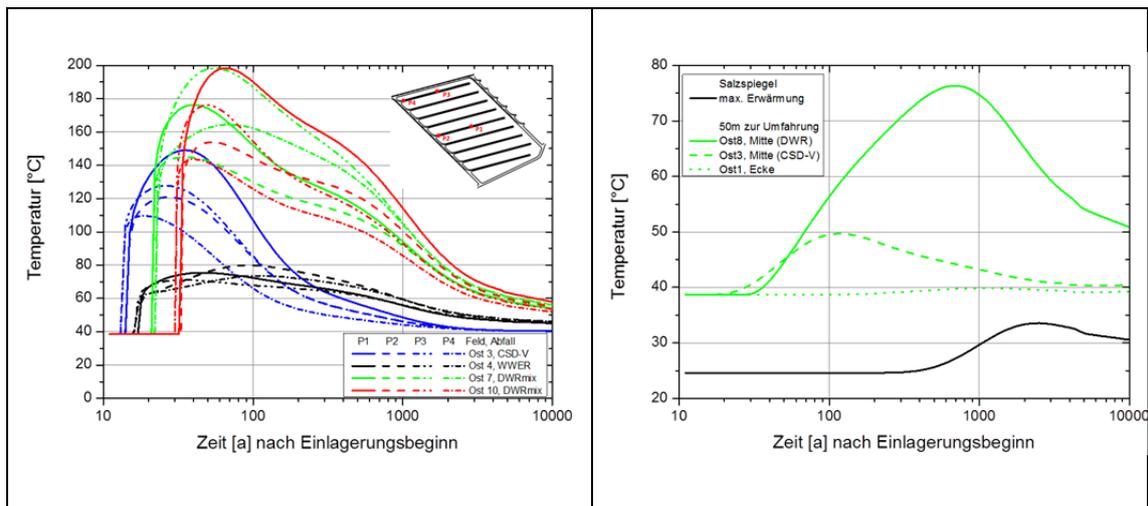


Abb. 5.11 Variante B1 (Streckenlagerung): Zeitlicher Temperaturverlauf für markante Punkte innerhalb der Einlagerungsfelder (links) und im Abstand von 50 m zur Umfahrung (rechts), aus /BOL 12/

In gleicher Weise wurden für das Konzept der Bohrlochlagerung (Variante C) die Abstände zwischen den Einlagerungsbohrlöchern in den Überfahrungsstrecken und zwischen den Überfahrungsstrecken durch thermische Berechnungen ermittelt. In Abb. 5.12 sind Ergebnisse der thermischen Berechnungen zur Variante C dargestellt. Auch hier zeigen die Temperaturverläufe in Verbindung mit weiteren, in /BOL 12/ dargestell-

ten Ergebnissen, dass die auslegungsbestimmende Temperaturgrenze von 200 °C zu jedem Zeitpunkt an jedem Punkt im konzipierten Endlagerbergwerk eingehalten wird. Die thermische Belastung des Kaliflözes steigt allerdings bis auf ca. 110 °C an, liegt dabei jedoch ebenfalls noch deutlich unter dem Schmelzpunkt von Carnallit von 167,5 °C unter den gegebenen Gebirgsbedingungen.

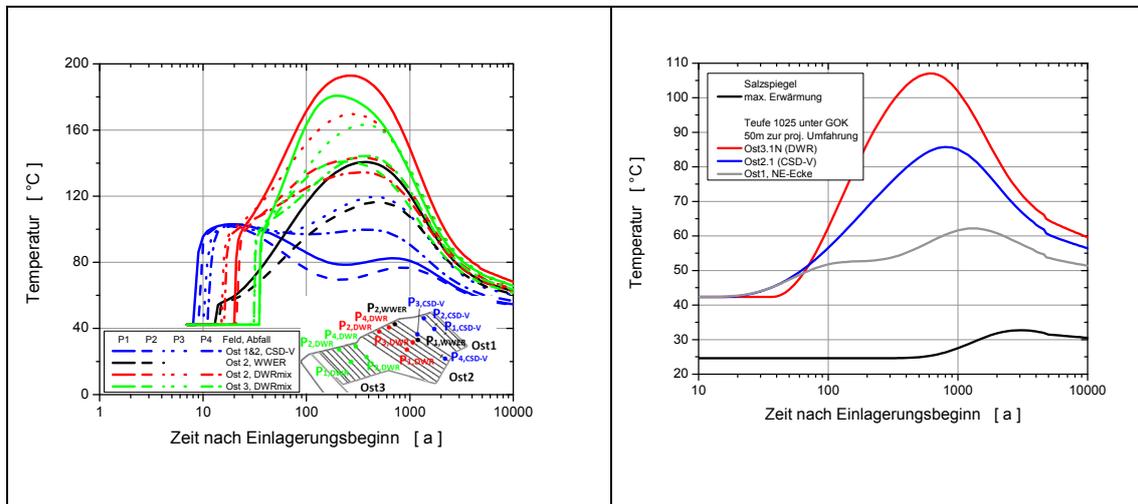


Abb. 5.12 Variante C (Bohrlochlagerung): Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche ausgewählter Verrohrungen der Einlagerungsfelder (links) und im Abstand von 50 m zur Umfahrung (rechts) jeweils in einer Teufe von 1.025 m, aus /BOL 12/

Für die Konzeption der Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern in waagerechten Streckenstummeln (Variante B2) wurden im Vorhaben VSG keine eigenen thermischen Analysen durchgeführt. Die erforderliche Feldgröße und die entsprechenden Behälter- und Streckenabstände wurden stattdessen auf der Grundlage thermo-mechanischer Berechnungen abgeschätzt, die für die Konzeptstudie DIREGT vorgenommen wurden /FIL 07/. Diese Abschätzung basiert auf der Einlagerung von CASTOR® V/19 in ca. 12 m langen horizontalen Bohrlöchern. Die in der Studie DIREGT angesetzte Wärmeleistung von Behältern für bestrahlte Brennelemente liegt in dem für thermische Auslegungen wesentlichen Zeitraum der ersten 100 Jahre höher als diejenige, die sich mit den entsprechenden innerhalb des Vorhabens VSG berücksichtigten Brennelementen ergibt /BOL 12/. Ähnliches gilt für Transport- und Lagerbehälter, die mit Wiederaufarbeitungsabfällen beladen sind. Bei ansonsten unveränderter Konfiguration liegt es nahe, dass die im Vorhaben VSG angesetzten Behälterbeladungen zu einer geringeren thermischen Leistung und damit zu einer geringeren Erwärmung des Gebirges führen. Aufgrund von nichtlinearen Parameterbeziehungen können

belastbare Aussagen hierzu allerdings erst aus zukünftigen Rechnungen abgeleitet werden, denen die thermischen Randbedingungen der im Vorhaben VSG entwickelten Endlager- und Behälterkonzepte zugrunde liegen.

Fazit:

Insgesamt ist daher festzustellen, dass die Forderungen, die sich aus den Maßnahmen M12 und M15 ableiten, im Vorhaben VSG auf konzeptioneller Basis für den Fall der Strecken- und der Bohrlochlagerung (Varianten B1 und C) umgesetzt wurden. Auf der Grundlage vergleichender Betrachtungen ist dies auch für die Einlagerung von Transport- und Lagerbehälter anzunehmen (Variante B2). Die bei der thermischen Auslegung der Endlagerkonzepte eingesetzten Methoden und Programme entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Bezüglich der praktischen Umsetzbarkeit der Sicherheitsabstände am Standort Gorleben steht die oben angeführte Einschätzung unter dem gleichen Vorbehalt wie bei Maßnahme M4, nämlich dass die planerischen Grundlagen für die Entwicklung der Endlagerkonzepte dem tatsächlichen geologischen Internbau der Salzstruktur Gorleben entsprechen. Für den Fall der Variante A sind die Maßnahmen unerheblich, da es sich hier um vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle handelt.

5.1.3 Geologische Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche sowie weiteres Wirtsgestein und Deckgebirge

Die wesentlichen Ergebnisse der Charakterisierung der Salzstruktur Gorleben und der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden im Anhang A dargestellt. Insofern wird in diesem Kapitel auf eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse verzichtet und direkt auf die Frage eingegangen, inwieweit die an die geologische Barriere gestellten Forderungen des Sicherheitskonzepts des Vorhabens VSG erfüllt werden. Die Maßnahmen M13 (große Teufenlage der Einlagerungsbereiche) und M14 (praktisch abgeschlossene Halokinese, tektonisch ruhiges Subsidenzgebiet) beziehen sich gleichermaßen auf die geologische Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche sowie das weitere Wirtsgestein und das Deckgebirge (vgl. Tab. 5.1). Daher wird die Umsetzung dieser Maßnahmen gemeinsam für beide Komponenten in diesem Kapitel diskutiert.

Maßnahme M2: Auffahrung der Einlagerungsbereiche in einem gut charakterisierbaren Salzbereich mit homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften

Im Hinblick auf die Anforderungen an die Eigenschaften der geologische Barriere in der Umgebung des Endlagerbergwerks, wie Dichtigkeit, mineralogische Homogenität, Abwesenheit von durchgehenden Klüften und ausreichendes Volumen, wurde im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG vorgegeben, die Einlagerungsbereiche im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) des Salzstocks Gorleben vorzusehen.

Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge besteht als Steinsalz zu ca. 90 bis 95 % aus Halit (NaCl), der Rest wird von Anhydritlinien und -flocken eingenommen, die die ehemalige Schichtung nachzeichnen. Aufgrund von Gefügemerkmalen wird es vom Liegenden zum Hangenden in das Knäuelsalz (z2HS1), das Streifensalz (z2HS2) und das Kristallbrockensalz (z2HS3) untergliedert. Am Standort Gorleben stellt das Hauptsalz mit einer primären Mächtigkeit von ca. 700 bis 800 m die mächtigste Formation der Staßfurt-Folge dar (Anhang A.3).

Die BGR kommt in ihren Untersuchungen u. a. zu folgendem Ergebnis: Zur Abschätzung der Verbreitung des Hauptsalzes als potenzieller Einlagerungshorizont wurden im Erkundungsbereich EB 1 die Ausstriche auf der 840-m-Sohle und 150 m unterhalb bestimmt /BOR 01/. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen zur Verbreitung des Hauptsalzes bestätigten die früheren Annahmen, dass das Hauptsalz für die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle sowohl im Hinblick auf seine Eigenschaften als auch seine Verbreitung aus heutiger Sicht für die Aufnahme der Einlagerungsbereiche geeignet erscheint. Die Hauptsalzvorkommen müssen in Lage und Ausdehnung durch zukünftige Erkundungen genauer abgegrenzt werden, damit exakte Volumenangaben möglich sind /BOR 04/ und die grundlegenden Annahmen des Vorhabens VSG bestätigt werden können.

Hinsichtlich der Frage, wie wahrscheinlich das Auftreten von offenen Klüften im Bereich des Hauptsalzes ist, wurden die bisherigen Erkundungsergebnisse, ergänzt durch geomechanische Überlegungen in einem Memorandum für das Vorhaben VSG in /WEB 13/ zusammengefasst. Dabei wurden folgende Feststellungen getroffen:

- Das Auftreten von offenen Klüften im Hauptsalz beschränkt sich auf einen Bereich am Top des Salzstockes, bis maximal 160 m unterhalb des Salzspiegels. Hier treten vereinzelt offene Klüfte mit einer bankrechten Länge von maximal 4 m im Bereich schmaler isoklinaler Sättel nahe der Grenze zwischen Staßfurt- und Leine-

Folge auf. In diesen Bereichen spießt das doppelt gelagerte Kaliflöz in die Schichten der Staßfurt-Folge ein.

- Für die Genese dieser Klüfte kommt nach /WEB 13/ folgende Ursache in Betracht: Nach Absenkung der Hauptnormalspannung des Gebirges unterhalb des dort herrschenden Fluiddrucks im Bereich abgeschlossener Lösungseinschlüsse kam es in diesen Zonen zur Klüftbildung infolge der Verletzung des Fluiddruckkriteriums. Bei den Lösungsvorkommen wird vermutet, dass es sich um Relikte aus der Frühzeit der Salzlagerstättenbildung handelt, wobei ursprünglich große Lösungsmengen im flach abgelagerten Steinsalz durch die zunehmende Sedimentauflast in hangende Schichten abgepresst wurden.
- Sofern es sich bei den angetroffenen Hohlformen um solche Relikte handelt, müsste die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens zum ursprünglich Hangenden hin zunehmen, also bei den jetzigen Lagerungsverhältnissen ein Auftreten innerhalb der Staßfurt-Folge eher im Hangendsalz und den angrenzenden äußeren Bereichen des Kristallbrockensalzes erwartet werden, nicht jedoch in den Hauptsalzpartien im Kernbereich des Salzstocks.
- Eine solche Verteilung von Lösungsvorkommen ist auch deshalb zu erwarten, weil das im Satteln anstehende Streifen- und Knäuelsalz durch die Halokinese über große Distanzen transportiert wurde und dabei das Auspressen der enthaltenen Lösung zusätzlich unterstützt wurde, während in den halokinetisch weniger bewegten und nicht bzw. gering brekziierten Abfolgen wie dem Hangendsalz, den kieseritischen Übergangsschichten und den obersten Partien des Kristallbrockensalzes dieser zusätzliche Auspressmechanismus weniger zum Tragen kam, so dass Restlösungseinschlüsse dort eher erhalten sein können. Hierfür sprechen die bisherigen Erkundungsergebnisse, nach denen in salzspiegelfernen Zonen des Salzstocks Klüftvorkommen und z. T. auch Lösungsvorkommen auf Bereiche, wie Kristallbrockensalz (z2HS3), Hangendsalz (z2HG), Hauptanhydrit (z3HA), teilweise auf Basissalz/Unteres Liniensalz (z3BS/z3LSU), Orangesalz (z3OS), Anhydritmittelsalz (z3AM), Tonmittelsalz (z3TM) und Tonbrockensalz (z4TS) beschränkt sind (Anhang A.3.6). Entsprechend große Fluidvorkommen wurden nur in Ausnahmefällen angetroffen und nur an den genannten stratigrafischen Positionen. Im Hauptsalz kommen sie nicht vor.

In /WEB 13/ kommen die Autoren somit zu dem Schluss, dass die Voraussetzungen für die Bildung dieser Klüfte im Innern der Staßfurt-Folge, innerhalb derer sich die im Vor-

haben VSG konzipierten Einlagerungsbereiche befinden, nicht gegeben sind, so dass ihr Auftreten dort als unwahrscheinlich auszuschließen ist.

Dagegen stellen die im Hauptsalz des Salzstocks Gorleben auftretenden, dispers verteilten Kohlenwasserstoffvorkommen potenzielle Inhomogenitäten dar (Abb. 5.13). Diese treten bevorzugt im Knäuelsalz (z2HS1) auf. Die im Salzstock Gorleben festgestellten Kondensate bestehen überwiegend aus niedrig siedenden flüssigen aliphatischen Kohlenwasserstoffen (C_6 bis C_{16} , i.d.R. jedoch $< C_{10}$).

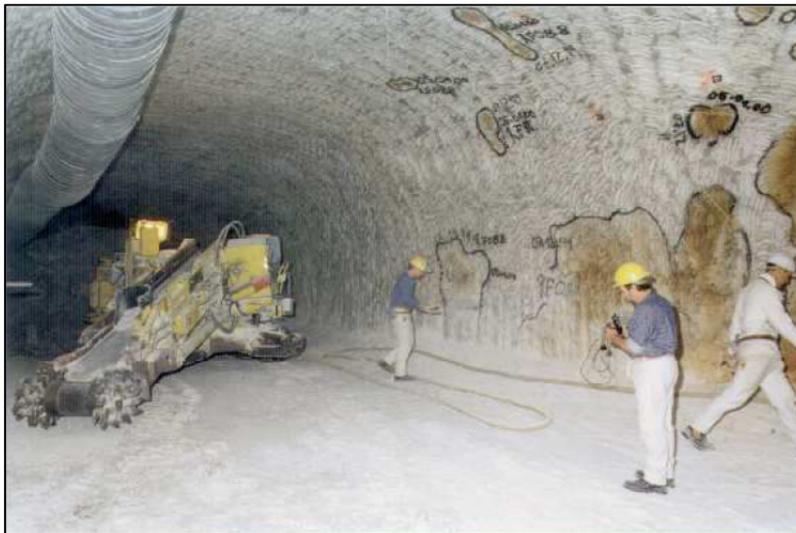


Abb. 5.13 Austritt von Kohlenwasserstoffen (Kondensat) am Stoß und Firste im Querschlag 1 Ost der Erkundungssohle (Quelle: DBE/BGR)

Die sicherheitsrelevanten Auswirkungen der innerhalb des Hauptsalzes des Salzstockes Gorleben auftretenden Kohlenwasserstoffvorkommen wurden erstmals im Vorhaben VSG durch die Arbeitsgruppe Kohlenwasserstoffe untersucht (vgl. Kap. 3.5.5). Dabei wurde die sicherheitstechnische Bedeutung von Kohlenwasserstoffvorkommen für die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle im Steinsalz analysiert, insbesondere bezüglich des Einflusses chemischer Prozesse (thermochemische Sulfatreduktion, mikrobielle Sulfatreduktion etc.) und geomechanischer Einwirkungen auf das Hauptsalz /WEB 11/. Hierbei war zu überprüfen, ob sich aus den geochemischen und geomechanischen Einwirkungen der Kohlenwasserstoffe Implikationen für das Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG, das Endlagerkonzept oder die Endlagerauslegung ergeben. Die Ergebnisse dieser Analysen werden umfassend in /BRA 12/ dargestellt.

Nach dem derzeitigen Kenntnisstand wird nach /BRA 12/ aus geomechanischen, hydromechanischen oder geochemischen Prozessen, die in einem Endlager, d. h. bei erhöhten Temperaturen bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen, vor allem infolge thermochemischer Sulfatreduktion, ablaufen könnten, die Integrität der geologischen Barriere nicht nachteilig beeinflusst. So sind die beobachteten Volumenanteile der Kohlenwasserstoffe mit maximal 250 ml/m^3 (0,025 Vol.-%) zu gering, als dass daraus ein Einfluss im Sinne eines erhöhten Porendrucks abgeleitet werden kann. Auch die zusätzlichen Wassermengen, die durch die thermochemische Sulfatreduktion im Umfeld eines POLLUX®-Behälters stöchiometrisch entstehen können (unter extrem pessimistischen Annahmen maximal ca. 3,4 l) sind im Vergleich zur Wassermenge allein aufgrund der Gebirgsfeuchte im konturnahen Bereich (0,02 %, ca. 1 m^3) zu gering, um nennenswerte Auswirkungen auf die Mobilisierung von Radionukliden oder die Gasbildung hervorzurufen. Weiterhin wird angesichts der geringen Sulfidmengen, die infolge thermochemischer Sulfatreduktion gebildet werden könnten, letztlich kein nennenswerter Einfluss auf den Korrosionsfortschritt der Abfallbehälter erwartet.

Im Hinblick auf potenziell integritätsgefährdende geomechanische Einflüsse kommt /BRA 12/ zu folgenden weiteren Schlüssen:

- Ein Gas-Salzausbruch ist bei den im Hauptsalz der Salzstruktur Gorleben bisher bekannten, geringen Kohlenwasserstoffgehalten unwahrscheinlich. Erfahrungen aus dem Kalibergbau belegen, dass hierfür lokale Gasgehalte in der Größenordnung von ca. 10 Vol.-% notwendig sind /SAL 89/.
- Die Mobilisierung von Kohlenwasserstoffen analog zu anderen Fluiden im Temperaturfeld ist prinzipiell möglich, allerdings ist die Reichweite abhängig vom Temperaturfeld um die Einlagerungsbereiche. Eine sicherheitsrelevante Einwirkung ist (analog zur Thermomigration von Lösungseinschlüssen) nicht zu erwarten.
- Durch Kohlenwasserstoffe beeinflusste Salzeigenschaften (z. B. Verfestigung, Verringerung des Feuchte kriechens/Schmiereffekte) werden sich als Effekte qualitativ nicht von anderen lithologischen Einflussfaktoren unterscheiden. Eine Gasdruckentwicklung innerhalb von Kohlenwasserstoff-imprägniertem Steinsalz (z. B. infolge thermochemischer Sulfatreduktion (TSR)) führt bei Verletzung des Minimalspannungs-Kriteriums allenfalls zu lokaler Permeation durch Aufweitung von Mikrorissen und Korngrenzen, die Entstehung großer Risse im Meterbereich ist dagegen unwahrscheinlich.

- Lokale Spannungsänderungen, z. B. durch Temperatureinwirkung oder TSR, führen im dichten Salz zu keinen kritischen Lastzuständen, da Salz in der Lage ist, Spannungsspitzen durch Kriechen abzubauen. Darüber hinaus liegen in den Einlagerungsbereichen kompressive Spannungszustände vor, die einer thermischen Expansion entgegenwirken.

Einschränkend ist anzumerken, dass die oben getroffenen Aussagen aufgrund der durch die nicht abgeschlossene Erkundung unvollständigen Datenlage teilweise semi-quantitativer Natur sind und als Expertenschätzung anzusehen sind. Letztere beruhen häufig auf Analogieschlüssen, die aus den Eigenschaften nicht Kohlenwasserstoffhaltiger Lösungsvorkommen abgeleitet wurden. Während der Laufzeit des Vorhabens VSG wurden keine weiteren Erkenntnisse gewonnen, die auf eine Sicherheitsrelevanz von Kohlenwasserstoffvorkommen wie im Salzstock Gorleben unter Endlagerbedingungen hinweisen.

Fazit:

Zusammenfassend ist nach heutiger Kenntnis festzustellen, dass das Hauptsalz im Kernbereich des Salzstockes und damit auch in der Umgebung der Einlagerungsbereiche aufgrund der geologischen Entwicklungsgeschichte durch eine halokinetisch bedingte intensive Deformation und daraus resultierende Homogenisierung gekennzeichnet ist. Gleichzeitig weist es einen hohen Rekristallisationsgrad und die Abwesenheit von hydraulisch wirksamen Klüften, Störungen oder makroskopischen Lösungsvorkommen auf. Hierdurch liegen nach heutiger Kenntnis im Hauptsalz Homogenbereiche vor, die im Hinblick auf die Endlagerung gleichmäßige Eigenschaften aufweisen, wie etwa geomechanische Eigenschaften oder Dichtigkeit gegenüber Fluiden. Im ungestörten Zustand weisen die duktilen Salzgesteine, so auch das Hauptsalz, keine Permeabilitäten größer 10^{-21} m^2 auf und sind damit praktisch undurchlässig für Fluide /BOR 04/. Aufgrund der relativ homogenen Ausprägung des Hauptsalzes im Kernbereich der Salzstruktur Gorleben ist dieser Salzbereich grundsätzlich gut charakterisierbar und prognostizierbar. Bisherige Erkundungsergebnisse legen nahe, dass das Hauptsalz zudem eine ausreichende Verbreitung (Mächtigkeit) für die Auffahrung der konzipierten Einlagerungsbereiche aufweist. Nach heutigem Kenntnisstand sind die im Rahmen der bisherigen Erkundung im Hauptsalz angetroffenen Kohlenwasserstoffvorkommen zu gering, als dass aufgrund ihres Vorkommens sicherheitsrelevante Einflüsse, wie z. B. eine Beschleunigung der Korrosionsvorgänge von Behältern oder die Gefährdung der Integrität der geologischen Barriere, zu besorgen wären. Die Erfüllung der mit der

Maßnahme M2 verbundenen Anforderungen an die Eigenschaften der geologischen Barriere kann daher unter der grundlegenden Annahme im Vorhaben VSG, dass die im EB 1 erzielten Erkundungsergebnisse auf nicht erkundete Hauptsalzpartien übertragen werden können, grundsätzlich als gegeben angesehen werden. Diese Aussage steht unter dem weiteren Vorbehalt, dass im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte nachgewiesen werden kann, dass die geomechanischen und geochemischen Einflüsse der Kohlenwasserstoffe im Hauptsalz tatsächlich vernachlässigbar sind.

Maßnahme M3: Auffahrung der Einlagerungsbereiche in Salzbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevantem Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen

Wie Anhang A.3.7 zu entnehmen ist, enthält das Hauptsalz, das durch eine Deformation und Homogenisierung gekennzeichnet ist, keine Lösungseinschlüsse mit nennenswerten Volumina. Die Gebirgsfeuchte im Hauptsalz der Staßfurt-Serie ist gering (0,012 bis 0,017 Gew.-%). Dies ist auf eine teilweise Brekzierung und insgesamt resultierende Homogenisierung der Steinsalzsichten bei der Diapirbildung zurückzuführen, bei der die im Steinsalz eingeschlossenen Lösungen freigesetzt und in Randbereiche der Salzstruktur mit für eine Speicherung von Fluiden günstigen Speichereigenschaften (z. B. in den Hauptanhydrit) abgepresst wurden /BOR 08a/. Dieser Zusammenhang erlaubt es, bei bekanntem geologischem Bau der Struktur, mögliche Lösungszutritte und ihr Ausmaß bei der Auffahrung vorherzusehen.

Die Kriecheigenschaften des Steinsalzes werden im FEP-Katalog /WOL 12b/ wie folgt beschrieben: Das Salzgestein reagiert entsprechend seinen Materialeigenschaften auf die an der Hohlraumkontur und im angrenzenden Salzgebirge wirkenden Spannungen mit mehr oder weniger großen Verformungen, die zeitabhängig unter Ausbildung von Schädigung (bei Belastungen oberhalb der Dilatanzgrenze) oder volumenkonstant erfolgen können. Dieser als Kriechen beschriebene visko-elasto-plastische Prozess tritt bereits bei kleinen Spannungsdifferenzen auf und ist neben dem Betrag des Spannungsdeviators von der Temperatur und der Ausbildung des Salzes abhängig. Aufgrund der Kriechfähigkeit des Salinars werden Hohlräume im Wirtsgestein durch die Konvergenz geschlossen.

Mit der Auffahrung von Hohlräumen zur Errichtung eines Endlagers setzt als Folge der vorliegenden Gebirgsspannungen unmittelbar Konvergenz ein, die zu einer Verringerung des Hohlraumvolumens führt. Im Rahmen des untertägigen geotechnischen

Messprogramms am Standort Gorleben sind zur Bestimmung der lokalen Gebirgsdeformation in unterschiedlichen Messebenen in den beiden Schächten, dem Infrastrukturbereich und dem EB1 Konvergenzmesstationen eingerichtet worden /BRÄ 11/. Die seit Mitte der 90iger Jahren durchgeführten Messungen zeigen lokal teufen- und richtungsabhängig erhebliche Unterschiede. Es gibt Hinweise auf lithologische Effekte (z. B. den Anhydritgehalt), wobei z. B. das Liniensalz zumeist höhere Konvergenzraten als die anderen Einheiten des Leinsteinsalzes (z. B. Orangesalz) aufweist.

Die Konvergenz-Messprofile für die Erkundungssohle weisen erhebliche Unterschiede der auftretenden Konvergenz zwischen den Infrastrukturbereichen im Leinsteinsalz (z3) und den im Staßfurt-Steinsalz (z2HS) konzipierten Einlagerungsbereichen aus. Generell werden die höchsten Konvergenzraten mit bis zu 7 mm/(m·a) im Knäuelsalz (z2HS1) gemessen und nehmen im Streifensalz (z2HS2) und im Kristallbrockensalz (z2HS3) bis auf unter 1 mm/(m·a) ab. Die Messwerte im Leinsteinsalz sind generell deutlich kleiner als 0,5 mm/(m·a), wobei lithologisch bedingt noch eine Abnahme vom älteren Liniensalz (z3LS) bis zum jüngeren Bank/Bändersalz (z3BK/BD) zu beobachten ist. Insgesamt entsprechen die experimentell gemessenen und in situ beobachteten Kriechraten den Erfahrungen von anderen Salzstockstandorten in Norddeutschland, wobei die Unterschiede zwischen den ausgewiesenen Homogenbereichen plausibel auf litho-stratigraphische Ursachen (z. B. Verteilung und Korngröße der akzessorischen Mineralphasen) zurückgeführt werden können /PLI 02/.

Vor der Schließung des Endlagers werden nach dem im Vorhaben VSG entwickelten Verschlusskonzept alle untertägigen Hohlräume zur Stabilisierung der geologischen Barriere mit Schotter (Infrastrukturbereich) bzw. Salzgrus (alle anderen Grubenräume) versetzt. Durch die Konvergenz des Hohlraumes wird der Salzgrusversatz kompaktiert und somit ein Stützdruck aufgebaut, der wiederum auf das Gebirge wirkt und die Konvergenzrate reduziert. Weiterhin werden Risse in der Auflockerungszone versetzter Strecken, Bohrlöcher und Schächte durch den Stützdruck rückgebildet und es finden Verheilungsprozesse statt. Mit fortschreitender Versatzkompaktion wird der Spannungsdeviator in der Salinarkontur soweit reduziert, bis isotrope Spannungszustände vorliegen. Nach vollständiger isostatischer Versatzkompaktion kommt die Konvergenz zum Stillstand.

Fazit:

Geomechanische und strukturgeologische Modellvorstellungen zur Halokinese der Salzstruktur Gorleben erklären plausibel die Abwesenheit von größeren Lösungseinschlüssen im Salzstockkern, in dem das lithologisch insgesamt homogene Hauptsalz der Staßfurtfolge auftritt, mit einer Auspressung der Lösungen während des Salzstockaufstiegs. Diese Interpretation stimmt mit den bisherigen Erkundungsergebnissen überein. Diesbezüglich werden die Eigenschaften des Hauptsalzes als gut prognostizierbar angesehen, so dass für die noch nicht erkundeten Bereiche im Nordosten des Salzstockes Gorleben für das Hauptsalz ebenfalls eine geringe Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Lösungseinschlüssen mit nennenswerten Volumina angenommen wird. Die bezüglich ihrer geomechanischen Eigenschaften ausweisbaren Homogenbereiche des Hauptsalzes weisen allesamt günstige Kriecheigenschaften, d. h. hohe Verformungsraten, die zu einem schnellen Einschluss der Abfälle führen, auf /PLI 02/. Die Maßnahme M3 kann unter dem grundlegenden Vorbehalt im Vorhaben VSG, die Übertragbarkeit der im EB 1 erzielten Erkundungsergebnisse auf nicht erkundete Hauptsalzpartien betreffend, als erfüllt angesehen werden.

Maßnahme M13: Ausreichende Teufenlage der Einlagerungsbereiche

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept wird gefordert, das Endlagerbergwerk in einer ausreichenden Teufe zu konzipieren. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass das Endlagerbergwerk in dem Salzstock eingebettet liegt und große Mächtigkeiten der Salzgesteinsbarriere zu den Seiten sowie nach oben zum Salzspiegel hin existieren. Insbesondere durch die Teufenlage soll ausgeschlossen werden, dass die einschlusswirksamen Eigenschaften der geologischen Barriere durch exogene Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, beeinträchtigt werden können. Exogene Lastfälle natürlichen Ursprungs sind solche, die ausgehend von der Erdoberfläche unabhängig von der Existenz eines Endlagers den Standort betreffen würden. Hierzu gehören z. B. Erdbeben oder die thermischen und mechanischen Auswirkungen von Kaltzeiten (Permafrost, Inlandeisüberfahrungen etc.) sowie Erosion. Hinzu kommen die natürlichen Prozesse Diapirismus und Subrosion.

Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager zu erschweren²⁵.

Die Salzstockbasis der Struktur Gorleben-Rambow befindet sich in einer Tiefe von ca. 3.500 m u. NN, während der Salzspiegel unterhalb des einige Zehner Meter mächtigen Hutgesteins in einer Teufe von 250 bis 320 m u. NN ausgebildet ist. Am Aufbau der Salzstruktur Gorleben–Rambow sind vorwiegend die Staßfurt-, Leine- und Aller-Folge (z2, z3 und z4) beteiligt, deren primäre Mächtigkeiten (s. Anhang A.1.2)

- Aller-Folge (Zechstein 4, z4) ca. 60 m
- Leine-Folge (Zechstein 3, z3) ca. 320 m und
- Staßfurt-Folge (Zechstein 2, z2) ca. 700 bis 950 m

betragen haben. Die mobileren Schichten des Hauptsalzes (z2HS) sind nahezu vollständig in die Salzstruktur eingewandert. Die Sedimente über dem Salzstock Gorleben sind – von kreidezeitlichen Relikten abgesehen – tertiären und quartären Alters (Abb. A.1). Die tertiären und quartären Deckschichten über dem Salzstock sind bis zu maximal 430 m mächtig.

Die wahrscheinliche Ausprägung der halokinetischen Hebungsrate am Standort Gorleben liegt je nach Teufenlage bei 0,02 mm/a (im Bereich des Salzspiegels) bzw. bei 0,07 mm/a (in 840 m Teufe) /WOL 12b/. Bei einem natürlichen (d. h., nicht durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen verursachten) Salzaufstieg führt dies zu einer maximalen Hebung von 70 m im Nachweiszeitraum für das Zentrum des Salzstocks. Aufgrund der Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle kommt es in den ersten 1.000 Jahren nach der Einlagerung zu einer erhöhten, durch thermische Expansion induzierten Hebung des Salzspiegels, welche diejenige durch geologische Prozesse zunächst um mehr als eine Größenordnung übersteigt und danach wieder abnimmt. Die niedrigen Hebungsraten durch den natürlichen Diapirismus sind lange nach Abklingen des Wärmeeintrags noch relevant. Man kann deshalb davon ausgehen, dass die Spannungsverhältnisse in der geologischen Barriere, die durch den Diapiris-

²⁵ Weiterhin führt der mit zunehmender Teufe größer werdende Teufendruck dazu, dass während der geologischen Entwicklung einer Salzstruktur geöffnete Klüfte oder Risse geschlossen werden und verheilen. Geomechanische Untersuchungen mit in situ-Beobachtungen, Modellrechnungen und der Auswertung historischer Lösungszuflüsse über den Hauptanhydrit zeigen, dass in Teufen > 800 m keine geöffneten Klüfte im Hauptanhydrit und in angrenzenden Steinsalzbereichen festgestellt wurden /KAM 09/.

mus entstehen, durch diejenigen aus der wärmebedingten Hebung nach Einlagerung der wärmeentwickelnden Abfälle abgedeckt sind /KOC 12/.

Obwohl in /MRU 11/ dargelegt wird, dass die Halokinese am Standort Gorleben nahezu abgeschlossen ist und sich die Hebungsrate degressiv entwickelt, wird für die weiteren Betrachtungen angenommen, dass die aus der Vergangenheit bestimmte Aufstiegsrate zukünftig andauert. Im Falle der weiteren Hebung durch Diapirismus besteht die Möglichkeit, dass die Abfälle im Nachweiszeitraum eine Hebung um 70 m erfahren. Dementsprechend wird in der Ergebnisbewertung der Integritätsanalysen davon ausgegangen, dass das Endlagerbergwerk insgesamt um diesen Betrag angehoben wird.

Unter dem Prozess Subrosion am Standort Gorleben ist die Ablaugung des Salzgesteins, und hier insbesondere am Salzspiegel des Salzstocks, durch gering mineralisiertes Grundwasser zu verstehen. Dabei wird für den Salzstock unter Berücksichtigung der fortschreitenden Tieferlegung des Salzspiegels für die Zukunft eine Subrosionsrate von im Mittel 0,05 bis 0,1 mm pro Jahr erwartet, bei der es in einer Million Jahren zu einer Abtragung von 50 bis 100 m Salzmächtigkeit kommt /WOL 12b/. Dabei ist eine erneute selektive Ablaugung leichtlöslicher Kalisalzpartien unter bestimmten Voraussetzungen möglich, so dass eine hydraulische Wegsamkeit entstehen könnte, die bis etwa 150 m unter den Salzspiegel reichen könnte.

Flächenhafte Erosion /WOL 12b/ führt am Standort Gorleben zur Reduktion der Deckgebirgsmächtigkeit und bewirkt eine Veränderung der Morphologie. Die morphologischen Veränderungen bedeuten in einem tektonisch ruhigen Gebiet eine Einebnung des vorhandenen Reliefs, was Auswirkungen auf die hydrogeologischen Verhältnisse durch die Verringerung des hydraulischen Potentials und die hydrologischen Verhältnisse hat. Die Reduzierung der Mächtigkeit des Deckgebirges am Standort wird wegen des geringen Reliefs allenfalls wenige Meter betragen, was als nicht sicherheitsrelevant angesehen wird. Lediglich die in geringem Umfang vorhandenen Hochlagen (z. B. Hühbeck) dürften im Nachweiszeitraum eingeebnet werden.

Eine besondere Form der Erosion ist die Entstehung einer glazialen Rinne. Für den Standort Gorleben wurde im Rahmen der Szenarienentwicklung eingeschätzt, dass durch die Bildung einer solchen Rinne das Deckgebirge komplett abgetragen und darüber hinaus die Mächtigkeit der geologischen Barriere um 50 m reduziert werden kann. In den Integritätsanalysen /KOC 12/ wurde ein erhöhter Betrag der erosiven Tiefenwir-

kung einer glazialen Rinne von 100 m bzw. von zwei sich überlagernden Rinnen mit je 50 m angenommen.

Fazit:

Die im Vorhaben VSG durchgeführte Endlagerplanung sieht den Einlagerungsbereich der Streckenlagerung auf der 870-m-Sohle vor. Auch das Konzept der Bohrlochlagerung (Variante C) sieht das Niveau der Überfahrungsstrecken, von denen aus die Bohrlöcher beladen werden, auf einer Teufe von 870 m vor. Durch die Endlagerplanung ist gewährleistet, dass große Mächtigkeiten der Salzgesteinsbarriere zu den Seiten sowie nach oben zum Salzspiegel vorhanden sind. Insbesondere wird durch die Teufenlage eine negative Beeinflussung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch die betrachteten exogenen Prozesse ausgeschlossen. Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erschweren, wenn davon auszugehen ist, dass ein Eindringen in eine Tiefe von mehr als 800 m auch zukünftig mit einem entsprechend hohen technischen Aufwand verbunden ist. Darüber hinaus werden sich infolge des großen Teufendrucks aufgrund der Kriechfähigkeit von Steinsalz die im Zuge der geologischen Entwicklung gebildeten Risse schließen und bei Anwesenheit von Feuchtigkeit wieder verheilen. Im Ergebnis können bei Teufen unter 800 m offene Risse oder Klüfte im Hauptsalz oder benachbarten Salzgesteinen ausgeschlossen werden /KAM 09/ oder /WEB 13/. Die aus der Maßnahme M13 resultierende Anforderung an die Standortverhältnisse können somit als umgesetzt angesehen werden.

Maßnahme M14: Praktisch abgeschlossene Halokinese, tektonisch ruhiges Subsidenzgebiet

Im FEP-Katalog /WOL 12b/ wird zum Diapirismus am Standort Gorleben auf der Basis der Feststellungen in /MRU 11/ folgendes festgestellt: Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes in Höhe der geplanten Einlagerungssohle in 870-900 m Tiefe Fließgeschwindigkeiten des Steinsalzes von max. 0,34 mm/a während der Oberkreide und bis 0,07 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär auf. Die eingewanderten Salzmenge hoben dabei die Salzstockoberfläche um etwa 0,08 mm/a zur Oberkreidezeit und etwa 0,02 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär. Die Ergebnisse von Randsenkenanalysen belegen, dass die Salzeinwanderung seit ihrem Maximum in der Oberkreide bis zur jüngsten geologischen Vergangenheit stetig abnahm. Eine Zunahme der Aufstiegsraten innerhalb der nächsten Million Jahre würde hohe kompressive Spannungen und

eine sehr starke Absenkung des Gebietes mit einer Neubildung von Sedimenten voraussetzen. Eine derartige Entwicklung wird jedoch für den Endlagerstandort nicht prognostiziert, so dass die Aufstiegsrate des Zeitraums Miozän bis Quartär auch für die kommende Million Jahre angenommen werden kann. Ohne Berücksichtigung von Subsorption würde dies zu einer Hebung des Salzspiegels um etwa 20 m im Nachweiszeitraum führen.

Für den Standort Gorleben wurde für die letzten 30 Millionen Jahre ein genereller Trend der Abwärtsbewegung mit relativ geringen Raten von 0,01 mm/a nachgewiesen, der auch in der Zukunft weiter anhalten wird /MRU 11/. Aufgrund der Langfristigkeit dieser geotektonisch bedingten Subsidenz ist nicht damit zu rechnen, dass eine Hebung der Erdkruste und damit ein tektonisch bedingter Aufstieg der Einlagerungsbecken in der nächsten eine Million Jahre von Bedeutung sein wird. Der Prozess der Subsidenz wirkt dem halokinetisch bedingten Salzstockaufstieg entgegen. Der Absenkungsbetrag liegt im Zeitraum von einer Million Jahren bei 10 m, so dass die Nettohebung des Salzspiegels in diesem Zeitraum rechnerisch bei lediglich 10 m liegt.

Da der gesamte norddeutsche Bereich sich seit dem Miozän in einer tektonisch ruhigen Phase befindet, werden u. a. aufgrund der derzeit herrschenden Spannungszustände in Norddeutschland nach /MRU 11/ tektonische Vorgänge wie Orogenese, Grabenbildung, hydrothermale Aktivität, Magmatismus oder Gesteinsmetamorphose für die nächste eine Million Jahre ausgeschlossen.

Fazit:

Für die nächste eine Million Jahre ist davon auszugehen, dass aufgrund der geringen verbliebenen Mengen mobilisierbaren Hauptsalzes im Bereich der Zechstein-Basis und unter dem Einfluss des rezenten Hauptspannungsfeldes keine erneute massive Salzeinwanderung in die Struktur mit entscheidenden Änderungen der geologischen Standortverhältnisse stattfindet. Die norddeutsche Tiefebene zeichnet sich seit dem Miozän durch eine vergleichsweise geringe aber stetige Subsidenz und tektonische Ruhe aus. Die aus der Maßnahme M14 resultierenden Anforderungen an die Standortverhältnisse können somit als umgesetzt angesehen werden.

5.1.4 Verschlusskomponenten

Im Folgenden werden die technischen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen erläutert und die Umsetzung der im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG hierzu geforderten Maßnahmen geprüft. Bezüglich der ingenieurtechnischen Einzelnachweise, die gemäß dem Nachweiskonzept des Vorhabens VSG für die Verschlusskomponenten zu führen waren, wird auf das Kapitel 5.2.2.2 verwiesen.

Das im Vorhaben VSG entwickelte Verfüll- und Verschlusskonzept ist vom Grundprinzip her für alle Einlagerungsvarianten gleich und besteht aus folgenden Schritten:

1. Die Einlagerung der Endlagerbehälter mit wärmeentwickelnden Abfällen beginnt im schachtfernsten Einlagerungsfeld Ost 1. Von hier aus erfolgt der von Verfüllmaßnahmen begleitete Rückbau der konzipierten Endlagerbergwerke in Richtung Westen. Dabei wird direkt nach der Einlagerung der verbleibende Streckenraum um die Behälter (Varianten B1 und B2) bzw. der Ringraum zwischen Kokille und Bohrlochverrohrung (Variante C) mit trockenem Versatzmaterial verfüllt.
2. Die Richtstrecken werden mit angefeuchtetem Salzgrusversatz versetzt.
3. Der Infrastrukturbereich wird mit nicht-kompaktierbarem Versatzmaterial verfüllt.
4. Die Zugangsstrecken in Schachtnähe werden mit Streckenverschlüssen abgedichtet.
5. Die Tagesschächte werden mit Schachtverschlüssen abgedichtet.

5.1.4.1 Verfüllung der Einlagerungsbereiche

Als Versatzmaterial für die **Verfüllung der Hohlräume in den Einlagerungsbereichen** wurde für die Varianten A, B1 und B2 in Übereinstimmung mit den Vorgaben des Sicherheitskonzepts des Vorhabens VSG Salzgrus ausgewählt (Abb. 5.14). Hintergrund ist, dass dieser in seiner stofflichen Zusammensetzung dem Wirtsgestein gleich ist, aus der Auffahrung von Grubenbauen in ausreichender Menge im Endlagerbergwerk zur Verfügung steht und mit erprobten Verfahren in die bergbaulich geschaffenen Hohlräume eingebaut werden kann. Konzeptionell ist bei der Verfüllung der Einlagerungsbereiche vorgesehen, dass zur Minimierung von Korrosionsvorgängen nach der jeweiligen Einlagerung eines Behälters möglichst trockener Salzgrus (Feuchtegehalte um 0,02 Gew.-%) als Versatzmaterial in die Einlagerungsstrecken eingebracht

wird. Ziel ist es, die abfallnahen Feuchtegehalte möglichst gering zu halten, um dadurch die Gasbildung infolge Korrosion des Behälterstahls bzw. die Mobilisierung von Radionukliden durch Lösungsvorgänge zu minimieren. Das Salzgrusmaterial soll dabei aus dem aufgefahrenen Haufwerk gewonnen werden /BOL 11/. Die Verfüllung der Einlagerungsstrecken erfolgt sukzessive, d. h., es wird Behälter für Behälter zurückgebaut. Die zugehörigen Querschläge werden, nachdem alle Strecken eines Einlagerungsfeldes gefüllt und mit Salzgrus versetzt wurden, ebenfalls vollständig mit trockenem Versatz verfüllt. Als Einbringtechnologie können dabei sowohl Schleuder- als auch Blasversatzverfahren zum Einsatz kommen.

Beim Konzept der Bohrlochlagerung besteht die einzige Abweichung vom oben genannten Versatzkonzept darin, dass der verbleibende Ringspalt zwischen Kokillenaußenwand und der Innenwand der Verrohrung nicht mit Salzgrusversatz, sondern mit einem nicht kompaktierenden, dauerhaft rieselfähigen Versatzmaterial (z. B. Quarzsand) befüllt wird. Hierdurch soll die Rückholbarkeit der Kokillen aus den verrohrten Bohrlöchern auch nach einigen Jahrzehnten durch Ziehen ggf. unter Freirütteln gewährleistet werden.

Bei der **Verfüllung der Richtstrecken** ist vorgesehen, dem Salzgrus geringe Menge Lösung beizugeben (max. 0,6 Gew.-%), um dessen Kompaktion zu beschleunigen (vgl. auch Kap. 5.1.4.6). Um zu verhindern, dass diese Feuchtigkeit über die Querschläge in die Einlagerungsfelder zu den Abfallbehältern migriert, wird das jeweilige Ende der Querschläge in Richtung nördlicher und südlicher Richtstrecke durch einen ca. 10 m langen Pfropfen aus Sorelbeton verschlossen. Das Verfüllkonzept sieht vor, nach der Verfüllung eines Einlagerungsfeldes die entsprechenden Abschnitte der Richtstrecken ebenfalls sukzessive im Rückbau mit Salzgrus zu verfüllen.

5.1.4.2 Verfüllung des Infrastrukturbereichs

Die Grubenbaue des schachtnahen **Infrastrukturbereichs** werden – abweichend vom grundsätzlichen Prinzip des Verfüllens mit Salzgrus – mit dauerhaft setzungsstabilem Material (Serpentinit- oder Basaltschotter) versetzt, so dass ein definierter Porenraum von ca. 50 % des ursprünglichen Hohlraumvolumens dauerhaft offen bleibt und der Infrastrukturbereich in der Nachverschlussphase als langfristig offener Porenspeicherraum dienen kann. Hintergrund dieser Maßnahme ist, dass im Vorhaben VSG als wenig wahrscheinliche Entwicklung ein partieller Ausfall der Dichtfunktion der Schachtver-

verschlüsse in der Nachbetriebsphase unterstellt wurde. In diesem Fall sollen durch Verzögerung des Druckaufbaues Lösungen, die aus den Schächten in den Infrastrukturbereich gelangen, an einem Vordringen über die Streckenverschlüsse und in die dahinter gelegenen Einlagerungsbereiche so lange gehindert werden, bis der Salzgrusversatz in den Einlagerungsbereichen durch fortgeschrittene Kompaktion eine ausreichend geringe Permeabilität erreicht hat. Aus diesem Grund wird im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG dem Infrastrukturbereich die Rolle eines verzögernden und druckbrechenden Funktionselements mit einem Porenvolumen von ca. 45.600 m³ zugewiesen.

In gleicher Weise soll der bereits heute bestehende, 30 m oberhalb der Einlagerungssohle gelegene Infrastrukturbereich der Erkundungssohle verfüllt werden. Das nach Verfüllung verbleibende Porenvolumen beträgt hier 41.800 m³. Als weitere Maßnahme ist das Einbringen von etwa 19.000 t technischem Bischofit²⁶ geplant. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass ggf. zutretende Mg²⁺-arme Lösungen, die korrosiv auf die aus Sorelbeton bestehenden Dichtelemente der Strecken- und Schachtverschlüsse wirken können, bis zur Sorelbetonstabilität mit MgCl₂ angereichert werden²⁷ (vgl. auch Kap. 5.1.4.4).

5.1.4.3 Streckenverschlüsse

Als schnellwirkende geotechnische Barrieren werden im Verschlusskonzept bei allen Einlagerungsvarianten Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Schächten, d. h. in den Bergbautransportstrecken (Ost und West) sowie in der Gebindetransportstrecke (Querschlag Mitte), vorgesehen (Abb. 5.14). Bei der Planung der Position der Streckenverschlüsse wurde ein hinreichender Abstand zu potenziellen Störzonen (z. B. Anhydrit, Kaliflöz) berücksichtigt. Aufgrund der Forderung, dass die optional mit zu berücksichtigenden Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung (Variante A) aus Gründen der Langzeitsicherheit hydraulisch von den wärmeentwickelnden Abfällen getrennt werden sollen (vgl. Maßnahme M11), wurde ein zusätzlicher Streckenverschluss in der nördlichen Verbindungsstrecke zwischen dem West- und dem Ost-Flügel des Endlagerbergwerks vorgesehen.

²⁶ Wasserhaltiges Magnesiumchlorid mit der Zusammensetzung MgCl₂ • 6H₂O.

²⁷ MgO-Baustoffe sind im Salzgebirge in Gegenwart von Salzlösungen stabil, wenn wenigstens 50 g MgCl₂/kg Wasser (= 0,5 molale MgCl₂-Lösung bei Sättigung an NaCl) gelöst sind /PAN 13/. Die geochemisch langzeitstabile Sorelphase ist die 3-1-8 Phase (3Mg(OH)₂•MgCl₂•8H₂O), die beim Einsatz von einem Sorelbaustoff vom Typ A1 vermutlich erst aus einer Nachreaktion der ansonsten dominierenden und primär gebildeten 5-1-8 Phase mit später zutretender MgCl₂-Lsg. entsteht.

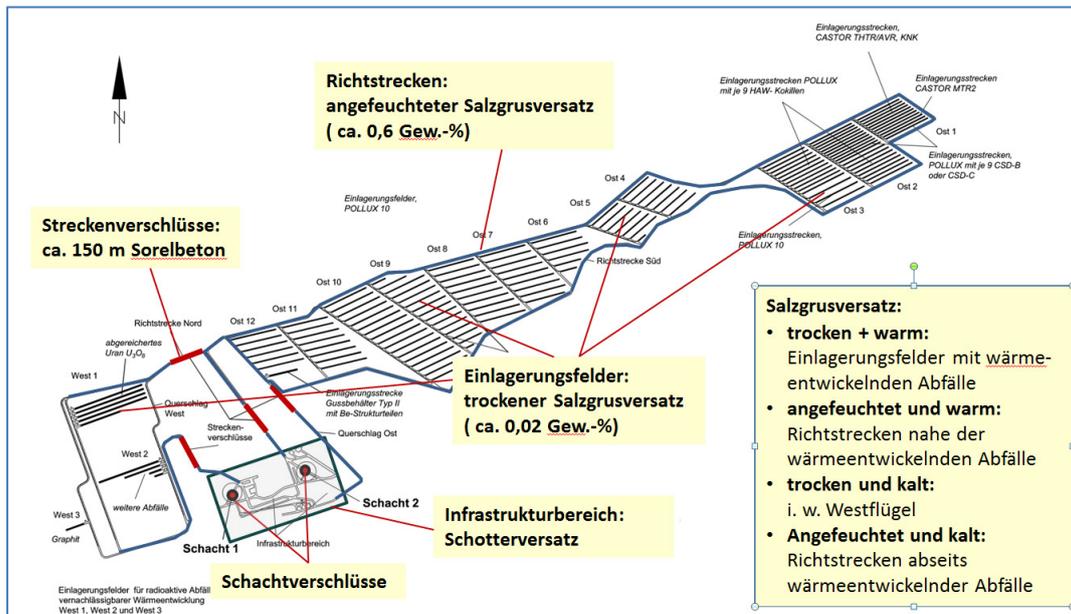


Abb. 5.14 Übersichtsdarstellung zu den Verfüll- und Verschlussmaßnahmen am Beispiel der Streckenlagerung (Variante B1)

Jeder der insgesamt über 140 m langen Streckenverschlüsse besteht aus zwei jeweils 50 m langen Dichtelementen aus Sorelbeton A1, die zwischen Widerlagern, welche ebenfalls aus Sorelbeton hergestellt sind, eingebracht werden. Die Widerlager dienen dazu, einseitige Beanspruchungen durch Gas- oder Lösungsdruck ohne Lageverschiebung in das Gebirge abzutragen. Die drei Widerlager sind zwischen 0,75 m dicken Schalungsmauern angeordnet, die aus Mauerziegeln, Kalksandsteinen oder Salzbricketts bestehen können (Abb. 5.15).

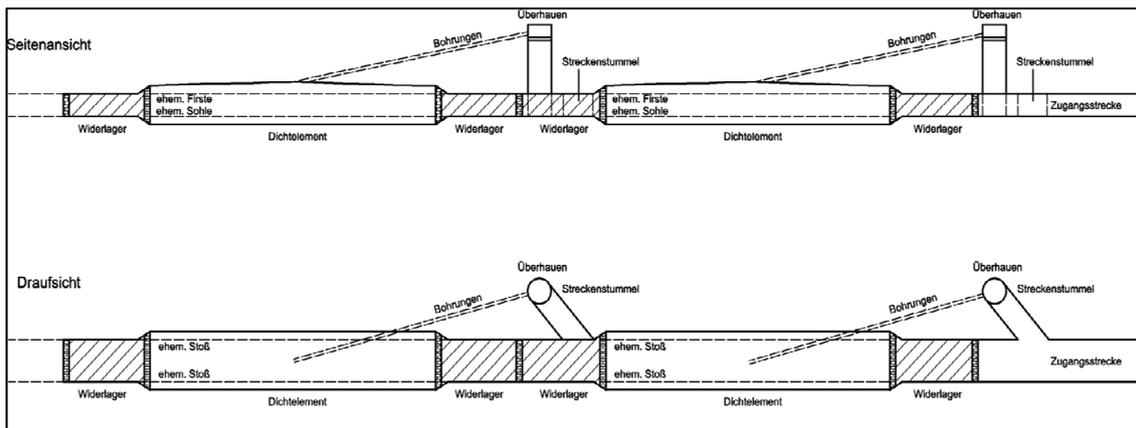


Abb. 5.15 Konstruktive Gestaltung der Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord, aus /MÜL 12a/

Auf die Ergebnisse der ingenieurtechnischen Nachweisführung zur Bauwerksintegrität und der Spezifizierung des hydraulischen Widerstandes wird im Zusammenhang mit der Umsetzung des Nachweiskonzeptes in Kapitel 5.2.2.2 eingegangen.

5.1.4.4 Schachtverschlüsse

Das Konzept für die Schachtverschlüsse wurde anhand der im Bereich des Schachtes Gorleben 1 angetroffenen geologischen Verhältnisse entwickelt. Für den Schacht Gorleben 2 wurde im Vorhaben VSG angenommen, dass ein bzgl. der Funktionserfüllung vergleichbares Schachtverschlusssystem wie im Schacht Gorleben 1 erstellt werden kann. Zwar liegen bei beiden Schächten unterschiedliche geologische Randbedingungen vor, woraus sich abweichende Lagen und Mächtigkeiten der einzelnen Schachtverschlusskomponenten ergeben. Diese Unterschiede sind allerdings so gering, dass das für den Schacht 1 entwickelte Grundkonzept (Abfolge und Materialwahl der Komponenten) nach /MÜL 12a/ auch auf den Schacht 2 übertragen werden kann.

In Abb. 5.16 ist der Funktionsentwurf für den Schachtverschluss Gorleben 1 dargestellt. Es handelt sich um ein Multi-Layer-System, welches aus Dichtelementen, Widerlagern und Speicherkomponenten besteht. Angaben zu Materialspezifikationen, Mächtigkeiten und Teufenlage der Funktionselemente enthält Tab. 5.6.

Die Materialwahl und Positionierung der Dichtelemente begründet sich wie folgt /MÜL 12a/:

Aufgabe des **1. Dichtelementes** ist die hydraulische Dichtwirkung gegenüber Deckgebirgswässern und seitlichen Lösungszutritten aus der Gorleben-Bank²⁸. Weiterhin soll der Bentonit aufgrund seiner Ionenaustauschkapazität organische Stoffe aus dem Deckgebirge ausfiltern. Die oberhalb des 1. Dichtelementes anschließende Filterschicht soll eine gleichmäßige Befeuchtung des darunter liegenden Bentonits sicherstellen, damit dieser möglichst homogen quillt. Weiterhin soll eine Aufsättigung von oben zutretender NaCl-untersättigter Deckgebirgslösungen durch direkten Kontakt mit der Salzkontur oberhalb des 1. Dichtelementes erfolgen, um Lösungs- und Korrosionsprozesse in den unterhalb folgenden Funktionselementen aus Salzbeton (oberes Widerlager und 2. Dichtelement) ausschließen zu können.

Die nach unten anschließende **Filterschicht** dient dazu, das Ausspülen feinkörniger Bestandteile aus dem darüber liegenden Bentonit-Dichtelement in das unten anschließende Schotterwiderlager zu verhindern (Erosions- und Suffosionsschutz).

Das unterhalb folgende **gebirgsverbundene, dränierte Widerlager** besteht aus Salzbeton. Es soll zusätzliche Setzungen im Bentonit-Dichtelement beschränken, die sich in Folge der Bemessungssituation Erdbeben rechnerisch ergeben /MÜL 12a/.

²⁸ Bei der Gorleben-Bank (z3OSM) konnte zum Zeitpunkt des Entwurfs des Schachtverschlussystems nicht ausgeschlossen werden, dass diese als potenzieller Lösungspfad einen hydraulischen Bypass der Dichtelemente bewirkt. Aus diesem Grund wurde vorsorglich überall dort, wo die Gorleben-Bank den Schacht 1 schneidet, planerisch ein Dichtelement angeordnet. Weitere Informationen zu den hydraulischen Eigenschaften der Gorleben-Bank, die zum Teil auf neuen Erkenntnissen aus der im Jahr 2010 fortgesetzten untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben fußen, sind dem VSG-Bericht /HAM 12/ zu entnehmen.

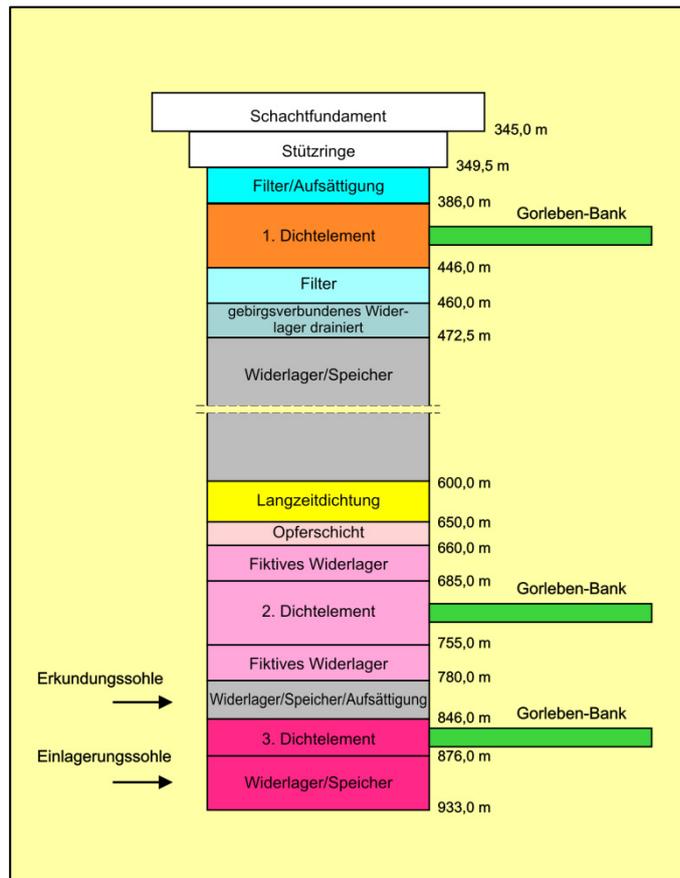


Abb. 5.16 Modifizierter Funktionsentwurf zum Schachtverschluss Gorleben 1, aus /MÜL 12a/

Das folgende **Widerlager** ist erforderlich, um Setzungen in den darüber liegenden Schachtverschlusskomponenten zu minimieren, damit die Lagestabilität des nicht eigentragfähigen Bentonits gewährleistet wird. Weiterhin soll das Widerlagermaterial Schotter als Porenspeicher für eintretende Lösungen wirken und so den Aufbau eines hydrostatischen Drucks an der Oberfläche der unterhalb folgenden Langzeitdichtung möglichst lange verzögern. Hierdurch soll ein Zeitgewinn für die Kompaktion des Salzgrusversatzes der Langzeitdichtung erreicht werden. Im oberen Teil der Speichervolumina verbleibt lange Zeit ein Luftpolster, das verhindert, dass die Lösungen von unterhalb mit den Materialien der Dichtelemente in Verbindung kommen. So kann eine gegenseitige Beeinflussung der Materialien durch Korrosion oder Alteration für die Zeitphase der Auffüllung des Speichervolumens ausgeschlossen werden.

Die Konzeption der **Langzeitdichtung** beruht auf der Überlegung, dass für den vorsorglich angenommenen Fall des Auspressens von Salzlösungen aus dem Endlagerbergwerk von unten in das Schachtverschlussystem $MgCl_2$ -reiche Lösungen zu erwart-

ten sind. Wenn diese in Kontakt mit dem zementgebundenen Salzbeton im 2. Dichtelement treten, kommt es zu dessen Korrosion und zum allmählichen Verlust seiner abdichtenden Eigenschaften. Für das Eintreten eines solchen Falles wurde bei der Konzeption des Schachtverschlusssystemes vorsorglich ein weiteres Dichtelement aus angefeuchtetem vorverdichtetem Salzgrus vorgesehen. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Langzeitdichtung zum Eintreten des oben beschriebenen Szenariums bereits soweit kompaktiert ist, dass sie im Hinblick auf die Dichtwirkung das Dichtelement aus zementgebundenem Salzbeton dadurch ersetzt, dass ein allmähliches Zusammenwachsen von Langzeitdichtung und dem verbleibenden, nicht korrodierenden Salzzuschlag des Salzbetondichtelementes erfolgt.

Tab. 5.6 Zusammenstellung der Materialspezifikationen, Mächtigkeiten und Teufelage der Funktionselemente im salinaren Teil des Schachtverschlusses Gorleben 1 (modifizierter Funktionsentwurf, aus /MÜL 12a/)

Funktionselement	Material	Dicke	Teufe u. GOK
Filter/Aufsättigung	Basaltsplitt, Kies, Sand	36,5 m	349,5 m
1. Dichtelement	Bentonit	60 m	386,0 m
Filter	Splitt, Kies, Sand	14 m	446,0 m
Gebirgsverbundenes Widerlager dräniert	Salzbeton	12,5 m	460 m
Widerlager/ Speicher	Basaltschotter	127,5 m	472,5 m
Langzeitdichtung	angefeuchteter, vorverdichteter Salzgrus	50 m	600,0 m
Opferschicht	Salzbeton	10 m	650,0 m
Fiktives Widerlager	Salzbeton	25 m	660,0 m
2. Dichtelement	Salzbeton	70 m	685,0 m
Fiktives Widerlager	Salzbeton	25 m	755,0 m
Widerlager/ Speicher/ Aufsättigung	Basalt- oder Serpentinitschotter/ technisches Bischofit	66 m	780,0 m
3. Dichtelement	Sorelbeton	30 m	846,0 m
Widerlager	Sorelbeton	57 m	876,0 m

Eine für den Salzbeton schädliche Magnesium- bzw. Sulfat-Aufsättigung im Schachtbereich oberhalb des 2. Dichtelementes ist aus verschiedenen in /MÜL 12a/ dargelegten Gründen unwahrscheinlich. Bei der Auslegung des Schachtverschlusssystemes wurde jedoch auch der Fall betrachtet, dass ausschließlich sulfatreiche Lösungen aus dem oberhalb des Salzspiegels gelegenen Gipshut mit dem 2. Dichtelement in Kontakt tre-

ten. Unter diesen Bedingungen könnten rechnerisch 952 t zementgebundener Salzbeton korrodiert werden. Aus diesem Grund wurde planerisch eine 10 m mächtige **Opferschicht** aus Salzbeton vorgesehen, die das unterhalb folgende 2. Dichtelement vor hydrochemischen Angriffen durch Gipsatlösungen schützen soll.

Aufgabe des **2. Dichtelements** aus Salzbeton ist ebenfalls die hydraulische Dichtwirkung gegenüber Deckgebirgswässern und Lösungszutritten aus der Gorleben-Bank. Gleichzeitig dient das Salzbeton-Dichtelement als (fiktives) **Widerlager**, um die Lagestabilität der darüber gelegenen Funktionselemente, insbesondere der Langzeitdichtung, zu gewährleisten. Die Dimensionierung der beiden, das 2. Dichtelement begrenzenden Salzbetonabschnitte, die diese Widerlagerfunktion ausüben sollen, wurde aus den Ergebnissen statischer Berechnungen abgeleitet. Bautechnisch handelt es sich dabei lediglich um eine entsprechende Erhöhung der Mächtigkeit des Salzbetonverschlusses, weswegen die rechnerisch zum Lastabtrag erforderlichen, jeweils 25 m langen Abschnitte als „fiktive Widerlager“ bezeichnet werden.

Das **Schotterwiderlager** soll ebenfalls setzungsbedingte Lageverschiebungen in den oberhalb befindlichen Funktionselementen verhindern. Weiterhin besteht die Aufgabe der $MgCl_2$ -Aufsättigung von Mg^{2+} -untersättigten Lösungen. Das Schotterwiderlager ist daher mit dem Bischoffit-Depot im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle hydraulisch verbunden. Hierdurch soll eine ausreichende Mg^{2+} -Aufsättigung der Lösungen, die mit dem Sorelbeton-Dichtelement seitlich in Kontakt treten, garantiert werden. Hintergrund dieser Maßnahme ist der Korrosionsschutz des unten anschließenden 3. Dichtelementes.

Das **3. Dichtelement** wurde eingeplant, um einerseits eine hydraulische Trennung der Infrastrukturbereiche der Erkundungssohle und der konzipierten Einlagerungssohle zu bewirken und andererseits die in dieser Tiefe im Schachtbereich ebenfalls auftretende Gorleben-Bank abzudichten. Als Material wurde Sorelbeton gewählt, der im Gegensatz zu Salzbeton nicht durch Mg^{2+} -haltige Lösungen angegriffen werden kann. Hintergrund für diese Materialwahl ist, dass im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle lokal das Kaliflöz Staßfurt mit Carnallit als mineralischer Hauptkomponente aufgeschlossen ist. Aufgrund der höheren Löslichkeit von $MgCl_2$ im Vergleich zu $NaCl$ musste bei den Planungen davon ausgegangen werden, dass sich Lösungen, die in diesem Bereich mit dem Kaliflöz Staßfurt in Kontakt stehen, an Magnesium anreichern. In dieser Zusammensetzung würden sie ein Dichtelement aus Salzbeton chemisch angreifen. Dagegen ist Sorelbeton langzeitstabil gegenüber $MgCl_2$ -haltigen Lösungen. Da jedoch trotz des

im Grubengebäude aufgeschlossenen Kalilagers das tatsächliche Ausmaß der Mg^{2+} -Aufsättigung am Carnallit ungewiss ist, wurde als zusätzliche Maßnahme im Verschlusskonzept das oben beschriebene Bischofit-Depot als künstlicher Magnesiumlieferant eingeplant.

Das **untere Widerlager** besteht aus den gleichen Gründen wie beim 3. Dichtelement aus Sorelbeton. Seine Aufgabe ist es, die darüber liegenden Funktionselemente des Schachtverschlusses lagestabil zu halten und die auftretenden Lasten in das Gebirge im Bereich der Schachtsohle abzutragen.

5.1.4.5 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Bei den beschriebenen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen handelt es sich um Konzeptionen, die eine Weiterentwicklung von umfangreichen vorlaufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darstellen. Der Detaillierungsgrad der Planungen wird für die Zwecke einer vorläufigen Sicherheitsanalyse generell als ausreichend angesehen. Zum Teil gehen die beschriebenen Maßnahmen auch über das konzeptionelle Stadium hinaus.

Zu technischen Verfahren zum Einbringen von trockenem Salzgrusversatz in untertägige Hohlräume wurden bereits in situ Versuche durchgeführt /BOL 12/. Zum Einbringen von angefeuchtetem Versatz in untertägige Hohlräume liegen aus dem konventionellen Bergbau (z. B. für Versatzmaßnahmen im Werra-Gebiet mit Feuchtigkeitsgehalten bis zu 3 %) bereits praktische Erfahrungen vor, die für die Einbringungstechnik in Richtstrecken noch weiter entwickelt werden müssen. Dafür sind zum einen technische Verfahren zu entwickeln, die eine homogene, jedoch geringe Durchfeuchtung des Versatzmaterials gewährleisten. Zum anderen sind entsprechende Einbringverfahren zu erproben und ggf. zu optimieren. Weiterhin sind im Rahmen von F&E-Vorhaben die thermo- und hydromechanischen Prozesse im angefeuchteten Salzgrus zur verbesserten Beschreibung des Kompaktionsverhaltens mittels Stoffgesetzen zu untersuchen.

Unabhängig vom Feuchtegehalt ist insbesondere das Prozessverständnis zur langfristigen Entwicklung der Porosität und Permeabilität eines Salzgrusversatzkörpers von Bedeutung (vgl. hierzu die Ausführungen im Zusammenhang mit der Maßnahme M6 in Kapitel 5.1.4.6). Auch für die möglichst vollständige Verfüllung des Infrastrukturbe-

reichs mit Basalt- respektive Serpentin-Schotter sind noch optimierte Einbringverfahren zu entwickeln und zu erproben. Bezüglich offener Fragen bei der Verfüllung von verrohrten Einlagerungsbohrlöchern (Variante C) wird auf Kapitel 5.1.2.2 verwiesen.

Für Strecken- und Schachtverschlüsse kann auf fortgeschrittene Planungen und zum Teil auf erprobte Komponenten von Verschlussbauwerken im Bergwerk Asse II sowie im konventionellen Salzbergbau zurückgegriffen werden. Entsprechende Ausführungen zum Stand der Erfahrungen im Bau von technischen Verschlussbauwerken sind den Abschlussberichten /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/ zu entnehmen. Die Durchführung von in situ-Versuchen mit prototypischen Verschlussbauwerken zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der technischen Machbarkeit unter realen Bedingungen wird in Anbetracht der Komplexität der Bauwerke und Prozesse dennoch für erforderlich gehalten.

Neben weiteren offenen Fragen zur Spezifizierung des hydraulischen Widerstands sowie zum Nachweis der Bauwerksintegrität, die in Kapitel 5.2.2.2 bzw. 7.2.2 behandelt werden, ergibt sich nach /MÜL 12b/ im Detail noch zu folgenden Aspekten Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

Kontaktzonen von Dicht- und Widerlagerelementen: Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen weisen häufig andere mechanische, hydraulische und chemische Eigenschaften auf als die Baustoffe selbst. Insbesondere für die hydraulischen Eigenschaften liegen derzeit sehr wenige Werte vor, die in der Regel auf In-situ-Messungen basieren. Das geochemische Verhalten von Kontaktzonen, in denen es über längere Zeiträume zu lokalisierten Materialveränderungen durch Korrosion kommen kann, ist versuchstechnisch nicht untersucht. Im Abschlussbericht /MÜL 12b/ wird der Einfluss der Korrosion für das Verschlussystem hinsichtlich eines möglichen Integritätsverlustes als gering eingeschätzt. Diese Einschätzung ist durch entsprechende Experimente noch zu belegen.

Geochemische Wechselwirkungen zwischen Betonausbau und dem Bentonit-Dichtelement: Zementphasen aus dem wasserdichten Ausbau mit Normalbeton im lösungsführenden Deckgebirge können möglicherweise die Eigenschaften von Bentonit, insbesondere sein Quellverhalten, nachteilig beeinflussen. Der Verlust der Quellfähigkeit führt ggf. zur Erhöhung der Permeabilität des Bentonits. Diese Wechselwirkung zwischen Zementphasen und Bentonit wird international im Rahmen vieler Endlagerprojekte intensiv untersucht, wurde jedoch bislang in Bezug auf die genauen Verhältnisse in den Schächten am Standort Gorleben nicht systematisch aufgearbeitet.

In /MÜL 12b/ wird der Einfluss dieser Prozesse auf die Quellfähigkeit des Bentonits als gering eingeschätzt, was jedoch durch standortspezifische Untersuchungen zukünftig noch zu belegen ist.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass an der technischen Umsetzbarkeit und der Funktionsstüchtigkeit der im Vorhaben VSG konzipierten **Verschlussmaßnahmen**, die schnellwirksamen technischen Barrieren betreffend, keine erheblichen Zweifel bestehen. Der Nachweis der technischen Umsetzbarkeit und Funktionsfähigkeit von Teilkomponenten der Verschlussmaßnahmen (z. B. Schachtdichtelemente auf Salzbetonbasis) steht jedoch noch aus, wobei zu berücksichtigen ist, dass Schachtverschlüsse im konventionellen Salzbergbau bereits erprobt sind. Weiterhin steht die oben angeführte Einschätzung unter dem gleichen Vorbehalt wie bei den Maßnahmen M4, M12 und M15, dass die planerischen Grundlagen für die Entwicklung der Verschlusskonzepte im Hinblick auf die Positionierung, die Dimensionierung und das Material der Dichtelemente dem tatsächlichen geologischen Internaufbau der Salzstruktur Gorleben entsprechen.

Für das **Versatzkonzept**, welches zur Herstellung einer langfristigen geotechnischen Barriere dient, gilt zusätzlich die Einschränkung, dass zukünftig noch nachzuweisen ist, dass der Salzgrusversatz am Ende seiner Kompaktion tatsächlich hydraulische und geomechanische Eigenschaften annimmt, die denen des intakten Steinsalzes ähneln (vgl. entsprechende Ausführungen am Ende des Kapitels 5.1.4.6).

5.1.4.6 Umsetzung der Anforderungen des Sicherheitskonzepts an die Verschlusskomponenten

Maßnahme M5: Anforderungen an Schacht- und Streckenverschlüsse

Entsprechend der Maßnahme M5 muss der hydraulische Widerstand der Verschlussbauwerke in den Tagesschächten und in den Zugangsstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereichen so bemessen sein, dass ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen verhindert bzw. zumindest soweit begrenzt wird, dass es im Sinne der Sicherheitsanforderungen nicht zu unzulässigen Freisetzungen von gelösten Radionukliden oder zu einem korrosionsbedingten Gasdruckaufbau kommt, durch den die Integrität der geologischen Barriere gefährdet wird. Diese Anforderung besteht so lange, bis der Salzgrusversatz aufgrund seiner fortgeschrittenen

Kompaktion die Barrierenwirkung der geotechnischen Verschlussbauwerke übernommen hat. Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke werden Lastfälle von möglichen beeinflussenden Prozessen, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zugrunde gelegt.

Mit der Maßnahme M5 sind dabei folgende sicherheitsrelevante Aspekte zur Anforderung zum Erhalt der Barrierenwirkung der Schacht- und Streckenverschlüsse (Langzeitstabilität) während ihrer Funktionsdauer zu betrachten:

- hydraulische Widerstände der Funktionselemente,
- Funktionsdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse,
- Prozesse und Ereignisse, die die Sicherheitsfunktionen der Schacht- und Streckenverschlüsse beeinträchtigen können,
- Umläufigkeiten bzgl. der Funktionselemente (Auflockerungszone und Gorleben-Bank) und
- Qualitätssicherungsmaßnahmen beim Bau der Schacht- und Streckenverschlüsse.

Die konzeptuelle Auslegung des Verschlusssystems erfolgte durch eine Vorbemessung, die in /MÜL 12a/ dokumentiert ist. Die Vorbemessung eines Bauwerks wird am Anfang bautechnischer Planungen vorgenommen; eine endgültige Bemessung eines Bauwerks kann ingenieurtechnisch erst nach Abschluss aller Planungsstadien erfolgen. Auf der Grundlage der Vorbemessung wurde eine vertiefte Nachweisführung vorgenommen, die in /MÜL 12b/ dokumentiert ist und deren Ergebnisse im Zusammenhang mit der Umsetzung des Nachweiskonzeptes des Vorhabens VSG in Kapitel 5.2.2.2 diskutiert werden.

Hydraulische Widerstände der Funktionselemente: Für den Entwurf der Verschlusssysteme wurden zunächst die hydrogeologischen Randbedingungen im Bereich der Schächte eruiert. Im Bereich der Schächte Gorleben 1 und Gorleben 2 treten im Deckgebirge mehrere Grundwasserstockwerke auf, in denen die Salinität der Grundwässer mit zunehmender Tiefe bis zur vollständigen Sättigung zunimmt. Im Bereich des Deckgebirges ist in beiden Schächten ein wasserdichter Ausbau bereits heute vorhanden.

Innerhalb der Salzstruktur sind die in Kap 5.1.4 beschriebenen, aus verschiedenen Dicht- und Speicherelementen aufgebauten Schachtverschlüsse vorgesehen, um den Lösungszutritt aus dem Deck- und Nebengebirge so weit zu begrenzen, dass allenfalls geringe Mengen an Lösungen in das Grubengebäude eindringen können. Die Spezifizierung der hydraulischen Widerstände der Dichtkörper erfolgte unter Berücksichtigung der Kontakt- und der Auflockerungszonen unter Standortbedingungen.

Die Funktionselemente des Schachtverschlusses, deren Material- und Geometrieigenschaften in /MÜL 12b/ dargestellt werden, sind gegen die zu erwartenden Fluiddrücke (hydrostatischer Druck der Wassersäule, der auf den Funktionselementen lasten kann) ausgelegt. Die zu gewährleistende integrale Permeabilität, die der Vorbemessung zugrunde lag, wurde mit $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ angesetzt. Nach der Detailplanung der einzelnen Funktionselemente ergab sich aufgrund der geringen Durchlässigkeit des 2. Dichtelementes und der Langzeitdichtung (nach Kompaktion) eine um Größenordnungen geringere integrale Permeabilität (Tab. 5.7).

Tab. 5.7 Auslegungsgrößen der Funktionselemente nach /MÜL 12a/

Funktionselement	Material	Permeabilität [m²]	Porosität [%]
Filter/Aufsättigung	Basaltsplitt, ggf. Kies, Sand	$10^{-10} - 10^{-12}$	25 – 35
1. Dichtelement	Bentonit	integral: $1 \cdot 10^{-17}$	27 – 34
Filter	Splitt, Kies, Sand	$10^{-10} - 10^{-12}$	25 – 35
Widerlager 1 dräniert	Salzbeton	wie Schotter $10^{-10} - 10^{-12}$	10
Speicher (Schotter 1)	Basaltschotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	23 oder 38
Langzeitdichtung	feuchter Salzgrus	$10^{-13} - 10^{-15}$ ¹⁾	10 ¹⁾ (durch Kompaktion Reduktion)
Widerlager 2	Salzbeton	Salzbeton $2 \cdot 10^{-15}$	10
2. Dichtelement	Salzbeton	integral: $7 \cdot 10^{-19}$	10
Widerlager 3	Salzbeton	integral: $7 \cdot 10^{-19}$	10
Speicher (Schotter 2)	Basalt-/ Serpentinitschotter	$10^{-7} - 10^{-9}$	38
3. Dichtelement	Sorelbeton	integral: $5 \cdot 10^{-17}$	16 – 24 ¹⁾ (durch Quellen Reduktion)
Widerlager 4	Sorelbeton	Sorelbeton $5 \cdot 10^{-17}$	16 – 24 ¹⁾ (durch Quellen Reduktion)

¹⁾ Anfangspermeabilität bzw. -porosität, weitere Informationen zu den Auslegungsgrößen in /MÜL 12a/.

Die Streckenverschlüsse wurden aus Gründen der Langzeitstabilität analog zum dritten Dichtelement des Schachtverschlusses aus Sorelbeton mit einer integralen Permeabilität von $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ausgelegt. Die Konstruktion der Streckenverschlüsse lehnt sich an die bereits bautechnisch umgesetzten Strömungsbarrieren (Abdichtbauwerke) in der Schachanlage Asse II an /MÜL 12a/.

Für die Erfüllung der mit der Maßnahme M5 verbundenen Forderung, ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu ver- bzw. behindern, spielen nicht nur die oben genannten hydraulischen Eigenschaften der Dichtelemente in den Schacht- und Streckenverschlüssen, sondern auch die im Verschlusskonzept vorgesehenen Speicherelemente eine wesentliche Rolle. Dies betrifft neben den im Schachtverschlusssystem vorgesehenen Speicherelementen insbesondere das Konzept der Verfüllung des Infrastrukturbereichs mit setzungsarmem Schotter (s. Kap. 5.1.4.2). Die außerhalb des Hauptsalzes möglicherweise salzstockintern vorhandenen und zu betrachtenden Lösungen (Formationswässer) von maximal 5.100 m^3 , die in den

Infrastrukturbereich zutreten /WOL 12b/, können dort durch das Speichervolumen im Porenraum des Schotters konstruktiv beherrscht werden.

Funktionsdauer der Schacht- und Streckenverschlüsse: Wie nachfolgend im Zusammenhang mit den Maßnahmen M6, M8 und M16 dargestellt, wird nach heutigem Kenntnisstand davon ausgegangen, dass unter Endlagerbedingungen die Kompaktion des Salzgrusversatzes bis zu dessen hydraulischer Dichtwirkung maximal 1.000 Jahre dauert /MÖN 12/. Nach dem Stand von Wissenschaft und Technik wird davon ausgegangen, dass die Porosität des Salzgrusversatzes danach so gering ist, dass die versetzten Bereiche die hydraulische Barrierenwirkung der Strecken- und Schachtverschlüsse ersetzen können. Da ab diesem Zeitpunkt der sichere Einschluss der in den radioaktiven Abfällen enthaltenen Radionuklide durch den Salzgrusversatz im Verbund mit der geologischen Barriere bewirkt wird, werden dann die Schacht- und Streckenverschlüsse als schnellwirksame Barrieren sicherheitskonzeptionell im Prinzip als nicht mehr relevant angesehen.

Aufgrund der Ungewissheiten zur Kompaktionsgeschwindigkeit des Salzgrusversatzes (s. nachfolgende Ausführungen zu den Maßnahmen M6, M8 und M16) sieht das Verschlusskonzept des Vorhabens VSG jedoch eine weit über 1.000 Jahre hinausreichende Funktionsdauer von 50.000 Jahren für die Schacht- und Streckenverschlüsse vor. Die Bemessung der Funktionsdauer ergab sich aus dem Umstand, dass für den Schachtverschluss die hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge von grundlegender Bedeutung sind. Da eine Prognose der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge während und nach der nächsten Eiszeit nicht möglich ist, wurde der Funktionszeitraum des Verschlusssystem auf den Zeitraum bis zur nächsten Eiszeit beschränkt, die gemäß geologischer Langzeitprognose frühestens in ca. 50.000 Jahren auftritt /MRU 11/. Auch nach diesem Zeitpunkt kann das Verschlusssystem durchaus noch funktionstüchtig sein, es bestehen lediglich vom Sicherheitskonzept her keine Anforderungen an die hydraulische Wirksamkeit seiner Komponenten.

In der Auslegung orientiert sich die Funktionsdauer an der Länge der im Stilllegungsverfahren zum Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) geplanten Streckenabdichtungen von 26 m, für die im Zeitraum von 25.000 Jahren ein korrosionsbedingter Durchbruch nicht zu erwarten ist. Um einen Zeitraum von 50.000 Jahren abzudecken wurde in der Summe die wirksame Länge der Dichtelemente aus Salzbeton auf 50 m vergrößert, d. h. in etwa verdoppelt /MÜL 12a/.

Die Ergebnisse zum Nachweis der Dauerhaftigkeit der Schachtverschlussbauwerke sind in Kapitel 5.2.2.2 zusammenfassend und in /MÜL 12b/ ausführlich dargestellt.

Prozesse und Ereignisse, die die Sicherheitsfunktionen der Schacht- und Streckenverschlüsse beeinträchtigen können: An die Schacht- und Streckenverschlüsse wird die Anforderung der Langzeitstabilität gegenüber Prozessen gestellt, die die Verschlussbauwerke innerhalb ihres Funktionszeitraums beeinträchtigen können. In /MÜL 12a/ wurden im Rahmen der Vorbemessung die einzelnen Prozesse, die die Sicherheitsfunktionen der Schacht- und Streckenverschlüsse beeinflussen können, analysiert.

Hieraus ergaben sich nachstehende Anforderungen an die Vorbemessung:

- Die chemischen Einwirkungen müssen soweit beherrschbar sein, dass keine maßgebliche Permeabilitätserhöhung oder eine mechanische Beeinträchtigung (z. B. durch Festigkeitsverlust) erfolgt (chemische Vorbemessung, siehe hierzu Ausführungen zur Umsetzung der Maßnahme M9).
- Die mechanischen Einwirkungen (u. a. Erdbeben) müssen soweit beherrschbar sein, dass keine maßgeblichen Rissbildungen oder Auflockerungen mit der Folge signifikanter Permeabilitätserhöhung entstehen (mechanische Vorbemessung, Ergebnisse s. Kap. 5.2.2.2).
- Das Verschlussystem muss geeignet sein, das Entwurfsziel „kein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen“ zu erfüllen (hydraulische Vorbemessung, Ergebnisse s. Kap. 5.2.2.2).

Weiterhin besteht hinsichtlich der thermischen Einwirkungen infolge der eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle auf die Schacht- und Streckenverschlüsse die Anforderung, dass die durch thermische Expansion und Kontraktion verursachten Zwangsverformungen/Zwangsspannungen nicht Sicherheitsfunktionen der Verschlussysteme beeinträchtigen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verschlussystem einen hinreichenden Widerstand gegen einen korrosionsinduzierten Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen aufweist, wenn eine zusätzliche Salzbeton-Opferschicht von 10 m Dicke eingebracht wird. Die auftretende Korrosion konzentriert sich dann auf die Opferschicht bzw. wird durch das geplante Bischoffitdepot im Vorfeld vermieden. Dies gilt auch im Falle der durch die wärmeent-

wickelnden Abfälle zu erwartenden, erhöhten Temperaturen. Alterationsprozesse im Bentonit (z. B. Illitisierung) verlaufen nach /MÜL 12a/ unter den thermischen und geochemischen Bedingungen in den Schächten Gorlebens sehr langsam und werden deshalb als vernachlässigbar angesehen.

Die für die mechanische Vorbemessung verwendeten Rechenmodelle basieren auf analytischen Ansätzen. Ausgangspunkt aller Ansätze sind Betrachtungen zum statischen Gleichgewicht am starren Körper, Verformungen werden – sofern erforderlich – im Nachgang durch Einsetzen der konstitutiven Beziehung aus den Spannungsverteilungen ermittelt.

Im Rahmen der mechanischen Vorbemessung erfolgte eine Abschätzung

- der Tiefe der Auflockerungszone zur Bestimmung der Nachschnitttiefe,
- der erforderlichen Widerlagerlänge für kohäsive Widerlagerelemente,
- der Setzungen der Filterschicht in Folge der Auflast und der zusätzlichen Setzungen unter Erdbebenbelastung.

Die Einwirkungen des Gebirgsdruckes bzw. der Gebirgsauflast und der hydraulische Druck der Deckgebirgswässer stellen aufgrund ihrer Größe zu beherrschende Einwirkungen dar, wodurch infolge Rissbildung oder Auflockerung mechanisch induzierten Beeinträchtigungen der geplanten hydraulischen Widerstände der Schacht- und Streckenverschlüsse konstruktiv entgegengewirkt werden kann.

Die Ermittlung der erforderlichen Nachschnitttiefe im Bereich der Auflockerungszone erfolgt an den „mittleren“ Positionen der Dichtelemente, so dass noch eine maßvolle Veränderung der Lage der Dichtelemente möglich ist. Hierbei werden für die beiden oberen Dichtelemente „mittlere“ Positionen der Abschnitte jeweils ober- und unterhalb der Gorleben-Bank angegeben.

Die beiden kohäsiven Dichtelemente aus Salz- und Sorelbeton weisen unter Berücksichtigung der zusätzlichen Widerlagerlänge jeweils einen ausreichenden Widerstand gegen einen mechanisch durch Rissbildung induzierten Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern auf. Dies gilt sowohl für den Baukörper als auch für die Kontaktzone. Ohne Rissbildung findet keine dilatante Auflockerung statt und die Verformungen bleiben beschränkt. Die Tragfähigkeit ist damit konstruktionsbedingt implizit gegeben (vgl. Kap. 5.2.2.2). Zur Ermittlung der Setzung der Filterschicht und der

Schottersäule wird konservativ für die Verfüllsäule oberhalb des Bentonitdichtelementes die Auflast des Deckgebirges (Überlagerungsdruck) zugrunde gelegt. Weiterhin wird ein klimabedingter Meeresspiegelanstieg von 50 m berücksichtigt. Für die Schottersäule werden nur geringe Setzungen von 2 cm ermittelt. Die Gesamtsetzung beträgt rechnerisch 29 cm, die das 60 m mächtige Bentonit-Dichtelement aufgrund der geringen potenziellen Auflockerungen schadlos aufnehmen kann.

Hinsichtlich der Abschätzung der zusätzlichen Setzung der Schottersäule unter Erdbebenbelastung lässt sich feststellen, dass mögliche Setzungen des hierfür empfindlichen, da nicht eigentragfähigen 1. Dichtelementes aus Bentonit durch die Anordnung des zusätzlichen, dränierten Widerlagers soweit beschränkt bleiben, dass ein durch Auflockerung induzierter Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen durch das Bentonit-Dichtelement auch im Falle einer zusätzlichen Einwirkung durch Erdbeben ausgeschlossen werden kann.

Bei der hydraulischen Vorbemessung wurde überprüft, ob das Verschlussystem unter den wahrscheinlichen Bedingungen (ständige Bemessungssituation) das Entwurfsziel erreicht. Zur Vorbemessung wurden Rechenmodelle verwendet, beruhend auf einfachen analytischen Ansätzen, zur Abschätzung und Ermittlung

- der Durchbruchzeit von Salzlösung durch das Bentonitdichtelement,
- des Durchflussvolumens an Lösung durch das Bentonitdichtelement und
- der Zeitdauer bis zur Auffüllung des anschließenden Speichervolumens.

Nach dem Ergebnis der hydraulischen Auslegungsrechnungen /MÜL 12a/ gelangen innerhalb von 100.000 Jahren ca. 10.000 m³ Lösung in den mit Schotter versetzten Infrastrukturbereich. Dieser ist damit erst teilgesättigt, es baut sich somit innerhalb des oben genannten Zeitraums kein hydrostatischer Druck an den Streckenabdichtungen auf. Auch ein sich in den Einlagerungsbereichen entwickelnder Gasdruck führt nicht zu einer Änderung der Eigenschaften des Schachtverschlusses, da der Gasdruck im Speichervolumen des Infrastrukturbereiches soweit reduziert wird, dass die Integrität des Schachtverschlusssystemes nicht gefährdet wird.

Die Ergebnisse der Rechnungen zum weniger wahrscheinlichen Alternativszenarium des Schachtverschlussversagens (außergewöhnliche Bemessungssituation) zeigten, dass im Lauf der Zeit Lösungen entsprechend den Strömungswiderständen in die

Funktionselemente eindringen. Diese Lösungen fließen weiter in den Infrastrukturbereich. Die Verzögerungswirkung der Speichervolumina in den einzelnen Komponenten des Schachtverschlusses führt dazu, dass in diesem Fall der Infrastrukturbereich rechnerisch erst nach 2.700 Jahren aufgefüllt ist /MÜL 12a/ und der hydraulische Druck an den Streckenabdichtungen sich entsprechend spät aufbaut. Nach heutigem Kenntnisstand /POP 12/, der noch abschließend zu belegen ist, hat zu diesem Zeitpunkt die Salzgruskompaktion eine Porosität von ca. 1 % erreicht, so dass der Versatz seine volle Barrierenwirkung aufweist.

Zur Vorbemessung der Streckenverschlüsse wurden Plausibilitätsbetrachtungen auf Basis der im Rahmen der Vorsorge- und Notfallmaßnahmen für das Bergwerk Asse bereits gebauten bzw. geplanten Strömungsbarrieren durchgeführt. Diese waren darauf ausgelegt, nach 2 bis 3 Jahren Standzeit einseitigen Druck bis zu 1 MPa sowie bei vergleichsweise hohen Druckaufbauzeiten (Lösung) nach 30 bis 100 Jahren Drücke von bis zu 12 MPa, allerdings bei nur geringen Differenzdrücken von weniger als 1 MPa, schadlos aufzunehmen. Bei dem Entwurf der im Vorhaben VSG entwickelten Streckenverschlüsse wurde davon ausgegangen, dass die oben genannten Bedingungen vergleichbar oder konservativ sind, was im Rahmen der vertieften Nachweisführung /MÜL 12b/ (s. Kap. 5.2.2.2) zu überprüfen war.

Das Versagen eines Streckenverschlusses und das Versagen eines Schachtverschlusses sind voneinander unabhängige Prozesse. Das gleichzeitige Versagen dieser Bauwerke braucht daher laut /BMU 10a/ im Rahmen der Vorbemessung nicht betrachtet zu werden. Bei einer Vorbemessung des Streckenverschlusses mit unterstelltem Versagen dieses Verschlusses wäre der dann als intakt unterstellte Schachtverschluss allein in der Lage, den Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den radioaktiven Abfällen zu unterbinden.

Hydraulische Umläufigkeit: Bei der Spezifizierung der hydraulischen Widerstände der Funktionselemente als Ausfluss der integralen Anforderungen an die Schacht- und Streckenverschlüsse wurden neben den hydraulischen Widerständen der Dichtkörper auch die Permeabilitäten der Kontaktzonen und der Auflockerungszonen mit betrachtet.

An den Lokationen der vorgesehenen Dichtelemente sollen nach den in /MÜL 12a/ vorgestellten Planungen der Ausbau entfernt und die Dichtelemente zeitnah eingebracht werden, um Umläufigkeiten zu verhindern. Ein hydraulischer Bypass der

Schachtverschlüsse, der durch das anstehende Gebirge, vor allem durch das mehrmalige Ausstreichen der Gorleben-Bank in den Schachtaufschlüssen ggf. verursacht werden könnten, wird durch die darauf ausgerichtete Positionierung der drei Dichtelemente im Schacht verhindert.

Qualität der Schacht- und Streckenverschlüsse: Damit die Schacht- und Streckenverschlüsse auslegungskonform die geforderten Eigenschaften nach dem Bau erreichen bzw. diese über ihre Funktionsdauer beibehalten, wurde im Rahmen der Vorbemessung auch auf Qualitätssicherungsmaßnahmen eingegangen. Das Verschlussystem aus Schachtverschlüssen und Streckenverschlüssen, die als geotechnische Bauwerke eingestuft werden, unterliegen den in /CEN 09/ und /CEN 10/ beschriebenen Qualitätsanforderungen.

Fazit:

Die Ergebnisse der Analysen der Vorbemessung ergaben, dass unter den berücksichtigenden Prozessen die Strecken- und Schachtverschlüsse während ihrer Funktionsdauer ihre Sicherheitsfunktionen beibehalten. Die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse der Analysen zur entsprechenden Nachweisführung der Dauerhaftigkeit erfolgt in Kapitel 5.2.2.2.

Für die ständige Bemessungssituation (Referenzszenarium) kann festgestellt werden, dass kein Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern durch die Schächte bis zu den radioaktiven Abfällen auftritt. Für diese Aussage ist ingenieurtechnisch eine ausreichende Zuverlässigkeit gegeben, da die Vorbemessung und die vertiefte Nachweisführung (Kap. 5.2.2.2) zeigen, dass die verschiedenen Komponenten nur in geringem Umfang beansprucht werden. Im Falle der außergewöhnlichen Bemessungssituation Streckenverschlussversagen (Alternativszenarium) gilt dies ebenfalls, da der Schachtverschluss in Verbindung mit dem Infrastrukturbereich in der Lage ist, den Zutritt von Lösungen zu den Streckenverschlüssen soweit zu unterbinden, dass keine relevanten Lösungsmengen an den Streckenverschlüssen anstehen, bevor der Salzgrusversatz eine ausreichende Barrierenwirkung entfaltet hat. Der Schachtverschluss bewirkt somit im Zusammenwirken mit dem Speicherglied Infrastrukturbereich eine hinreichende Verzögerung des Zutritts von Salzlösung, so dass gewährleistet ist, dass der Salzgrusversatz bis zu seiner hydraulischen Dichtwirkung kompaktieren kann, ohne dass es vorher zu Lösungszutritten zu den Abfällen kommt.

Anzumerken ist, dass das Konzept der Abdichtung der Gorleben-Bank durch Dichtelemente nur dann sinnvoll ist, wenn die Gorleben-Bank selbst nicht im Infrastrukturbereich der Einlagerungssohle aufgeschlossen ist. Ein erneuter Aufschluss der Gorleben-Bank in geringer Entfernung zum Schacht Gorleben 1 durch den Infrastrukturbereich der Einlagerungssohle kann gemäß heutigem Stand der Erkundung bei Anbindung des Infrastrukturbereichs in südöstlicher Richtung vermieden werden (Nachtrag zur Konkretisierung der Vorbemessung für den Schachtverschluss Gorleben 1 in /MÜL 12a/). Anderenfalls käme es – sofern für diese geologische Einheit eine erhöhte Leitfähigkeit für Lösungen zu unterstellen ist²⁹ – unter Umgehung der Dichtelemente zu einem direkten Lösungszutritt in den mit Schotter verfüllten Infrastrukturbereich und ggf. zu einem frühen Druckanstieg an den schachtseitigen Stirnflächen der Streckenabdichtungen. Dieser Aspekt muss im Fall der Auffahrung und Erkundung der Einlagerungssohle untersucht werden und ggf. in einem späteren Verschlusskonzept (z. B. durch eine gezielte Abdichtung der entsprechenden Streckenabschnitte, in denen die Gorleben-Bank aufgeschlossen ist) berücksichtigt werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass unter Voraussetzung der Gültigkeit der Annahmen zu Geschwindigkeit und hydraulischem Endzustand der Salzgruskompaktion für das Referenzszenarium und das Alternativszenarium „Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses“ die Maßnahme M5 auf konzeptioneller Basis konsequent umgesetzt wurde. Bezüglich einer genehmigungsreifen technischen Umsetzung der Schacht- und Streckenverschlussbauwerke unter Praxisbedingungen besteht dagegen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf (vgl. hierzu Kap. 5.1.4.4). Die Herstellbarkeit des Verschlussystems liegt jedoch wegen bereits existierender Prototypen und Bauwerke nahe /MÜL 12a/.

Maßnahme M9: Materialdiversität der Schachtverschlussbauwerke

Das Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG gibt vor, dass die Schachtverschlussbauwerke so ausgelegt werden, dass ihre Dichtwirkung auf mehreren Dichtelementen aus unterschiedlichen Materialien beruht, die aufgrund ihres jeweiligen Aufbaus teilweise diversitäre Funktionsweisen besitzen.

²⁹ Wie bereits in Kapitel 5.1.4.4 erwähnt, weisen neuere Erkenntnisse aus der nach 2010 fortgesetzten Erkundung darauf hin, dass die Gorleben-Bank u. a. aufgrund von halokinetisch bedingten Zerscherungen und Mächtigkeitsschwüngen als hydraulisch gering leitfähig anzunehmen ist /HAM 12/.

Wie in Kapitel 5.1.4.4 dargestellt, weist das im Vorhaben VSG entwickelte Schachtverschlussystem vier Dichtelemente auf, die aus unterschiedlichen Materialien bestehen:

- Oberes Dichtelement: Bentonit,
- Langzeitdichtung: angefeuchteter, vorkompakter Salzgrusversatz,
- Mittleres Dichtelement: Salzbeton,
- Unteres Dichtelement: Sorelbeton.

Der Grund für die Forderung nach unterschiedlichen Materialien für die Dichtelemente des Schachtverschlussystems liegt primär in den Ungewissheiten bei der Prognose der tatsächlichen chemischen Zusammensetzungen der Lösungen, die mit den Dichtelementen in Kontakt treten werden. Zusätzlich wurden im Schachtverschlusskonzept weitere Maßnahmen (Bischofitdepot, Opferschicht) eingeplant, die zu einer gezielten, positiven Beeinflussung des hydrochemischen Milieus der Kontaktlösungen im Sinne eines Korrosionsschutzes der Dichtelemente führen sollen. Zusammenfassend werden die potenziellen Gefahren für die vier Dichtelemente durch korrosionsaggressive Lösungszusammensetzungen und die entsprechenden Gegenmaßnahmen in Tab. 5.8 dargestellt.

Aufgrund der Materialwahl und der Anordnung der Dichtelemente sowie unter Berücksichtigung der in Tab. 5.8 dargestellten Gegenmaßnahmen besteht theoretisch nur in einem einzigen Fall die Möglichkeit des (teilweisen) Ausfalls eines Dichtelementes infolge hydrochemisch bedingter Korrosion. Dieser Fall wäre dann gegeben, wenn es zum Auspressen von NaCl-haltigen Lösungen aus dem Grubengebäude in das unterste Dichtelement käme. Hierdurch würde der Sorelbeton des 3. Dichtelementes zumindest partiell zersetzt. Für diesen Fall ist jedoch im Sinne einer Funktionsredundanz die Langzeitdichtung aus vorkompaktiertem Salzgrusversatz vorgesehen, die unempfindlich gegenüber NaCl-haltigen Lösungen ist. Selbst wenn man außer Acht lässt, dass aufgrund der Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse (s. /LAR 13/ und Kap. 5.2.3) auch im Fall eines unterstellten integralen Schachtverschlussversagens keine Lösungen von unten in die Schachtabdichtungen eingepresst werden, würden in jedem Fall mindestens drei der im Verschlusskonzept vorgesehenen Dichtelemente langzeitstabil und damit im Hinblick auf ihre Dichtwirkung funktionstauglich bleiben.

Tab. 5.8 Potenzielle Angriffe der vier Dichtelemente durch korrosionsaggressive Lösungszusammensetzungen und entsprechende Gegenmaßnahmen

Dichtelement	Material	Angriff durch	Gegenmaßnahme
1. Dichtelement	Bentonit	Zementphasen aus dem wasserdichten Schachtausbau aus Normalbeton im lösungsführenden Deckgebirge. Reduktion der Quelfähigkeit des Bentonits	Keine. Der Effekt wird in /MÜL 12a/ als vernachlässigbar eingestuft. Diese Einschätzung ist durch standortspezifische Untersuchungen noch zu belegen.
Langzeitdichtung	angefeuchteter, vorverdichteter Salzgrus	gering mineralisierte Lösungen	NaCl-Aufsättigung von Deckgebirgwässern an der Salzkontur oberhalb des 1. Dichtelementes und in der Opferschicht oberhalb des 2. Dichtelementes. Bei Lösungen, die aus dem Grubengebäude ausgepresst werden ist NaCl-Sättigung aufgrund einer ausreichenden Kontaktdauer mit Steinsalz zu unterstellen.
2. Dichtelement	Salzbeton	gering mineralisierte SO_4^{2-} und Mg^{2+} -haltige Lösungen	NaCl-Aufsättigung von Deckgebirgwässern an der Salzkontur oberhalb des 1. Dichtelementes und in der Opferschicht oberhalb des 2. Dichtelementes.
3. Dichtelement	Sorelbeton	NaCl-haltige Lösungen	Mg^{2+} -Anreicherung am Carnallit in der Erkundungssohle im Zusammenwirken mit dem Bischofitdepot. Langzeitdichtung für den Fall von NaCl-Lösungen, die aus dem Grubengebäude ausgepresst werden.

Fazit:

Aus den oben genannten Gründen wird davon ausgegangen, dass das im Vorhaben VSG entwickelte Schachtverschlussystem durch die Materialwahl und die Anordnung der Dichtelemente in Verbindung mit den beschriebenen Gegenmaßnahmen in seiner Gesamtheit unempfindlich gegenüber einem korrosiven Angriff durch Lösungen ist. Diese Aussage gilt für alle unter den gegebenen Standortbedingungen erdenklichen hydrochemischen Lösungszusammensetzungen. Aufgrund der hohen hydraulischen Widerstände würden die im Zusammenhang mit der Maßnahme M5 verbundenen Forderungen auch dann erfüllt, wenn es zu einem korrosionsbedingten Versagen eines der vier Dichtelemente käme, womit eine Funktionsredundanz gegeben ist. Insofern weist das konzipierte Schachtverschlussystem bezüglich zukünftiger Entwicklungen eine hohe Robustheit auf. Aufgrund der obigen Ausführungen erscheint auch das im

Rahmen der Szenarienentwicklung und in den Systemanalysen im Vorhaben VSG unterstellte gleichzeitige hydraulische Versagen aller Schachtdichtelemente wenig realistisch. Selbst in diesem Fall ist nach den Ergebnissen der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/ ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen auszuschließen, wobei dies allerdings auch auf die rückhaltende Sicherheitsfunktion des schotterversetzten Infrastrukturbereiches als Speicherelement zurückzuführen ist (Kap. 5.2.3). Insofern weist das konzipierte Schachtverschlussystem in Verbindung mit weiteren Verschluss- und Verfüllmaßnahmen bezüglich zukünftiger Entwicklungen eine hohe Robustheit auf. Da implizit die Maßnahme M9 über die Forderung nach Materialdiversität der Schachtverschlussbauwerke auf die Robustheit des Barrierensystems abzielt, wird diese Maßnahme als auf konzeptioneller Basis konsequent umgesetzt angesehen. Bezüglich einer genehmigungsreifen technischen Umsetzung des Schachtverschlussbauwerks unter Praxisbedingungen besteht dagegen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf (vgl. hierzu Kap. 5.1.4.4).

Maßnahme M6: Anforderungen an Salzgrusversatz in den Einlagerungsbereichen,

Maßnahme M8: Minimierung der abfallnah eingebrachten Feuchtigkeitsmenge (Salzgrusversatz),

Maßnahme M16: Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes zur Minimierung der Gasbildung

Die Maßnahme M6 zielt darauf ab, im Zusammenhang mit der Hohlraumkonvergenz einen schnellen allseitigen Einschluss der Abfallgebinde in den Einlagerungsfeldern zu erreichen. Dadurch sollen ein Lösungszutritt zu den Abfällen und eine Freisetzung von Radionukliden dauerhaft ver- bzw. behindert werden (sicherer Einschluss, Grundanforderung Einschlussgedanke, Kap. 4.1.2.1).

Ziel der Maßnahmen M8 und M16 ist es, durch die Begrenzung der Restfeuchte des Salzgrusversatzes und ggf. durch die Verwendung entsprechender Behältermaterialien die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im Endlager zu begrenzen. Die Feuchtigkeits- bzw. Lösungsmenge ist dabei der limitierende Faktor bei der Korrosion und der Gasbildung, da genügend Metall für die Korrosion zur Verfügung steht. Durch eine Korrosionsbegrenzung sollen die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbauraten in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert werden, dass in der geologischen Barriere (Komponente C) keine Risse entstehen, die zu einem Integritätsverlust der geologischen Barriere führen (Grundanforderung B – Integritätsgedanke in Kapitel 4.1.2.2). Aus beiden Maßnahmen leitet sich die

Forderung zur Einbringung eines Versatzstoffes ab, dessen geringe Eigenfeuchtigkeit die abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit auf ein Minimum reduziert.

Da alle drei Maßnahmen Anforderungen an den Salzgrusversatz in den Einlagerungsfeldern inklusive der Querschläge stellen und daher inhaltlich eng miteinander verknüpft sind, werden sie hier zusammen behandelt.

Mit zunehmendem Kompaktionsgrad steigt die Wärmeleitfähigkeit des Versatzmaterials an. Diese bewirkt die Abfuhr der Zerfallswärme von den Behälteroberflächen in das Wirtsgestein. Gleichzeitig führt der durch den Salzgrusversatz im Vergleich zu unvertigten Grubenbauen früher einsetzende Stützdruck zur Verheilung der konturnahen Auflockerungszone im Hauptsalz und zur Reduzierung der im Gebirge herrschenden Differenzspannungen. Der Versatz hält das Abfallgebände in Position und bewirkt durch die allseitige Kompaktion einen Kraftschluss zwischen Abfallgebände und Wirtsgestein. Außerdem wird durch die Einbringung von Versatz der initiale Hohlraum, der maximal mit Lösung erfüllt werden kann, erheblich reduziert.

Ausgehend von der derzeit vorliegenden experimentellen Datenbasis kommt /POP 12/ zur Einschätzung, dass beanspruchungsdominierte und zeitabhängige Kompaktionsprozesse innerhalb eines Zeitraumes von weniger als tausend Jahren zu einer vollständigen Kompaktion von Salzgrus unter Berücksichtigung der Messungengenauigkeit und des Einschlusses vorhandener Fluide zu einer Porosität von $1 \pm 1 \%$ führen. Für die im Vorhaben VSG durchgeführten Integritäts- und Konsequenzenanalysen /KOC 12/, /LAR 13/ stellt diese Restporosität als Endzustand der Kompaktion eine Grundannahme und Randbedingung dar. Grundlage der Parameterermittlung für die Berechnung der Kompaktion des Salzgrusversatzes waren Ergebnisse aus Rechnungen mit Code_Bright zum Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz bei verschiedenen Temperatureinwirkungen in den Strecken des Endlagers, die in /CZA 12a/ zusammengestellt wurden.

In der Nähe der wärmeentwickelnden Abfälle, d. h. im nordöstlichen Einlagerungsbe- reich, wird die Salzgruskompaktion durch dort erhöhten Temperaturen beschleunigt. Der Einfluss der Parameter Wärme und Feuchtigkeit auf die im Rahmen der radiologi- schen Konsequenzenanalyse errechneten Kompaktionsgeschwindigkeiten sind in der Abb. 5.17 illustriert.

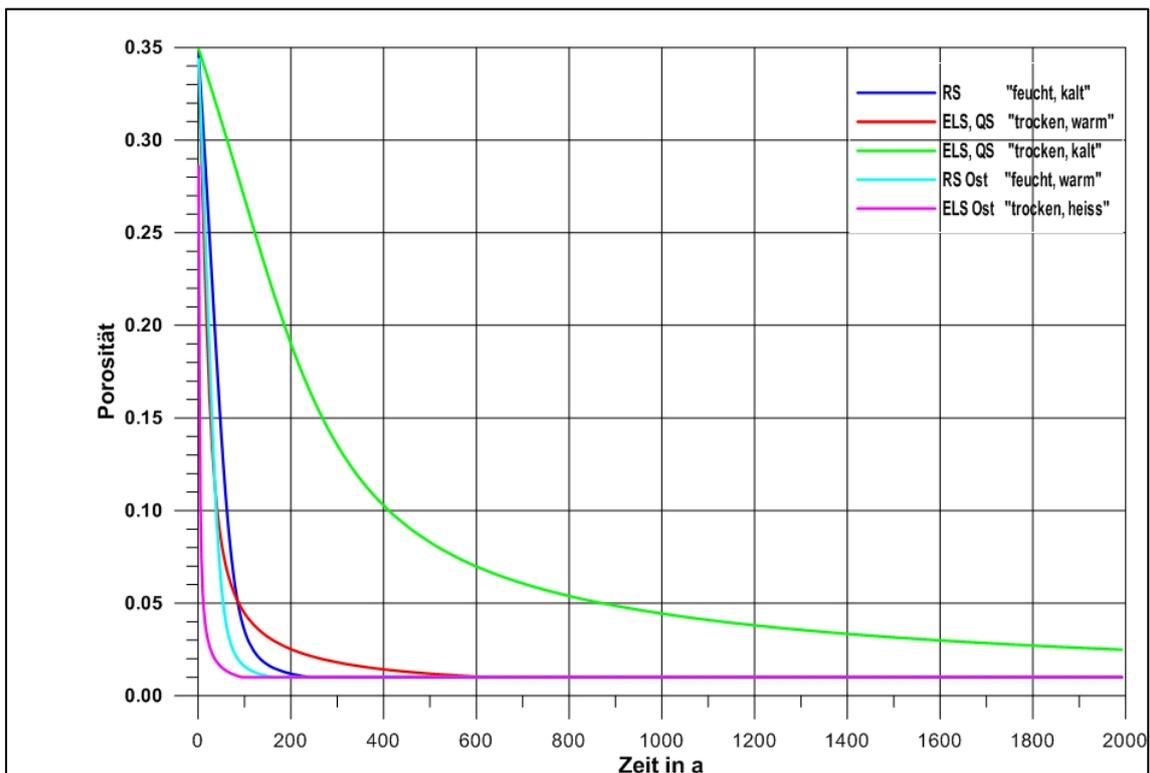


Abb. 5.17 Entwicklung der Porosität des Salzgrusversatzes in einzelnen Strecken in Abhängigkeit von Feuchtegrad und Wärmeeintrag bei schneller Kompaktion, aus /LAR 13/

RS = Richtstrecke, ELS = Einlagerungsstrecke, QS = Querschläge, Ost = Ostflügel.

Wie in Kapitel 5.1.4.1 dargestellt, ist im Verfüllkonzept des Vorhabens VSG vorgesehen, die Einlagerungsbereiche im Ost- und Westflügel – mit Ausnahme der Richtstrecken – mit trockenem Salzgrus zu versetzen. Als „trocken“ wird naturtrockener/bergfeuchter Salzgrus mit einem Wassergehalt von ca. 0,02 Gew.-% bezeichnet³⁰. Das Hauptsalz z2HS, welches schon einen sehr geringen natürlichen Feuchtigkeitsgehalt besitzt, erfüllt dieses Kriterium. Indexversuche der DBE TECHNOLOGY ergaben, dass diese geringen Feuchtegehalte des Salzgrusversatzes eingehalten werden können, sofern dieser nach seiner Gewinnung durch die Hohlraumauflagerung möglichst rasch (d. h. innerhalb weniger Tage) als Versatzmaterial eingesetzt wird. Bei längeren Lagerzeiten besteht die Gefahr, dass der Feuchtegehalt des Versatzmaterials durch die im Grubengebäude vorhandene Wetterfeuchte ansteigt. Dieser Prozess muss dann durch geeignete Maßnahmen (Abdecken mit Folien etc.) unterbunden werden.

³⁰ Die Materialspezifikationen werden in /WIE 12/ ausführlich beschrieben.

In /FRI 12/ wurde auf Basis der in die Einlagerungsstrecken einzubringenden Menge des trockenen Salzgrusversatzes (Abb. 5.18) die abfallnah eingebrachte Feuchtigkeitsmenge bestimmt und auf einen Behälter bezogen (s. Tab. 5.9). Im Rahmen der Systemanalysen /KOC 12/, /LAR 13/ wurden u. a. auf Basis dieser Angaben die Korrosionsrate und die Gasbildung berechnet.

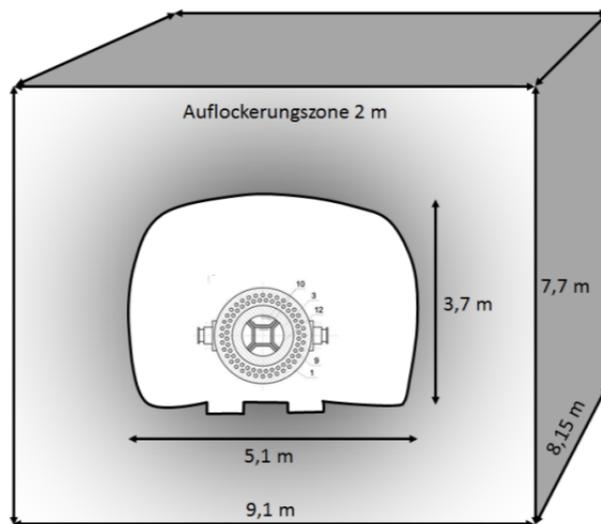


Abb. 5.18 Abmessungen einer Einlagerungsstrecke, bezogen auf einen POLLUX®-Behälter, zur Berechnung der Feuchtigkeitsmengen (Variante B1), aus /BRA 12/

Tab. 5.9 Abfallnah durch den Salzgrusversatz eingebrachte Feuchtigkeitsmengen pro Behälter für den Ost- und Westflügel aus /FRI 12/

Abfallart	Behältertyp	Versatz- feuchte pro Behälter [kg]
Abfälle aus Versuchs- Prototyp- Kernkraftwerken, Forschungs- reaktoren	CASTOR®	14,46
radioaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	POLLUX®-9	34,47
bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren	POLLUX®-10	34,22
verpresste Strukturteile	Gussbehälter Typ II	0,32
Urantails	Containertyp VI (Stahl)	1,15
Graphitabfälle	Containertyp IV (Beton)	2,09
sonstige Abfälle	Container Typ IV (Stahl) Gussbehälter Typ II Betonbehälter Typ I	1,3 0,41 0,49

Fazit:

Die Eigenschaften des Salzgrusversatzes weisen durch die Anforderung, den langfristigen Einschluss der Radionuklide in den Einlagerungsbereichen zu gewährleisten, einen hohen Stellenwert im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG auf. Dies betrifft sowohl die Kompaktionsgeschwindigkeit als auch die hydraulischen Eigenschaften, die der Salzgrusversatz am Ende der Kompaktion aufweist.

Der Zeitbedarf für die vollständige Kompaktion des Salzgrusversatzes wurde im Rahmen der Szenarienentwicklung /BEU 12b/ auf der Basis der Ergebnisse von /POP 12/ mit maximal 1.000 Jahren angesetzt. Es bestehen derzeit jedoch noch erhebliche Ungewissheiten zur Dynamik des Kompaktionsprozesses unter realen Gebirgsdruckbedingungen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtegehalt sowie zu den hydraulischen Eigenschaften, die Salzgrusversatz bei kleinen Porositäten, d. h. bis zu einer Restporosität von $1 \pm 1 \%$, annimmt. Aus diesem Grund wurde bei der radiologischen Konsequenzenanalyse der für eine Reduktion der Versatzporosität von wenigen Prozent erforderliche Zeitraum, der abhängig ist von Temperatur und Feuchtegehalt des

Versatzes, in einer großen Bandbreite von wenigen Dekaden bis einigen 1.000 Jahren angesetzt /LAR 13/.

Weiterhin fehlen Kennwerte und Parameter zur Beschreibung einer fortschreitenden Kompaktion und Veränderung des Porenraums auch im Zusammenhang mit der zeitlichen Entwicklung der Auflockerungszone und den Kontaktzonen zwischen Steinsalzkontur und Dichtelementen. Die Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke sind für Salzgrus weitgehend unbekannt, jedoch von großer Bedeutung bei der Modellierung von Transportvorgängen im Endlagerbergwerk.

Für die Analyse des Gaspfades wurde in /LAR 13/ eine systematische Entwicklung von Parametern zum Zweiphasenfluss im Salzgrusversatz empfohlen. Für einige Parameter ist jedoch zweifelhaft, ob sie experimentell zugänglich sind. Auch für die Abhängigkeit des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus von der Temperatur und dem Feuchtegehalt, die sehr sensitiv in Bezug auf die Kompaktionsgeschwindigkeit sind (vgl. Abb. 5.17), fehlen belastbare Daten für die Parametrisierung der Rechenmodelle.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Maßnahmen M6, M8 und M16 zwar durch das im Vorhaben VSG entwickelte Verschlusskonzept auf konzeptioneller Basis formal umgesetzt wurden und erfolgsversprechend erscheinen. Jedoch steht der Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahmen unter realen Bedingungen noch aus. Insofern bleibt es derzeit offen, ob die mit der Maßnahme M8 verbundenen Zielsetzungen (vgl. Kap. 4.1.2.1) unter Praxisbedingungen erfüllt werden können.

Eine Optimierung der Behältermaterialien hinsichtlich einer Reduzierung der Korrosionsrate, wie in Maßnahme M 16 gefordert, konnte aus Zeitgründen im Vorhaben VSG nicht untersucht werden. Es wird empfohlen, bei der Weiterentwicklung der Behälterkonzepte diesen Aspekt zu berücksichtigen. Sofern aus anderen Gründen Materialien, die korrosionsbeständiger als der für die POLLUX[®]-Behälter und die Kokillen verwendete Feinkornbaustahl ausscheiden, besteht die Möglichkeit, entsprechend korrosionshemmende Lacke oder Beschichtungen zu verwenden.

Maßnahme M7: Anfeuchtung des Salzgrusversatzes in den Richtstrecken

Durch die Umsetzung der Maßnahme M7 soll in den Richtstrecken eine hinreichende Dichtwirkung des Salzgrusversatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Während in den Einlagerungsfeldern (inklusive den Querschlägen) für wärmeent-

wickelnde Abfälle die hohe Wärmeproduktion die Kompaktionsgeschwindigkeit des trockenen Salzgrusversatzes beschleunigt, ist dies in den abfallferneren und daher kühleren Richtstrecken weniger der Fall. Um dennoch einen möglichst raschen Verschluss der Richtstrecken zu erreichen, soll der Salzgrusversatz hier geringfügig angefeuchtet werden. Hierdurch wird u. a. die Reibung zwischen den Salzkörnern herabgesetzt und gleichzeitig wirken feuchteunterstützte Drucklösungs- und Kriechmechanismen, wodurch der Versatzwiderstand im Salzgrus herabgesetzt wird und als Folge die Kompaktionsgeschwindigkeit anwächst.

Untersuchungen zum Kompaktionsverhalten bei höheren Stauchraten /STÜ 07/, /KRÖ 09/ zeigen, dass bei Anfeuchtung des Salzgruses mit „1,2 Gew.-% Sole“ der Versatzwiderstand deutlich verringert ist (Abb. 5.19). Bei gleichbleibender Belastung folgt daraus eine Zunahme der Kompaktionsraten von feuchtem Salzgrus, wie sie durch zahlreiche Laboruntersuchungen belegt ist /POP12/.

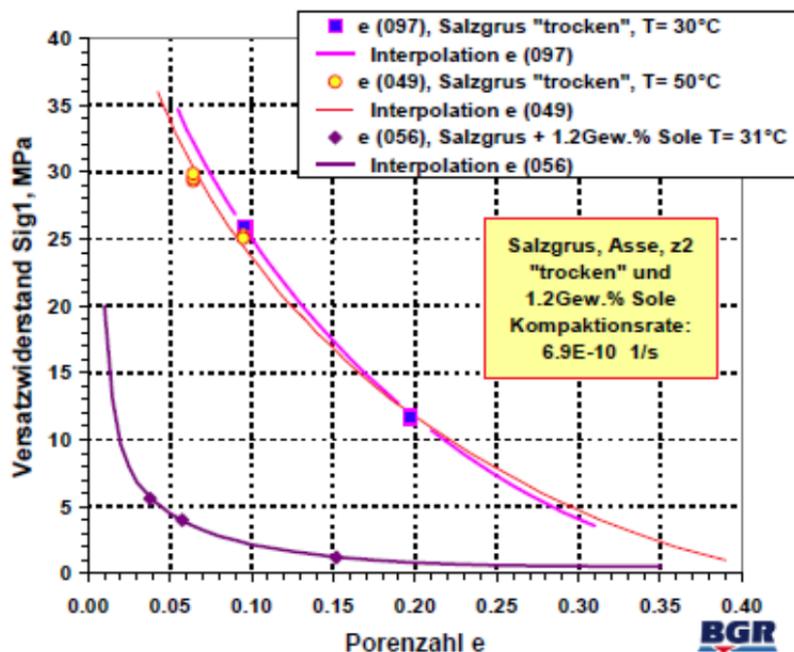


Abb. 5.19 Ergebnisse der Versatzdruckversuche der BGR: Versatzdruckkurven mit Variation des Feuchtegehalts (trocken bzw. 1,2 Gew.-% Sole) und der Temperatur, aus /KRÖ 09/

Im Vorhaben VSG wurde festgestellt, dass bei dem Salzgrusversatz in den Richtstrecken ein Feuchtegehalt von 1,2 Gew.-% möglicherweise zu hoch ist. Hintergrund ist, dass bei fortgeschrittener Kompaktion des Salzgrusversatzes auf ca. 1 % Porosität im

Porenraum lokal merkliche Fluiddrücke auftreten können, die das Einpressen von Feuchtigkeit aus den feuchten Richtstrecken in die trockenen Querschläge begünstigen würden. Daher wurde vorgesehen, dem Salzgrus für die Richt- und Transportstrecken eine geringere Menge Lösung beizugeben (maximal 0,6 Gew.-% $MgCl_2$ -gesättigte Lösung). Unter dieser Anforderung werden die Richtstrecken auch bei einer erreichten Endporosität von 1 % nicht vollständig gesättigt, so dass der Fluiddruckaufbau während der Kompaktion sehr viel geringer ist. Isostatische Kriechversuche, die bei unterschiedlichen Einspannungen (zwischen 1 und 20 MPa) mit vorverdichteten Salzgrusversatzproben (mit einer mittleren Korngröße von 200 μm und einer Ausgangsporosität von ca. 9 %) durchgeführt wurden, ergaben, dass bei geringer Befeuchtung (ca. 0,5 Gew.-%) nach einer vergleichsweise kurzen Belastungsdauer von 350 Tagen bereits eine Porosität in der Größenordnung von 1 – 2 % erreicht werden kann /POP 12/. Dies legt nahe, dass auch mit einer vergleichsweise geringen Anfeuchtung des Salzgrusversatzes in den Richtstrecken eine deutliche Zunahme der Kompaktionsgeschwindigkeit und damit eine rasche Dichtwirkung in den Richtstrecken erzielt werden kann, wobei angemerkt werden muss, dass der die Kompaktion begünstigende Feuchteffekt stark von der Korngröße des Versatzmaterials abhängt.

Fazit:

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Maßnahme M7 zwar durch das im Vorhaben VSG entwickelte Verschlusskonzept auf konzeptioneller Basis formal umgesetzt wurde und erfolgversprechend erscheint. Trotz umfangreicher Untersuchungen in der Vergangenheit fehlt jedoch noch ein fundiertes Prozessverständnis bezüglich der erreichbaren Endporosität und zur Geschwindigkeit der Salzgruskompaktion bei geringer Feuchtigkeitszugabe unter realen Endlagerbedingungen. Es gelten diesbezüglich die gleichen Vorbehalte, die im Zusammenhang mit der Umsetzbarkeit der Maßnahmen M6, M8 und M16 dargestellt wurden. Insofern steht der Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahme unter realen Bedingungen aus den oben genannten Gründen noch aus. Dies gilt auch für die technische Umsetzung der Maßnahme unter Praxisbedingungen, insbesondere die gleichmäßige Anfeuchtung von Salzgrusversatz im großen Maßstab.

5.2 Umsetzung des Nachweiskonzepts

Aus dem Nachweiskonzept (Kap. 4.2) leiten sich alle systemanalytischen Arbeiten im Vorhaben VSG ab. Im Folgenden werden die gemäß dem Nachweiskonzept bearbeitete-

ten Nachweisfelder und die zu den Nachweisfeldern geführten Einzelnachweise sowie die erzielten Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Im Nachweiskonzept des Vorhabens VSG wurden folgende Nachweisfelder vorgegeben:

1. Konzept zur Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Umsetzung s. Kap. 5.2.5)
2. Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum
 - a. Integrität der geologischen Barriere (einschl. des Erhalts ihrer Mächtigkeit, Umsetzung s. Kap. 5.2.2.1)
 - b. Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke (Umsetzung s. Kap. 5.2.2.2)
3. Radiologische Langzeitaussage (Umsetzung s. Kap. 5.2.3)
 - a. Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich mittels Freisetzungsanalysen
 - b. Einhaltung der radiologischen Schutzziele bei Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich
4. Kritikalitätsausschluss (Umsetzung s. Kap. 5.2.4)

Gemäß dem Nachweiskonzept sind darüber hinaus Szenarien zu zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen in das Endlagersystem (Human-Intrusion-Szenarien) zu analysieren, um mögliche Ansatzpunkte für eine Optimierung der Endlagerkonzepte festzustellen. Zur Bewertung der zukünftigen menschlichen Eingriffe werden stilisierte Szenarien eingesetzt. Auf die im Vorhaben VSG hierzu erzielten Ergebnisse wird in Kapitel 5.2.6 zusammenfassend eingegangen.

Im Folgenden werden die systemanalytischen Arbeiten zu den jeweiligen Nachweisfeldern dargelegt und bewertet. Die Bewertung erfolgt mit dem Ziel, festzustellen, ob das Nachweisziel eines jeden Nachweisfeldes umfassend durch die Summe der jeweiligen Einzelnachweise erreicht wurde. Das gleiche gilt für die Behandlung von Human-Intrusion-Szenarien. In Kapitel 5.2.5 wird der einschlusswirksamen Gebirgsbereich in Lage und Grenze ausgewiesen und begründet. Etwaige Kenntnislücken, die zum Führen der Nachweise unabdinglich sind, werden aufgedeckt und der Einfluss von Ungewissheiten auf die Analyseergebnisse identifiziert (Kap. 5.3).

5.2.1 Grundlagen der Systemanalyse

Eine wesentliche Grundlage für alle systemanalytischen Arbeiten zu den jeweiligen Nachweisfeldern sind die Kenntnisse über das zu analysierende Endlagersystem, die es charakterisierenden Merkmale, Ereignisse und Prozesse (FEP) sowie seine zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten (Szenarien). Daher werden diese grundlegenden Arbeiten im Folgenden den Nachweisen in zusammenfassender Form vorweggestellt.

5.2.1.1 FEP-Katalog

Der FEP-Katalog /WOL 12b/ enthält eine umfassende Darstellung der Merkmale, die den Anfangszustand des Endlagersystems zu Beginn der Nachverschlussphase am Standort Gorleben charakterisieren sowie der wesentlichen Aspekte zu den Ereignissen und Prozessen, die in einem derartigen Endlagersystem zukünftig ablaufen können. Die Beschreibungen der FEP geben den aktuellen Kenntnisstand zum jeweiligen FEP wieder und stellen den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dar. Der FEP-Katalog ist das verbindende Element zwischen den Grundlagen (Standortbeschreibung, geowissenschaftliche Langzeitprognose und Abfallspezifikation), den Einlagerungs- und Verschlusskonzepten und der Systemanalyse.

Ziele des FEP Katalogs:

Die Ziele, die mit dem FEP-Katalog erreicht werden sollten, waren:

1. eine umfassende Erarbeitung der Grundlagen für die Systemanalyse, zusammenhängend und nachvollziehbar dokumentiert
2. die Bereitstellung grundlegender Informationen für die Szenarienentwicklung durch die Beschreibung der derzeitigen Standortgegebenheiten und die auf das Endlagersystem möglicherweise Einfluss nehmenden Faktoren
3. die Zuordnung der FEP zu einer bestimmten Klasse der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit³¹ („wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ oder „nicht zu betrachten“)

³¹ Unter der „bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit“ wird gemäß dem FEP-Katalog die Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der ein FEP unter der Bedingung eintritt, dass die für sein Eintreten notwendigen Voraussetzungen am Standort vorliegen bzw. mit Sicherheit zu erwarten sind /WOL 12a/.

4. die Aussage zur Wirkung des jeweiligen FEP sowie seiner Ausprägung³² im Endlagersystem
5. die Kennzeichnung von FEP, die eine direkte Beeinträchtigung der Funktion von initial einschlusswirksamen Barrieren des Endlagersystems zur Folge haben können
6. die vollständige Darstellung der wesentlichen direkten, gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den FEP, die in der Entwicklung des Endlagersystems zu berücksichtigen sind

Ergebnisse:

Im FEP-Katalog /WOL 12b/ wurden systematisch und umfassend die relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse der im Vorhaben VSG betrachteten Endlagersysteme dargelegt. Insofern enthält der FEP-Katalog auch die für die Systemanalysen wesentlichen FEP. Für jedes FEP wird eine qualitative Aussage zu seiner bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit gemacht.

Insgesamt wurden 115 FEP identifiziert und beschrieben. Von diesen FEP wurden 98 als „wahrscheinlich“ (Tab. 5.10), 4 FEP als „weniger wahrscheinlich“ (Tab. 5.11) und 13 FEP als „nicht zu betrachten“ (Tab. 5.12) eingestuft. Die hohe Anzahl an wahrscheinlichen FEP ist darauf zurückzuführen, dass sie entweder heutzutage bereits vorliegen, ein Merkmal des Standortes oder Endlagerkonzeptes sind, eine allgemeine physikalische Größe darstellen oder Ereignisse beschreiben, die zukünftig erwartet werden. Bei den vier weniger wahrscheinlichen FEP handelt es sich um Beschreibungen von fehlerhaften technischen Komponenten. Da man den Einsatz eines Qualitätsmanagements bei der Erstellung dieser technischen Komponenten fordern und damit unterstellen kann, lassen sich solche FEP als „weniger wahrscheinlich“ einordnen.

Für insgesamt 13 FEP wurde im FEP-Katalog begründet, warum sie während des Nachweiszeitraumes am Standort Gorleben nicht auftreten können und daher „nicht zu betrachten“ (Tab. 5.12) sind. Grund für diese Einstufung sind nicht vorhandene, aber

³² Die Ausprägung sagt aus, in welcher Intensität das jeweilige FEP auftritt. Dabei kann es sich um eine qualitative Beschreibung oder um einen quantitativen Wert bzw. Wertebereich handeln. FEP können verschiedene Ausprägungen aufweisen, die den Wahrscheinlichkeitsklassen „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ bzw. „unwahrscheinlich“ zugeordnet werden können oder die sich aus der jeweils betrachteten Systementwicklung ergeben /WOL 12a/.

für die FEP notwendige geologische oder technische Randbedingungen. Diese FEP bleiben in der Szenarientwicklung unberücksichtigt.

Für sechs weitere FEP, die wahrscheinlich im Sinne einer bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit sind, konnte begründet werden, dass sie aufgrund ihrer Ausprägung am Standort Gorleben ohne Relevanz sind (Tab. 5.13). Insgesamt werden somit im Vorhaben VSG 19 der 115 FEP in Folge des FEP-Screenings für den Standort Gorleben nicht berücksichtigt.

Tab. 5.10 Wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere (Initial-FEP)

FEP-Nr.	FEP-Name	Beeinträchtigte Initial-Barrieren¹⁾
1.2.03.01	Erdbeben	WG, SchV, StrV
1.2.09.01	Diapirismus	WG, SchV, StrV
1.2.09.02	Subrosion	WG, SchV
1.3.04.02	Bildung kryogener Klüfte	WG
1.3.05.03	Glaziale Rinnenbildung	WG, SchV
2.1.03.03	Versagen eines Brennelement-Behälters	BEB
2.1.05.04	Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV
2.1.07.01	Konvergenz	SchV, StrV
2.1.07.02	Fluiddruck	WG, SchV, StrV
2.1.07.04	Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	WG, SchV, StrV
2.1.07.07	Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV
2.1.08.08	Quellen des Bentonits	SchV
2.1.09.02	Auflösung und Ausfällung	WG, SchV, StrV
2.1.09.03	Metallkorrosion	BEB
2.1.09.06	Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV
2.1.09.07	Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	BEB
2.2.01.01	Auflockerungszone	SchV, StrV
2.2.02.02	Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG
2.2.06.01	Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	WG, SchV, StrV, BEB
2.2.07.01	Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG
2.2.07.02	Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG
2.2.10.05	Thermochemische Sulfatreduktion	WG
2.2.11.01	Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG

¹⁾ Im FEP-Katalog und bei der Szenarienentwicklung wurden als Initial-Barrieren das Wirtsgestein, die Streckenverschlüsse, die Schachtverschlüsse sowie die Brennelement-Behälter definiert /BEU 12b/.

Tab. 5.11 Weniger wahrscheinliche FEP

FEP-Nr.	FEP-Name
1.5.03.01	Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen
2.1.07.05	Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
2.1.07.06	Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses
2.1.08.05	Kanalisation in Dichtelementen

Tab. 5.12 FEP mit Eintrittswahrscheinlichkeit „nicht zu betrachten“

FEP-Nr.	FEP-Name
1.1.12.01	Unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase
1.1.12.02	Kokillensticking
1.2.01.02	Orogenese
1.2.01.04	Hebung der Erdkruste
1.2.02.02	Grabenbildung
1.2.04.01	Magmatismus
1.2.05.01	Gesteinsmetamorphose
1.2.06.01	Hydrothermale Aktivität
1.5.01.01	Meteoriteneinschlag
2.1.12.04	Zündfähige Gasmischungen
2.1.14.01	Kritikalität
2.2.06.02	Selbstversatz
2.2.10.04	Schmelzen des Salzgesteins

Tab. 5.13 Wahrscheinliche FEP ohne Relevanz für ein Endlager am Standort Gorleben

FEP-Nr.	FEP-Name
1.2.01.01	Neotektonische Vorgänge
1.2.01.03	Senkung der Erdkruste
1.2.02.01	Krustendeformation
2.1.13.02	Materialversprödung durch Strahlung
2.2.10.03	Thermische Carnallitzersetzung
3.2.07.06	Sonstige Transportprozesse

Der FEP Katalog stellt sowohl in seinem formalen Aufbau als auch inhaltlich, aufgrund der Aufarbeitung des Wissensstandes über saline Endlagersysteme und insbesonde-

re über den Standort Gorleben, den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik dar. Die Ziele des FEP-Katalogs wurden in Gänze umgesetzt. Die entsprechenden Ungewissheiten sowie der Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu den einzelnen FEP wurden ausgewiesen.

5.2.1.2 Szenarientwicklung

Eine weitere Grundlage für die systemanalytischen Arbeiten ist die Identifizierung und Klassifizierung sicherheitsrelevanter Szenarien. Die im Vorhaben VSG angewendete Methodik der Szenarientwicklung sowie die Ableitung der für die Sicherheitsanalyse relevanten Szenarien sind in /BEU 12b/ dokumentiert.

Ziele der Szenarientwicklung

Ziel der Szenarientwicklung ist die systematische und umfassende Identifizierung der sicherheitsrelevanten Szenarien, deren Konsequenzen zu analysieren sind, und ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen. Die Szenarientwicklung ist auf die Ableitung eines Referenzszenariums (je Einlagerungskonzept) und mehrerer Alternativszenarien ausgerichtet.

Ergebnisse

Die Vorgehensweise zur Szenarientwicklung im Vorhaben VSG ist eine prototypische Anwendung einer Methodik, deren Entwicklung im Vorhaben ISIBEL /ISI 08, ISI 10/ begann und im Vorhaben VSG weiterentwickelt wurde. Sie zielt unter Einbeziehung von Grundlagen, d. h. den grundlegenden Annahmen, der Standortbeschreibung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, der Abfallcharakterisierung und dem Endlagerkonzept, auf die Identifizierung von potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems ab. Dabei bildet der FEP-Katalog, wie aus Abb. 5.20 ersichtlich, die zentrale Arbeitsgrundlage für die Szenarientwicklung.

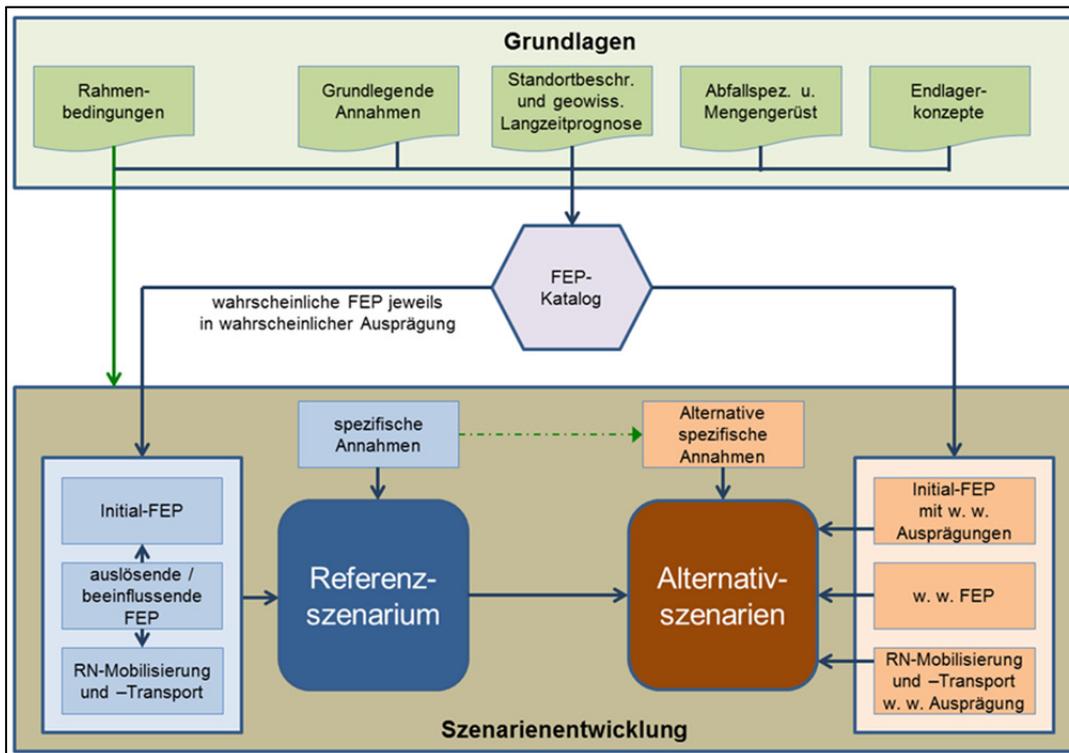


Abb. 5.20 Schematische Darstellung der methodischen Elemente für die Szenarientwicklung aus /BEU 12b/

w. w. „weniger wahrscheinlich“, RN „Radionuklid“

In Verbindung mit den im FEP-Katalog nach heutigem Kenntnisstand beschriebenen FEP lässt die Methodik eine systematische Identifizierung der potenziellen Entwicklungen des Endlagersystems zu.

Wie in Kapitel 5.2.1.1 erwähnt, enthält der FEP-Katalog bereits eine qualitative Aussage zur bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit. Bei der Zuordnung der FEP zu Wahrscheinlichkeitsklassen nach /BMU 10a/ war in der Szenarientwicklung zusätzlich die Ausprägung des FEP zu berücksichtigen. Zur Einordnung der Entwicklungen bzw. Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen wurde somit ein Ansatz entwickelt, der sowohl die bedingten Eintrittswahrscheinlichkeiten der FEP als auch die Wahrscheinlichkeit deren Ausprägung berücksichtigt (Abb. 5.21).

FEP (Initial-FEP, Radionuklid-Mobilisierung und Radionuklid-Transport sowie weniger wahrscheinliche FEP)				Mögliche Wahrscheinlichkeitsklassen der Szenarien		Szenarien
bedingte Eintrittswahrscheinlichkeit		Ausprägung				
Einschätzung aus FEP-Katalog		Einschätzung unter Berücksichtigung von FEP Abhängigkeiten (s. Anhang A bzw. B)		wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	
wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich	wahrscheinlich	weniger wahrscheinlich			
X		X		X		Referenzszenarium
X			X		X	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen
	X	X			X	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP
Einschätzung aus der jeweiligen Betrachtung der diskutierten Abweichung von der Annahme				X	X	Alternativszenarien aus alternativer Betrachtung von spezifischen Annahmen

Abb. 5.21 Darstellung der möglichen Wahrscheinlichkeitsklassen (gelbe Markierung) der unterschiedlichen Szenarien, aus /BEU 12b/

Mit Hilfe der Szenarientwicklung wurden auf Basis des FEP-Katalogs und einer systematischen standortspezifischen Analyse sicherheitsrelevanter Einflussfaktoren für die Einlagerungsvarianten AB1, AB2 und AC die potenziellen Endlagersystementwicklungen abgeleitet und ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen vorgenommen.

Zu den drei Einlagerungsvarianten wurden zunächst die **Referenzszenarien** R1, R2 und R3 entwickelt. Ein Referenzszenarium beinhaltet jeweils eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems. Die Beschreibung dieser Szenarien ist dabei jeweils nach den Teilsystemen Nahfeld, Strecken und Schächte, Wirtsgestein sowie Deck- und Nebengebirge gegliedert. Die Szenarien wurden dabei aus den Initial-FEP und deren Abhängigkeiten abgeleitet, wobei auch die zeitlichen Entwicklungen sowie die zeitlichen Beschränkungen einzelner FEP aufgezeigt wurden. Zusätzlich erfolgte die Diskussion einer möglichen Mobilisierung von Radionukliden und eines Transportes von Radionukliden.

Als erster Ansatzpunkt bei der Ableitung der Referenzszenarien dienten die wahrscheinlichen FEP, die die Funktion einer Initial-Barriere direkt beeinträchtigen können (Initial-FEP) und die FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Im nächsten Schritt wurden alle auf die Initial-FEP einwirkenden FEP hinzugezogen. Dies sind solche, die gemäß FEP-Katalog entweder auslösend oder beeinflussend auf das jeweilige Initial-FEP wirken (Abb. 5.22).

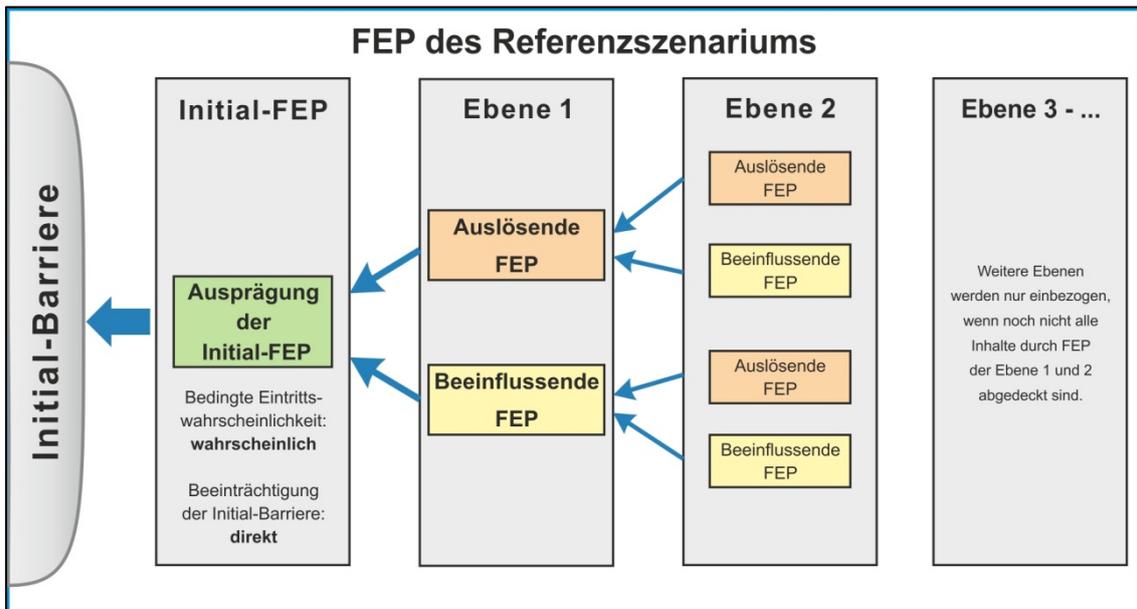


Abb. 5.22 Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten zur Bestimmung der Ausprägung von Initial-FEP, aus /BEU 12b/

Bei der Ableitung der Referenzszenarien wurden folgende **spezifische Annahmen** getroffen:

- Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.
- Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.
- Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) zwischen den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.
- Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.

Die mit den spezifischen Annahmen verbundenen Merkmale und Prozesse werden als wahrscheinlich angesehen, die entsprechenden Begründungen werden in /BEU 12b/ gegeben. Von den spezifischen Annahmen abweichende Entwicklungen wurden durch weniger wahrscheinliche Alternativszenarien beschrieben.

Durch die **Alternativszenarien** wurden Entwicklungsmöglichkeiten beschrieben, die von den Referenzfällen abweichen, wobei sich jedes Alternativszenarium in genau einem Aspekt (zusätzliches FEP, geänderte spezifische Annahme oder Ausprägung eines FEP) vom Referenzszenarium unterscheidet. Auf Basis des jeweiligen Referenzszenariums wurden die Alternativszenarien für die drei Einlagerungsvarianten (AB1, AB2 und AC) nach vier verschiedenen Ansatzpunkten abgeleitet:

- aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen (s. o.),
- aus den Initial-FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung,
- aus den FEP zur Radionuklidmobilisierung, zum Radionuklidtransport ebenfalls mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung und
- aus den weniger wahrscheinlichen FEP.

Die Endlagersystementwicklungen wurden zu einer begrenzten Anzahl sicherheitsrelevanter wahrscheinlicher und weniger wahrscheinlicher Szenarien zusammengefasst. Für die Einlagerungsvarianten sind je ein Referenzszenarium (R) und insgesamt 17 Alternativszenarien, die für alle Einlagerungsvarianten gleichartig sind, identifiziert worden (Abb. 5.24).

1. Alternative Betrachtung von spezifischen Annahmen

- A1a1: Klimaentwicklung: Zwei glaziale Rinnen (erste Rinne folgt dem Verlauf der Gorlebener Rinne, zweite Rinne verläuft außerhalb)
- A1a2: Klimaentwicklung: Eine glaziale Rinne die nicht dem Verlauf der Gorlebener Rinne folgt
- A1a3: Sicherheitsabstand: Unterschritten wegen Fehlinterpretation von Erkundungsergebnissen
- A1a4: Sicherheitsabstand: Unterschritten wegen unentdeckter Klüfte
- A1a5: Erkundungssohle

2. Initial-FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung

- A1i1: Glaziale Rinnenbildung
- A1i2: Versagen eines Brennelement-Behälters
- A1i3: Konvergenz
- A1i4: Metallkorrosion
- A1i5: Spannungsänderung und Spannungsumlagerung
- A1i6: Fluidvorkommen im Wirtsgestein
- A1i7: Thermochemische Sulfatreduktion
- A1i8: Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein
- A1i9: Subrosion

3. Bestimmende FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung

- A1m1: Radionuklidmobilisierung

4. Weniger wahrscheinliche FEP

- A1w1: Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses
- A1w2: Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses

Abb. 5.23 Zusammenfassung der Alternativszenarien für die Einlagerungsvarianten, auf Basis von /BEU 12b/

Die im Rahmen der Szenarienentwicklung eingesetzte Methodik gewährleistet eine systematische Identifizierung sicherheitsrelevanter Szenarien und deren methodisch stringente Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen. Die Überführung der Szenarien in Rechenfälle der Systemanalysen erfolgte im Rahmen der jeweiligen Einzelnachweise, die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellt werden.

5.2.2 Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum

Eine zentrale Forderung im Sicherheitskonzept ist der Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den gesamten Nachweiszeitraum und seine gemäß /BMU 10a/ geforderte Barrierenfunktion, die weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt sein darf.

Sind Integritätsverletzungen der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb des Nachweiszeitraums für wahrscheinliche Entwicklungen nicht auszuschließen und kann diese Situation auch nicht durch Modifikationen an den Endlagerkonzepten (zum Beispiel durch eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Strecken oder Behältern bzw. durch eine geringere Behälterbeladung zur Reduzierung der flächenbezogenen Wärmeleistungsdichte) korrigiert werden, so ist der Standort nicht für die Endlagerung des betreffenden Abfallspektrums geeignet. Dies gilt selbst dann, wenn es trotz der Integritätsverletzung (z. B. Rissbildungen in der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt.

Im Fall von Integritätsverletzungen, die sich aus Lastfällen ergeben, die aus weniger wahrscheinlichen Szenarien resultieren, ist zu überprüfen, ob es infolge der Integritätsverletzung zu Radionuklidfreisetzungen kommt, die im Sinne der radiologischen Schutzkriterien (s. Kap. 5.2.3) unzulässig hoch sind.

Der Ermittlung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereich am Endlagerstandort geht somit eine Reihe von Nachweisen voraus, die die Einschlusswirksamkeit und Integrität der geologischen und geotechnischen Barrieren belegen. Zur Prüfung, ob am Standort Gorleben ein einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, wurde für den Nachweiszeitraum auf Basis der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie der Langzeitprognose der geotechnischen Barrieren geprüft,

- ob bzw. in welchem Ausmaß die Mächtigkeit der geologischen Barriere durch geologische Prozesse, wie Subrosion oder Erosion, reduziert werden kann bzw.
- ob die in Kapitel 5.1.3 angesprochene hydraulische Dichtwirkung der geologischen Barriere durch thermisch induzierte Rissbildungen, wie die Ausbildung von Kälterissen im Salzgestein oder Rissentwicklung durch Aufheizung oder Abkühlung des

Salzgesteins aufgrund der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle, beeinträchtigt werden kann.

Ziel war die Prüfung, ob unter Berücksichtigung dieser Beeinträchtigungen ein dauerhafter Integritätserhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nachgewiesen werden kann, wobei die Ungewissheiten zum Ablauf der Prozesse und ihren Ausprägungen zu berücksichtigen waren.

5.2.2.1 Nachweis der Integrität der geologischen Barriere

Der Nachweis der Integrität der geologischen Barriere wurde mittels Integritätsanalysen geführt (Kap. 3.5.3), deren Ergebnisse in /KOC 12/ dokumentiert sind. Die zu betrachtenden Prozesse, die am Standort Gorleben potenziell den Erhalt der geologischen Barriere beeinträchtigen können, wurden während der Entwicklung des FEP-Katalogs u. a. auf der Grundlage der geowissenschaftlichen Langzeitprognose /MRU 11/ identifiziert. Des Weiteren sind durch die Szenarienentwicklung relevante Szenarien für die Integritätsanalysen ausgewiesen worden.

Konzept der Nachweisführung:

Nach den Maßgaben des Sicherheits- und Nachweiskonzepts des Vorhabens VSG /MÖN 12/ wurde zunächst die Integrität der gesamten geologischen Barriere, welche vom Nachweisansatz zunächst auf den gesamten Salzstock bezogen wurde, untersucht. Auf der Basis der Ergebnisse der Integritätsanalysen wurden die Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, also eines das Endlagerbergwerk umgebenden Teilbereichs der geologischen Barriere festgelegt, der den im Sicherheits- und Nachweiskonzept beschriebenen Anforderungen an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich genügt (vgl. hierzu Kap. 5.2.5).

Die Integritätsanalysen wurden unter Anwendung der in Kapitel 4.2.2 dargelegten Kriterien sowohl für die wahrscheinlichen Entwicklungen (Integritätsnachweis) als auch für die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen (Integritätsprüfung) für die Einlagerungsvarianten B1, AB1 und C durchgeführt. Es kamen insgesamt drei unterschiedliche Modellkonzepte (Berechnungsprogramme und Stoffgesetze) zur Anwendung (Tab. 5.14).

Tab. 5.14 Ausgewählte Rechenprogramme der Projektpartner und dabei verwendete Modellgeometrien, aus /KOC 12/

	Institution				
	BGR		IfG		GRS
Rechenprogramm	JIFE		UDEC		TOUGH2
Skala/ Modellgeometrie	Regional/ Kaltzeit (3D)	Fernfeld (2D/3D)	Fernfeld/ Kaltzeit (2D)	Nahfeld (2D)	Gruben- bäude (3D)

Die Modellkonzepte wurden so gewählt, dass sie die für die Integritätsanalysen relevanten Skalen und Prozesse abdecken:

- Das dreidimensionale **Regionalmodell** der BGR umfasst die gesamte Salzstruktur Gorleben-Rambow und wurde konzipiert, um die thermo-mechanischen Auswirkungen zukünftiger Kaltzeiten zu berechnen.
- Die Auswirkungen von klimatischen Auswirkungen wurden ebenso mit Hilfe eines zweidimensionalen **Fernfeld-Modells des IfG** Leipzig berechnet.
- Das **Fernfeld-Modell der BGR** basiert auf dem geologischen Schnitt durch den Querschlag 1 West und diente zur Simulation thermo-mechanischer Auswirkungen der Wärmeproduktion durch die eingelagerten radioaktiven Abfälle. Das Berechnungsmodell wurde in einer zweidimensionalen und in einer dreidimensionalen Variante mit einem homogenisierten Endlagermodell ohne Diskretisierung einzelner Grubenbaue genutzt.
- Das zweidimensionale **Nahfeld-Modell** des IfG basiert auf demselben Querschnitt. Dort werden explizit Grubenbaue des Endlagerbergwerks, also Erkundungs-, Richt- und Einlagerungsstrecken berücksichtigt und mit hoher Detaillierung abgebildet.
- Zur Analyse der hydraulischen Prozesse wird von der GRS ein dreidimensionales **Grubenmodell** benutzt, das zwar die verfüllten Grubenbaue abbildet, nicht jedoch explizit die geologischen Strukturen im Salzstock.
- Für die Integrität der geologischen Barriere ist die Fluiddruck-generierte Vernetzung von hydraulischen Fließwegen entlang von Korngrenzen zwischen den Salzkristallen von entscheidender Bedeutung. Zur Bewertung der Integrität werden das Minimalspannungskriterium bzw. das Fluiddruckkriterium herangezogen. Hinzu kommt, dass steil stehende, bis zum Salzspiegel in wasserführende Bereiche hoch rei-

chende Schichtflächen und Diskontinuitäten potenzielle Schwachstellen in der geologischen Barriere darstellen, weil entlang von Diskontinuitäten ein bevorzugter Fluidtransport möglich ist. Für die Prüfung dieser Prozesse wurden spezielle **Schichtflächenmodelle** verwendet /KOC 12/, die als Materialansatz in das Rechenprogramm UDEC implementiert sind.

Bei der Ableitung der Rechenfälle für die Integritätsanalysen wurden die in der Szenarientwicklung abgeleiteten Referenz- und Alternativszenarien dahingehend überprüft, ob diese Initial-FEP aufweisen, die integritätsrelevant sind. Aus diesen FEP wurden Rechenfälle abgeleitet, die den einzelnen Modellen zugeordnet wurden (Tab. 5.15). Relevanz und Ausprägung der FEP wurden dabei szenarienweise den Ergebnissen der Szenarientwicklung entnommen.

Randbedingung war hierbei die Beschränkung auf eine möglichst geringe Anzahl repräsentativer bzw. abdeckender Rechenfälle. Daneben wurden die FEP *Diapirismus*, *Subrosion* und *Rinnenbildung* verbal argumentativ abgehandelt. Weitere Einzelheiten zur Ableitung und Parametrierung der Rechenfälle für die Integritätsanalysen sind dem Abschlussbericht /KOC 12/ zu entnehmen.

Tab. 5.15 Zuordnung der FEP zu den Rechenprogrammen, aus /KOC 12/

Projektpartner	BGR		IfG Leipzig		GRS
Berechnungsprogramm	JIFE		UDEC		TOUGH2
Skala	Kaltzeit (3D)	Fernfeld (2D/3D)	Fernfeld (2D)	Nahfeld (2D)	Grubengebäude (3D)
Initial-FEP					
Erdbeben					
Bildung kryogener Klüfte					
Konvergenz					
Fluiddruck					
Metallkorrosion					
Auflockerungszone					
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein					
Spannungsänderung und Spannungumlagerung					
Fluidvorkommen im Wirtsgestein („Laugennester“)					
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden ins Salzgestein					

Einzelnachweise und Ziele:

Die Einzelnachweise wurden mit dem Ziel geführt, diejenigen Bereiche des Salzstocks auszuweisen, bei denen aufgrund von Belastungen die im Nachweiskonzept (Kap. 4.2.2) vorgegebenen geomechanischen Bewertungsmaßstäbe – Dilatanz- und Fluiddruckkriterium – verletzt werden. Dabei wurden das Dilatanz- und das Minimalspannungs- bzw. Fluiddruck-Kriterium unabhängig voneinander betrachtet. Die Einzelnachweise dienen in ihrer Gesamtheit dem Ziel festzustellen, ob die Integrität der geologischen Barriere in einem ausreichend großen Bereich um das Endlagerbergwerk im Nachweiszeitraum erhalten bleibt, so dass ein einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit der in /BMU 10a/ geforderten Einschlussqualität ausgewiesen werden kann.

Ergebnisse des Integritätsnachweises für das Referenzszenarium

Die zu den Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle und zu den Kaltzeiten von BGR und IfG durchgeführten Integritätsanalysen zeigen übereinstimmend:

- Es kommt zwar zu einer großräumigen Erwärmung des Salzstocks bis in den Salzspiegelbereich, die daraus resultierenden thermo-mechanischen Spannungen und Verschiebungen führen aber nicht zur Bildung durchgängiger Wegsamkeiten bis in die Nähe der Einlagerungsbereiche.
- Die größten thermo-mechanisch-hydraulischen Beanspruchungen der geologischen Barriere treten in den ersten hundert Jahren nach Verschluss des Endlagers auf, so dass in der nachfolgenden zeitlichen Entwicklung ein Integritätsverlust immer unwahrscheinlicher wird. Dabei ist aus salzmechanischen Gründen (vgl. Kap. 4.1.1) davon auszugehen, dass sich Bereiche mit Integritätsverletzung aufgrund von Verheilungsprozessen wieder zurückbilden (in den Rechnungen nicht explizit modelliert).
- Mechanische Schädigungen durch Überschreitung der Dilatanzgrenze sind auf die unmittelbare Hohlraumumgebung (max. 3 m mächtige Auflockerungszone³³) bzw. lokale salzspiegelnahe Bereiche, insbesondere in der Kontaktzone Anhydrit/Steinsalz begrenzt. Aufgrund der geringen Mächtigkeit bzw. der weiten Entfernung von der Einlagerungssohle sind diese Phänomene für die Integrität der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche von vernachlässigbarer Bedeutung.
- Die gekoppelten thermo-mechanischen Berechnungen (mit Bewertung des Minimalspannungskriteriums) belegen, dass temporär lokale Integritätsverletzungen ausgehend vom Salzspiegel im Extremfall bis zu wenigen hundert Metern in den Salzstock hineinreichen können. Die Berechnungen zur Variante C (Bohrlochlage- rung) zeigen im Vergleich zur Streckenlagerung dabei die weitreichendste Verletzung des Minimalspannungskriteriums in den südöstlichen Hauptanhydrit-Blöcken. Alle Bereiche, in denen das Minimalspannungskriterium rechnerisch verletzt wird, enden mehrere hundert Meter über dem Einlagerungshorizont. Insgesamt verbleibt

³³ Das Vorliegen einer wenige Meter mächtigen Auflockerungszone wurde bei der Bemessung des Sicherheitsabstandes (vgl. Kap. 5.1.2.3) bereits einbezogen. Dabei ist davon auszugehen, dass sich die konturnahe Auflockerungszone nach Aufkriechen des Salzgebirges auf den Salzgrusversatz infolge der wachsenden Stützwirkung des Versatzes wieder zurückbilden wird.

im Hangenden der Einlagerungsbereiche somit eine mehrere hundert Meter mächtige Barriere, deren Integrität nicht gestört ist, d. h. es gibt keine durchgehenden Wegsamkeiten.

- Die thermo-mechanischen Belastungen, die für die Bohrlochlagerung ausgewiesen werden, sind größer als für die Streckenlagerung, da die Wärmefreisetzung engeräumiger ist. Die Verletzung des Minimalspannungskriteriums für die Variante der Bohrlochlagerung reicht ca. 30 bis 60 m tiefer in den Salzstock als bei der Variante der Streckenlagerung. Zusätzlich ist das Dilatanzkriterium am Salzspiegel ausgeprägter verletzt. Es verbleiben große Salzbereiche der geologischen Barriere intakter, so dass die Barrierenintegrität ohne Bildung durchgängiger Wegsamkeiten belegt ist. Dieses Ergebnis wird auch durch thermo-mechanische Berechnungen mit unrealistischen Wärmefreisetzungen bzw. reduzierter Kriechfähigkeit des Salzgebirges (relativ ungünstigster Fall) bestätigt, was insgesamt die Robustheit der Analysen belegt.

Die Ergebnisse weisen einen Bereich im Steinsalz aus, in dem die Integrität der geologischen Barriere in der Umgebung des projektierten Endlagerbergwerks nachgewiesen werden kann (als Beispiel für die Ergebnisse in /KOC 12/ siehe Abb. 5.24). Dieser Bereich beträgt in vertikaler Richtung oberhalb des Einlagerungsbereichs ca. 370 m (Streckenlagerung) bzw. 310 m (Bohrlochlagerung). Innerhalb des Sicherheitsabstands von 50 Metern zu potenziell lösungsführenden Schichten außerhalb des Hauptsalzes werden nur im Bereich der Auffahrungen dilatante Bereiche, die Auflockerungszone, ausgewiesen. Der im Vorhaben VSG vorgegebene Sicherheitsabstand von 50 m (vgl. Kap. 5.1.2.3) stellt sicher, dass – abzüglich der dilatanten Auflockerungszone und möglicherweise im Übergangsbereich zu den Abfolgen der Leine-Serie in das Hauptsalz hineinreichender Klüfte von jeweils wenigen Metern – die erforderliche ungestörte geologische Barrierenmächtigkeit von einigen Zehner Metern erhalten bleibt.

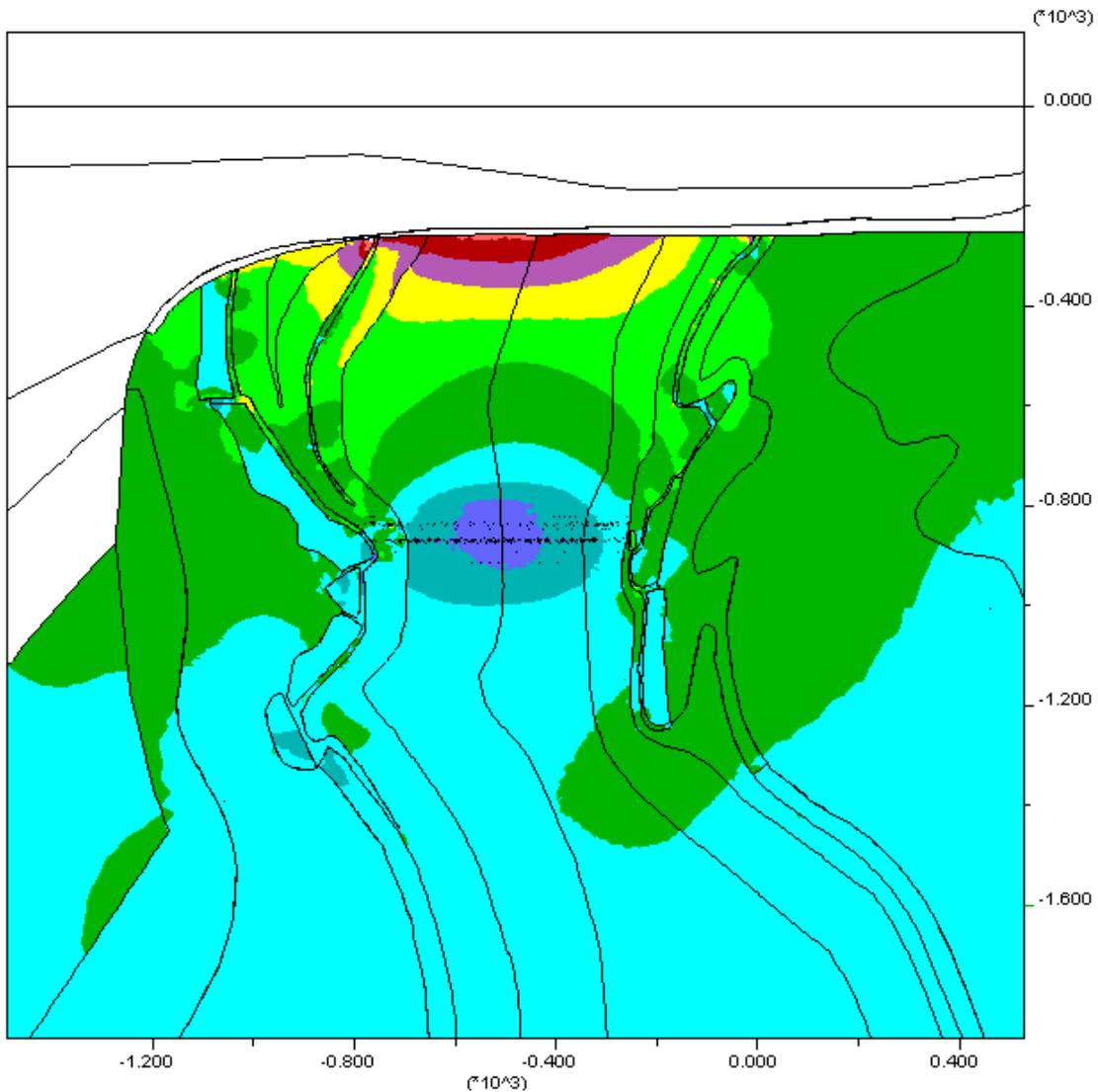


Abb. 5.24 Auswertung des Minimalspannungskriteriums 30 Jahre nach Einlagerungsbeginn. Kriterienverletzung ($n_F < 1$) im lila bis roten Bereich, aus /KOC 12/

Nicht alle FEP mussten hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Endlagersystem numerischen Integritätsanalysen unterzogen werden. Vielmehr ließen sich bei den FEP *Diapirismus*, *Auflösung und Ausfällung*, *Subrosion* und *glaziale Rinnenbildung* die entsprechenden Auswirkungen durch verbal-argumentative Analysen im Sinne von Plausibilitätsbetrachtungen ermitteln. Auch diese Plausibilitätsbetrachtungen ergaben, dass für das Referenzszenarium intakte Salzpartien in einer Mächtigkeit von mindestens 300 m oberhalb des konzipierten Einlagerungsbereiches erhalten bleiben /KOC 12/.

Die zur Simulation der Fluidynamik im Grubengebäude mit dem Programm TOUGH2 durchgeführten Analysen ergaben, dass in vier Rechenfällen der lithostatische Druck für die Einlagerungsvariante AB1 und in einem Fall für die Variante B1 durch den sich

aufbauenden Gasdruck übertroffen wird, und somit Gasmengen ins Gebirge infiltrieren könnten. Nach dem aktuell vorliegenden Kenntnisstand ist es nicht möglich, die Reichweite der Fluidinfiltration genau anzugeben. Sie hängt vor allem von der Speicherkapazität des im Salzgebirge vorhandenen Mikroporenraums ab. Allerdings zeigen die Berechnungen, dass die Druckerhöhungsrate so gering ist, dass kein Makroriss im Steinsalz zu erwarten ist /POP 07/. Insgesamt ist die errechnete Gasmenge, die in das Salzgestein infiltriert, unter in situ-Bedingungen mit 1,5 bis 560 m³ (je nach Rechenfall) sehr klein. Hierzu ist weiterhin anzumerken, dass den Berechnungen die unrealistische Annahme eines instantan, d. h. augenblicklich, befüllten und verschlossenen Endlagers zugrunde liegt. Die Vernachlässigung des Einlagerungszeitraums ist im Hinblick auf die Gasbildung und den Gasdruckaufbau allein schon als konservativ einzuschätzen. Weiterhin ist zu beachten, dass insbesondere im Fall der Variante B1 die errechnete Gasmenge der Annahme einer aus heutiger Sicht unrealistisch hohen Feuchtemenge in den Behältern (z. B. 18 kg Restfeuchte pro POLLUX[®]-Behälter³⁴) geschuldet ist, die zur sofortigen Korrosion und Gasbildung verfügbar ist.

Im Ergebnis des Integritätsnachweises zu den Referenzfällen bleibt eine zur Ausweitung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausreichend mächtige geologische Barriere um die Einlagerungsbereiche erhalten. Formal muss diese Aussage dadurch eingeschränkt werden, dass bei der Simulation der Fluidodynamik im Grubengebäude mit dem Programm TOUGH2 nur die Einlagerungsvariante AB1 berechnet wurde. Es ist jedoch kein Grund erkennbar, warum die Berücksichtigung der Einlagerungsvarianten AB2 bzw. AC zu ungünstigeren Ergebnissen führen sollte, zumal die errechneten erhöhten Gasdrücke vor allem auf die (optionale) Einlagerung vernachlässigbar wär-

³⁴ Zum Zeitpunkt der Durchführung der Integritätsanalysen /KOC 12/ lagen noch keine verlässlichen Angaben zu Restfeuchtemengen in den Brennelementbehältern vor. Die Maximalabschätzung einer maximal verfügbaren Restfeuchtemenge von 18 kg im Innenraum eines jeden POLLUX[®]-10-Behälters beruhte auf der Annahme, dass sämtliche Brennstäbe bei Entnahme aus dem Reaktor defekt sind und damit eine extrem hohe Restfeuchte aufweisen und ohne weitere Maßnahmen in POLLUX[®]-Behälter eingelagert werden.

In einem nach Abschluss der Integritätsanalysen erstellten Memorandum für die VSG /DÖR 12/ wurde auf der Grundlage einer Recherche bei den Abfallverursachern festgestellt, dass diese Restfeuchtemengen unrealistisch hoch sind. Auf der Grundlage von Richtlinien, die festlegen, wie mit defekten Brennstäben vor der Zwischenlagerung umzugehen ist, wurden die Restfeuchtemengen auf ca. 60 g pro Brennelementbehälter korrigiert. Diese entsprechen den Angaben in Tab. 5.5 in Kapitel 5.1.1. Aufgrund der beschränkten Laufzeit des Vorhabens VSG konnten die Integritätsanalysen diesbezüglich nicht mehr korrigiert werden. Die korrigierten, geringeren Restfeuchtemengen in POLLUX[®]-Behälter lagen jedoch der radiologischen Konsequenzenanalyse zugrunde, wobei hier aus Vergleichsgründen auch Rechnungen mit den unrealistisch hohen Restfeuchtemengen von 18 kg pro Brennelementbehälter durchgeführt wurden.

meentwickelnder Abfälle zurückzuführen ist, welche bei allen Einlagerungsvarianten unterstellt wird.

Ergebnisse der Integritätsprüfung der Alternativszenarien:

Die im Rahmen der Integritätsanalysen untersuchten Alternativszenarien sind in Tab. 5.16 aufgelistet. Die Analysen zur Integritätsprüfung zeigten, dass auch für die Alternativszenarien A1a3 und A1a4 (Sicherheitsabstand, unentdeckte Klüfte) sowie A1a5 (Integrität der Schwebel) die Integrität einer ausreichend mächtigen geologischen Barriere um das Endlagerbergwerk gegeben ist. Auswirkungen aus diesen Alternativszenarien mussten somit im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse nicht gesondert betrachtet werden. Dies gilt ebenso für die Betrachtung unterschiedlicher Kriechraten (A1i3), einer erhöhten Metallkorrosion (A1i4) und einer erhöhten Inlandseismächtigkeit (A1i5).

Tab. 5.16 Alternativszenarien zur Integritätsprüfung, aus /KOC 12/

Anlass	Rechenfall	Bezeichnung
Spezifische Annahmen	Sicherheitsabstand unterschritten wegen Fehlinterpretation der Erkundungsergebnisse	A1a3
	Sicherheitsabstand unterschritten wegen unentdeckter Klüfte	A1a4
	„Erkundungssohle“	A1a5
Initial-FEP mit weniger wahrscheinlicher Ausprägung	Initial-FEP Konvergenz	A1i3
	Initial-FEP Metallkorrosion	A1i4
	Initial-FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	A1i5
	Initial-FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden ins Salzgestein	A1i8

Die Analyse der Auswirkungen der FEP *Diapirismus*, *Subrosion* und *glaziale Rinnenbildung* auf die geologische Barriere ergab, dass für die Alternativszenarien das Salzgestein bis mindestens 250 m oberhalb des konzipierten Einlagerungshorizonts erhalten bleibt. Auswirkungen aus diesen Alternativszenarien mussten daher im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse nicht gesondert betrachtet werden.

Die zur druckgetriebenen Infiltration von Gas ins Salzgestein zur Verfügung stehende Gasmenge ist im Alternativszenarium A1i8 (druckgetriebene Infiltration von Fluiden ins Salzgestein) mit 1200 m³ unter in situ-Bedingungen weitaus höher als im Referenzszenarium. Hauptursache hierfür ist wie beim Referenzszenarium die Gasbildung der ver-

nachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel. Für die Alternativszenarien gelten die gleichen Anmerkungen zur Gasentwicklung und zum Druckaufbau wie für das Referenzszenarium. Ähnlich wie beim Referenzfall ist anzumerken, dass den Berechnungen der Konsequenzen die Annahme eines instantan, d. h. direkt nach dem Verschluss des Endlagers, zugrunde liegt. Die Vernachlässigung des Einlagerungszeitraums ist im Hinblick auf die Gasbildung und den Gasdruckaufbau als extrem konservativ einzuschätzen. Weiterhin ist die errechnete Gasmenge z. T. auf die Annahme einer unrealistisch hohen Feuchtemenge in den POLLUX®-Behälter mit 18 kg Restfeuchte pro Behälter zurückzuführen (s. Ausführungen zum Referenzszenarium). Ähnliches gilt für die massenbezogenen Restfeuchten in den Behältern für verpresste Strukturteile oder für sonstige vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle. Auch die Annahme, dass diese Restfeuchten vollständig zur praktisch sofortigen Korrosion und Gasbildung verfügbar sind, kann als extrem konservativ angesehen werden. Beim Alternativszenarium A1i8 wird angesetzt, dass der Schwellenwert für die Infiltration ins Wirtsgestein 2 MPa niedriger als die minimale Hauptspannung (demnach 16,8 MPa) ist. Insgesamt wird daher eingeschätzt, dass die extrem pessimistischen Annahmen, die dem Rechenfall A1i8 zugrunde liegen, zu einer erheblichen Überschätzung der gebildeten Gasmengen und damit zu einer realitätsfernen Überschätzung der Auswirkungen auf die geologische Barriere führten. Jedoch zeigt sich in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit, dass die Restfeuchtegehalte insbesondere in den Gebinden für vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle durch geeignete Maßnahmen wie Trocknung und ggf. Veraschung reduziert werden sowie zuverlässig bestimmt und deklariert werden (vgl. Empfehlungen in Kapitel 7.2.1). Im Hinblick auf eine realitätsnahe Behandlung des Problems wurden in /KOC 12/ weitere F&E-Arbeiten identifiziert.

Fazit:

Es konnte die Integrität für einen Bereich der geologischen Barriere um das Endlagerbergwerk herum nachgewiesen werden, der in der Horizontalen auf einige Zehner Meter und in der Vertikalen oberhalb und unterhalb der projektierten Einlagerungssohle einige hundert Meter umfasst. Sowohl der Integritätsnachweis für die wahrscheinlichen Entwicklungen als auch die Integritätsprüfung für die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ergaben, dass die einschlusswirksamen Eigenschaften für große Bereiche der geologischen Barriere erhalten bleiben und die Entstehung durchgehender Wegsamkeiten bis in die Einlagerungsbereiche nicht zu besorgen ist. Aus den oben genannten Gründen wird davon ausgegangen, dass bei Ansatz realistischer Restfeuchtemengen auch im Fall des Alternativszenariums A1i8 der Schwellenwert für die

Infiltration ins Wirtsgestein 2 MPa niedriger als die minimale Hauptspannung ist. Lokale Verletzungen der Integritätskriterien im Bereich des Salzspiegels und der konturnahen Auflockerungszone sind jedoch möglich.

Die Untersuchungen deckten umfassend die für die Integritätsanalysen relevanten Szenarien ab. Durch die Betrachtung potenziell integritätsgefährdender Prozesse in unterschiedlicher Skalengröße und Dimensionalität ist eine Diversität der Nachweisführung gegeben. Aufgrund der Übereinstimmung von Ergebnissen, die durch diversitäre Berechnungsansätze, aber auf gleichen Skalengrößen, unter gleichen Rand- und Anfangsbedingungen erzielt wurden, erhöht sich das Vertrauen in das Ergebnis und die Bewertung der Analysen.

5.2.2.2 Nachweis der Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke

Die geotechnischen Verschlussbauwerke (Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse) wurden in Kapitel 5.1.4 beschrieben. Sie müssen als schnell wirksame Barrieren im Verbund mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich den Einschluss der Abfälle in dem Zeitraum, in dem der Salzgrusversatz seine Dichtwirkung noch nicht entfaltet, gewährleisten. Es muss daher der Nachweis geführt werden, dass die auslegungskonforme Funktion der Verschlussbauwerke mindestens über die in Kapitel 5.1.4 erläuterte Funktionsdauer gewährleistet ist. Die Anforderung an die geotechnischen Verschlussbauwerke ist dann erfüllt, wenn der vorgegebene hydraulische Widerstand und die Bauwerksintegrität im vorgesehenen Funktionszeitraum gegeben sind.

Konzept der Nachweisführung:

Das Verschlussystem wurde in seiner Entwurfsphase (Vorbemessung) soweit konkretisiert /MÜL 12a/, dass seine relevanten hydraulischen Kenngrößen für die weiteren Nachweisfelder genutzt werden konnten, wie etwa für die begleitenden Integritätsanalysen der geologischen Barriere und die radiologische Konsequenzenanalyse.

Für die vertiefte Nachweisführung /MÜL 12b/ kam das in Abb. 5.25 dargestellte, ingenieurtechnische Nachweiskonzept zur Anwendung. Dabei war für das Verschlussystem die Bauwerksintegrität Voraussetzung für den Erhalt des ausreichenden hydraulischen Widerstands. Schacht- und Streckenverschlüsse sind aufgrund ihrer Auslegung und ihrer räumlichen Entfernung voneinander eigenständig wirkende Systeme und

nicht miteinander gekoppelt. Daher konnten sie in der Nachweisführung getrennt behandelt werden. Auch im Falle des Schachtverschlusses sind nachweistechnisch die drei Dichtelemente (ohne die Langzeitdichtung aus vorkompaktiertem Salzgrus) im Ergebnis der Vorbemessung konstruktiv voneinander entkoppelt. Die Einzelnachweise wurden daher an Substrukturen geführt, die die einzelnen Dichtelemente und die ihnen zugeordneten Widerlager beinhalten. Die Anfangs- und Belastungsbedingungen der Substrukturen ergaben sich jedoch aus dem Zusammenwirken der einzelnen Funktionselemente.

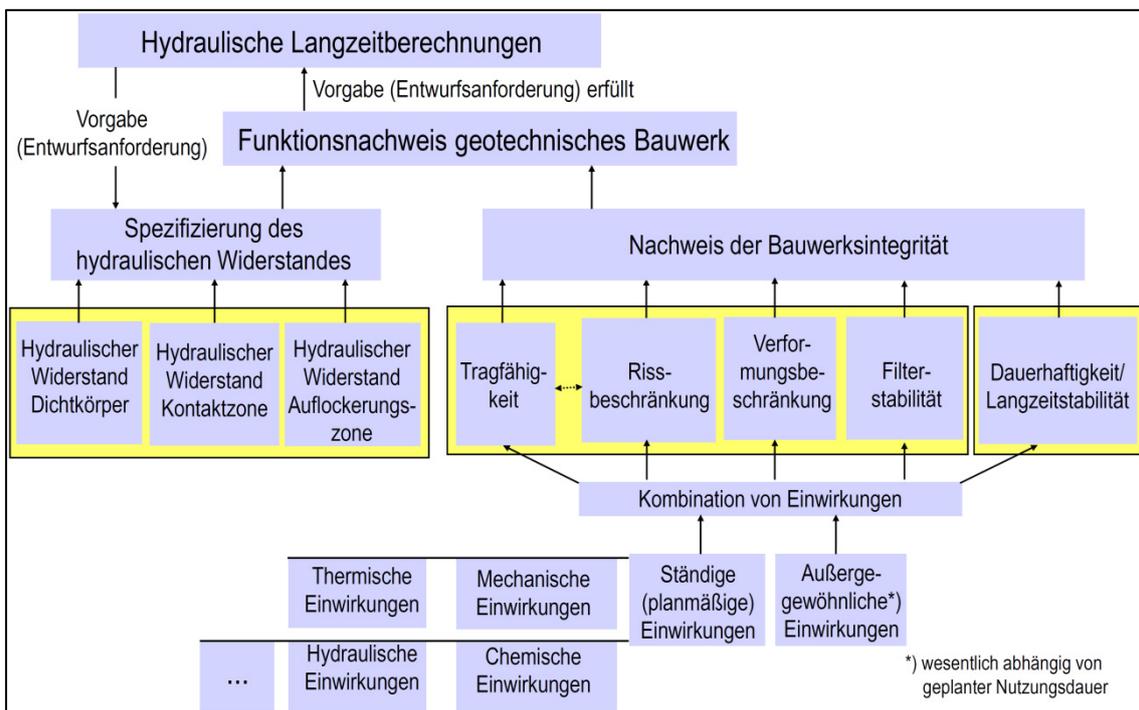


Abb. 5.25 Struktur des technischen Funktionsnachweises für das Verschlusssystem; hydraulische Einwirkungen (hydromechanische Einwirkungen), thermische Einwirkungen (thermochemische und thermo-mechanische Einwirkungen), aus /MÜL 12a/

Im Rahmen der vertieften Nachweisführung zur Integrität der Verschlussbauwerke wurden die Ergebnisse der Vorbemessung mittels nachstehend aufgeführter numerischer Modellrechnungen überprüft. Im Einzelnen erfolgten:

1. Untersuchungen zur Auswirkung des Spannungsaufbaus (Gebirgsdruck) auf die Verschlusselemente, um die hydraulischen Annahmen der Vorbemessung für die Auflockerungszone durch numerische Berechnungen zu untermauern. Die aus dem entsprechenden Alternativszenarium resultierende außergewöhnliche Bemessung

sungssituation mit der wenig wahrscheinlichen Einwirkung einer geringen Konvergenz, bedingt durch eine Kriechklasse³⁵ unterhalb der erwarteten Bandbreite (ungünstiger Fall), wurde in diesem Kontext mit behandelt.

2. Untersuchung zu Auswirkungen der thermischen Einwirkungen durch die eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle auf den Schachtverschluss und die dadurch verursachten Zwangsverformungen/Zwangsspannungen infolge thermische Expansion und Kontraktion. Dieser Fall deckt die geologisch induzierte Zwangsverformung durch zukünftige Halokinese des Salzstocks mit ab.
3. Untersuchung zur Auswirkung von deckgebirgsseitigem Lösungsdruck auf den Schachtverschluss durch hydromechanisch gekoppelte Modellierungen am 1. Dichtelement aus Bentonit. Das Quellen des Bentonits ist in diese Untersuchung integriert.
4. Untersuchungen zur Auswirkung eines Gasdruckaufbaus im Endlager auf die Streckenverschlüsse.
5. Untersuchung der hydromechanischen Einwirkungen auf die Streckenverschlüsse im Fall des Schachtverschlussversagens.

Einzelnachweise und Ziele:

Zum Nachweis der Einhaltung eines im Sinne der Vorbemessung ausreichenden hydraulischen Widerstands sowie zum Nachweis des Erhalts der Bauwerksintegrität innerhalb des Funktionszeitraums waren folgende Nachweise rechnerisch oder versuchsgestützt zu erbringen (s. Abb. 5.25):

1. Nachweis eines über den Wirkzeitraum ausreichenden hydraulischen Widerstandes: Dies betrifft die Gesamtpermeabilität des Abdichtbauwerkes für Salzlösung und Gase, die sich unter Berücksichtigung der hydraulischen Widerstände der einzelnen Baukörper der Dichtelemente, der Kontaktzone zum angrenzenden Salzgestein sowie der Auflockerungszone im angrenzenden Salzgestein ergibt.
2. Nachweis der Tragfähigkeit: Hierbei ist zu zeigen, dass die Einzelelemente (Dichtelemente und Widerlager) eines Abdichtbauwerkes allen Einwirkungen auf sie ge-

³⁵ Zur Bewertung des Kriechvermögens von Steinsalz wurden Kriechklassen (von -1 bis 9) eingeführt /PLI 02/. Je größer die Kriechklasse, umso besser das Kriechvermögen.

wachsen sind und dass die Verformungsbeschränkung gegeben ist. Hierbei ist der Nachweis zu führen, dass sich die geplante Lage der Einzelemente im Gesamtbauwerk nicht in unzulässiger Weise verändert (oftmals abgedeckt durch den Nachweis der Rissbeschränkung).

3. Nachweis der Rissbeschränkung: Die Rissbeschränkung charakterisiert den Widerstand eines Dichtelementes gegenüber Rissbildung z. B. infolge mechanischer Beanspruchung oder infolge von Schwinden beim Abbindeprozess von Salzbeton.
4. Nachweis der Filterstabilität: Als Filterstabilität wird der Widerstand gegen Erosion und Suffosion bezeichnet. Nachzuweisen ist vor allem, dass die feinkörnigen Bestandteile eines Bentonit-Dichtelementes nicht in das darunter liegende grobkörnige Schotterwiderlager ausgespült werden.
5. Nachweis der Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit: In Anlehnung an /CEN 10/ ist ein dauerhafter Verschluss so zu bemessen, dass zeitabhängige Veränderungen der Eigenschaften das Verhalten des Verschlusses während des geplanten Funktionszeitraums nicht unvorhergesehen verändern, zum Beispiel bei der chemischen Einwirkung von Lösungen auf ein Dichtelement.

Diese Nachweise waren mindestens für alle zu betrachtenden Lastfälle, die sich aus den wahrscheinlichen Entwicklungen ableiten, zu erbringen.

Für das Verschlussystem wurden auf der Grundlage der Ergebnisse der Szenarientwicklung fünf Bemessungssituationen identifiziert. Für die Referenzszenarien waren dies die Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, „Referenzszenarium mit Erdbeben“ sowie für die Alternativszenarien die Bemessungssituationen „Versagen des Schachtverschlusses“ und „Versagen des Streckenverschlusses“. Weiterhin wurde als modifizierte Einwirkung „schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse unter/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“ im Rahmen einer außergewöhnlichen Bemessungssituation behandelt.

Das Schachtverschlussystem wurde für zwei Extremfälle betrachtet: einerseits unter Berücksichtigung der thermo-mechanischen Einwirkungen des Endlagers (Berechnungsmodell „heißer Schacht“) und andererseits unter den Bedingungen der Gebirgstemperatur ohne Einwirkungen des Endlagers (Berechnungsmodell „kalter Schacht“). Diese beiden Modelle decken eine große Bandbreite möglicher Anordnungen von Einlagerungsfeldern ab, da das Berechnungsmodell „heißer Schacht“ der Anordnung von Einlagerungsfeldern in größtmöglicher Nähe zum Schacht Gorleben 1 entspricht. Das

Berechnungsmodell „kalter Schacht“ entspricht der Anordnung von Einlagerungsfeldern in so großer Entfernung vom Schacht, dass die thermo-mechanischen Einwirkungen vernachlässigt werden können.

Ergebnisse der Analysen:

Schachtverschlussystem

Auf Basis vorlaufender Betrachtungen und Kalibrierungsrechnungen zu den Kriechklassen für Steinsalz unter Nutzung vorhandener in situ-Messergebnisse konnten für den Schachtverschluss aus den in /MÜL 12b/ dargelegten Gründen drei der fünf Bemessungssituationen als nicht relevant ausgeschlossen werden, so dass für den Schachtverschluss nur die Bemessungssituationen „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, und „Referenzszenarium mit Erdbeben“ zu behandeln waren. Weiterhin konnte auf Grundlage der Berechnungsergebnisse zur Validierung der thermo-mechanischen Randbedingungen aus dem Fernfeldmodell der BGR (Integritätsanalysen der geologischen Barriere), das den Einlagerungsbereich umfasst, für den Schachtverschluss gezeigt werden, dass die thermo-mechanisch bedingten Hebungen infolge der Abfallwärme höher und deutlich schneller sind als Hebungen, die sich im Nachweiszeitraum aus der natürlichen Halokinese ergeben, weswegen hierdurch das FEP *Diapirismus* mit abgedeckt ist.

Für die Bemessungssituation „**Referenzszenarium ohne Erdbeben**“ wurden für den Schachtverschluss Berechnungsergebnisse erzielt, die in Verbindung mit der Vorbemessung sowie ergänzend auf Grundlage von Versuchsdaten folgende Aussagen zulassen:

- Bei ordnungsgemäßer Bauausführung und hinreichend langsamen Lösungsdruckaufbau wird das 1. Dichtelement aus Bentonit in Verbindung mit den ihm zugeordneten Funktionselementen Filter und Widerlager seine Funktion bzgl. der mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen anforderungsgerecht erfüllen, da das Fluidruckkriterium nur temporär und lokal verletzt ist, das Dilatanzkriterium aber eingehalten wird. Weiterhin bleibt die (durch den Porendruck) bedingte Auflockerung beschränkt. Obwohl aus den Berechnungsergebnissen aufgrund der langen Rechenzeiten für die notwendigen hydromechanisch gekoppelten Berechnungen nur eine Trendaussage abgeleitet werden kann, wird diese durch die Versuchsergebnisse des Großversuchs zum Schachtverschluss Salzdetfurth zusätzlich gestützt. Für die betrachteten Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen

nen kann eine positive Eignungsprognose in Bezug auf die Funktionsfähigkeit des 1. Dichtelementes aus Bentonit gegeben werden, Einzelaspekte sind allerdings noch abzusichern.

- Die chemischen Einwirkungen auf das 1. Dichtelement aus Bentonit resultieren aus den möglichen hydrochemischen Zusammensetzungen der Deckgebirgswässer unter Berücksichtigung zusätzlicher Zementphasen, die aus dem deckgebirgsseitigen Schachtausbau resultieren. Wie bereits in Kapitel 5.1.4.4 erwähnt, erfolgten keine rechnerischen Analysen; der Effekt wird von Experten als vernachlässigbar gering eingestuft. Die Einschätzung ist jedoch noch durch zukünftige F&E-Arbeiten zu belegen.
- Bei ordnungsgemäßer Bauausführung und Lösungsdruckbeaufschlagung gemäß Vorbemessung wird das 2. Dichtelement aus Salzbeton in Verbindung mit den ihm zugeordneten Widerlagern seine Funktion bzgl. der mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen anforderungsgerecht erfüllen. Für die Berechnungsergebnisse zum „heißen Schacht“ gilt die Aussage uneingeschränkt, für die Berechnungsergebnisse zum „kalten Schacht“ ist nur eine Trendaussage möglich, da belastbare Ergebnisse aus hydromechanisch gekoppelten Berechnungen nicht vorliegen. Die Verletzung des Fluiddruckkriteriums für den fiktiven Porendruck im Falle der Berechnungen zum kalten Schacht ist jedoch so gering, dass davon ausgegangen werden kann, dass im Rahmen hydromechanisch gekoppelter Berechnungen das Fluiddruckkriterium eingehalten würde.
- Diese Trendaussage wird durch den Rechenfall „kalter Schacht mit Porendruck“ untermauert, der die positive Wirkung eines deckgebirgsseitigen Lösungsdrucks tendenziell belegt. Bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass noch Ungewissheiten bzgl. der Spannungsauswertung bei Annäherung an die möglicherweise Zwangsspannungen unterworfenen Kontaktzone zwischen Bauwerk und Salzgestein bestehen. Trotz dieser Ungewissheit belegen Versuchsergebnisse an einem prototypischen Abdichtbauwerk (Asse-Vordamm), dass Zwangsspannungen im Kontaktbereich nicht zu Permeabilitätswerten führen, die die Erfüllung der Funktionsanforderungen infrage stellen. Für die genannten Einwirkungen bzw. Einwirkungskombinationen kann eine positive Eignungsprognose in Bezug auf die Funktionsfähigkeit des Dichtelementes aus Salzbeton abgegeben werden, Einzelaspekte sind allerdings noch abzusichern.

- Die chemischen Einwirkungen auf das 2. Dichtelement aus Salzbeton resultieren aus den durch das Bentonitdichtelement sickenden und dadurch hydrochemisch veränderten Deckgebirgswässern sowie schachtinternen Lösungen. Hierzu wurden geochemische Berechnungen in der Phase der Vorbemessung durchgeführt, die zeigten, dass die eingeplante Opferschicht aus 10 m Salzbeton prinzipiell ausreicht, dem Korrosionspotenzial der zutretenden Lösungen zu begegnen /MÜL 12a/. Eine Ungewissheit besteht bzgl. lokalisierter Korrosion in der Kontaktzone. Der Einfluss lokalisierter Korrosion wird aufgrund der Bodensatzbildung der korrodierten Zementphasen als gering eingestuft. Die Einstufung ist durch vertiefte Untersuchungen der Kontaktzone zu belegen.
- Für das 3. Dichtelement aus Sorelbeton gelten bzgl. der mechanischen, hydraulischen und thermischen Einwirkungen die gleichen Aussagen wie für das 2. Dichtelement aus Salzbeton. Die durch das Salzbetondichtelement durchtretenden Lösungen, die bis zur Sorelbetonstabilität mit Bischofit an $MgCl_2$ aufgesättigt werden, besitzen kein Korrosionspotential gegenüber dem 3. Dichtelement aus Sorelbeton. Die geochemische Langzeitstabilität ist somit gewährleistet. Weiterer Untersuchungsbedarf wird hier nicht abgeleitet.

Für die Bemessungssituation „**Referenzszenarium mit Erdbeben**“ wurden für den Schachtverschluss in der vertieften Nachweisführung keine Untersuchungen durchgeführt, die über den Stand der Vorbemessung hinausgehen.

Im Rahmen der Vorbemessung waren die erdbebeninduzierten Setzungen der Schotter säule konservativ abdeckend auf analytischer Basis abgeschätzt worden. Sie erwiesen sich im Vergleich mit ausschließlich durch Auflast bedingten Setzungen als auslegungsbestimmend. Bedingt durch die Einführung des dränierten Widerlagers (vgl. Kap. 5.1.4.4) blieb die erdbebeninduzierte Auflockerung des Dichtelementes aus Bentonit rechnerisch innerhalb tolerierbarer Grenzen von 3 Vol.-%.

Bezüglich des 2. und 3. Dichtelementes aus Salz- und Sorelbeton wurde folgende Plausibilitätsbetrachtung geführt: Im Allgemeinen gilt, dass die Bemessungssituation Erdbeben bei geringen zusätzlichen Beschleunigungen, wie sie im Falle des Sicherheitserdbebens anzusetzen sind, die Auslegung nicht bestimmt, da die dynamischen Materialfestigkeiten und Steifigkeiten (Widerstände) i. d. R. stärker sind als die Beanspruchungen. Eine Ausnahme ist gegeben, wenn Scherversagen auftritt, da Scherfestigkeiten aufgrund der durch Erdbeben bedingten Normalspannungsreduktion absinken

können. Dieser Fall betrifft ggf. die Kontaktzone, da ein Schubversagen in der Kontaktzone ein potenzieller Versagensmodus ist. Da die Scherfestigkeit bei den zementgebundenen Dichtelementen konstruktiv jedoch nur in einem sehr geringen Maß ausgenutzt wird, wird ein Versagen in der Kontaktzone infolge Erdbeben ausgeschlossen. Im Hinblick auf eine belastbare Absicherung dieser Aussage ist dieser Sachverhalt jedoch zukünftig noch vertieft zu untersuchen.

Streckenverschlüsse

Um in der im Vorhaben VSG verfügbaren Zeit ein belastbares Ergebnis zu erzielen, wurde stellvertretend für die vier im Verschlusskonzept vorgesehenen Streckenverschlüsse ein „fiktiver“ Streckenverschluss repräsentativ untersucht. Dabei wurden die für die vier Streckenverschlüsse geltenden Randbedingungen und Einwirkungen so ungünstig kombiniert, dass im Hinblick auf die Zielsetzung der fiktive Streckenverschluss alle vier Streckenverschlüsse abdeckt. Der fiktive Streckenverschluss entspricht in seinen Abmessungen und weiteren lokationsspezifischen Randbedingungen dem Streckenverschluss Nord. Ihm wurde ein für den Streckenverschluss West geltender Temperaturverlauf bzw. isotherme Bedingungen zugeordnet sowie die Gasdruckentwicklung am Streckenverschluss Nord und eine Lösungsdruckentwicklung gemäß den Streckenverschlüssen Ost, Mitte und West. Das bedeutet, dass die jeweils an den 4 Verschlüssen maximal auftretenden thermischen und mechanischen Belastungen als Belastung dem fiktiven Streckenverschluss zugeschrieben wurden und durch ihn in den Rechnungen repräsentiert werden. Diese Vorgehensweise kann somit als abdeckend für alle 4 Streckenverschlüsse angesehen werden.

Für die Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“ wurde der „fiktive“ Streckenverschluss Nord mit Kriechklasse 3 unter isothermen Bedingungen und maximaler Gasdruckentwicklung behandelt.

Für die Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ wäre der fiktive Streckenverschluss Nord mit Kriechklasse 4 unter isothermen Bedingungen und Lösungsdruck ein erster zu betrachtender, prinzipiell abdeckender Rechenfall. Er ist durch die ungünstigere Kriechklasse 3 unter isothermen Bedingungen mit abgedeckt worden. Für die Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ wurde weiterhin die kombinierte Einwirkung Lösungs- und Gasdruck behandelt.

Die modifizierte Einwirkung „schnelleres/langsameres Kriechen infolge einer Kriechklasse unter-/oberhalb der als wahrscheinlich anzusehenden Bandbreite“ deckt durch Ansetzen der Kriechklasse 3 beim „fiktiven“ Streckenverschluss die Situation der Streckenverschlüsse Ost, Mitte und West ab, für die die günstigeren Kriechklassen ≥ 4 zu unterstellen sind.

Die Berechnungsergebnisse für den „fiktiven“ Streckenverschluss werden nachstehend zusammengefasst und auf die für den Lösungspfad maßgeblichen Streckenverschlüsse West, Mitte und Ost übertragen:

- Im Fall beidseitigen Gasdrucks, entsprechend der Bemessungssituation „Referenzszenarium ohne Erdbeben“, kommt es für den „fiktiven“ Streckenverschluss bei Ansatz von Kriechklasse 3 gemäß der Ergebnisse der Modellrechnungen zu einer vollständigen Stagnation des Rekompaktionsprozesses der bergbaubedingten Auflockerungszone und sogar zu einer erneuten Porositätszunahme, die allerdings nicht zu einer Überschreitung der Anfangspermeabilität führt. Ein anforderungsgerechter hydraulischer Widerstand ist somit immer vorhanden.
- Im Rechenfall einseitiger Lösungsdruck, der der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ zugeordnet wird, hat sich zum Zeitpunkt des Lösungsdruckanstiegs nach 1.300 Jahren in der Auflockerungszone aufgrund der Konvergenz des Wirtsgesteins bereits ein so hoher lithostatischer Druck aufgebaut, dass das Fluiddruckkriterium für den fiktiven Porendruck unverletzt bleibt. Diese Aussage kann auf den Fall der Einwirkungskombination einseitiger Lösungs- und einseitiger Gasdruck, der ebenfalls der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“ zuzuordnen ist, übertragen werden. Die Ausführungen zum Rechenfall beidseitiger Gasdruck sind dafür abdeckend, ein anforderungsgerechter hydraulischer Widerstand ist immer vorhanden.

Hinsichtlich der Vollständigkeit der berücksichtigten Einwirkungen in den Einzelnachweisen der Vorbemessung oder der vertieften Nachweisführung wird festgestellt:

- Die durch Temperaturänderungen ausgelösten chemischen Einwirkungen wurden nicht explizit untersucht. Dies betrifft sowohl die Barrierenbaustoffe als auch die zutretende Salzlösung, insbesondere wenn sie, wie im Fall der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“, in größerer Menge erwärmte Bereiche erreicht. Da der Baustoff Sorelbeton, der schon in seiner Erhärtungsphase Temperaturen ausgesetzt ist, die über den ermittelten Temperaturen an den Lokationen der

Streckenverschlüsse infolge der Wärmeproduktion der eingelagerten Abfälle liegen, ist dieser Fall abgedeckt. Das erhöhte Lösungspotential erwärmter Salzlösungen bedarf jedoch zusätzlicher Betrachtungen (s. FEP *Auflösung und Ausfällung* /WOL 12b/). Hierzu wird Forschungs- und Entwicklungsbedarf ausgewiesen. In Bezug auf die $MgCl_2$ -Aufsättigung wurde diesem Sachverhalt bereits empirisch Rechnung getragen, indem ein entsprechender Überschuss des Bischofitdepots im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle eingeplant wurde.

- Die Einwirkung Zwangsverformung (FEP *Diapirismus*) wurde für die Streckenverschlüsse nicht betrachtet. Die Streckenverschlüsse liegen alle im gleichen Teufen-niveau. Insofern sind für sie eine gleichmäßige Hebung sowie eine beschränkte Neigung unschädlich. Größere Neigungen können konstruktiv durch Segmentierung beherrscht werden. Deshalb beschränkt sich ihre Gefährdung auf Bereiche, wo gegenläufige Verformungen möglich sind, z. B. im Bereich von Sattelachsen oder Schichtgrenzen mit ausgeprägt unterschiedlichem Verformungsverhalten, was zu stark lokalisierter Verformung führen kann. In diesen Bereichen ist die Anordnung von Abdichtkörpern zu vermeiden. Anderenfalls muss das langfristige geomechanische Verhalten dieser Bereiche vertieft betrachtet werden.

Fazit:

Im Ergebnis der Vorbemessung und der vertieften Nachweisführung für das Schachtverschluss-system ist festzustellen, dass zwar nicht alle Nachweise, wie etwa zur Filterstabilität, vollständig geführt wurden. Der Nachweis der Filterstabilität wurde deshalb noch nicht vollständig geführt, da der erforderliche Planungstiefgang bezüglich der Korngrößenverteilungen der Filtermaterialien im Vorhaben VSG noch nicht gegeben war. Dennoch ist davon auszugehen, dass zukünftig geeignete Korngrößenabstufungen gewählt werden können und auch dieser Nachweis zukünftig geführt werden kann /MÜL 12b/.

Aus diesem Grund und da die anderen Einzelnachweise zur Bauwerksintegrität, wenn- gleich in unterschiedlichem Tiefgang, erfolgreich geführt werden konnten, kann für das geplante Verschluss-system eine positive Prognose für einen abschließenden Nach- weis der hydraulischen Funktionsfähigkeit des Schachtverschluss-systems gegeben werden, d. h. der im Rahmen der Vorbemessung spezifizierte hydraulische Widerstand kann aus heutiger Sicht erreicht werden.

Besonders hervorzuheben ist, dass der Schachtverschluss im Ergebnis der Vorbemessung drei unabhängige, voneinander entkoppelte Dichtelemente (ohne die Langzeitdichtung) mit jeweils eigenen Widerlagern aufweist, so dass es unwahrscheinlich ist, dass der Schachtverschluss als Ganzes versagt. Das wenig wahrscheinliche Szenarium „Versagen des Schachtverschlusses“ ist unter den angenommenen hydraulischen Eigenschaften extrem konservativ. Jedoch wurde dieses Szenarium auch zur Nachweisführung der Streckenverschlüsse zugrunde gelegt.

Im Ergebnis der Berechnungen für die aufgeführten Bemessungssituationen zum „fiktiven“ Streckenverschluss und der Übertragung der Berechnungsergebnisse auf die geplanten Streckenverschlüsse lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse ausreichen, um die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse in ihrer Anordnung in Bezug auf die Zielsetzung zu bewerten. Aus den Ergebnissen kann ebenfalls eine positive Prognose in Bezug auf die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse in ihrer geplanten Anordnung gegeben werden. Für die Funktionsfähigkeit der Streckenverschlüsse sind insbesondere die verzögernden und druckbrechenden Funktionselemente des Verschlusssystems (poröse Filter und Widerlager im Schachtverschlussbauwerk und Infrastrukturbereich) von Bedeutung, die auch bei Versagen der Dichtelemente einen schnellen konvergenzbedingten Druckaufbau in der Auflockerungs- und Kontaktzone, der durch einen porendruckbedingten Gegendruck wahrscheinlich nicht verlangsamt wird, ermöglichen, so dass die Integrität gegeben ist.

In Bezug auf die geochemische Langzeitstabilität der Streckenverschlüsse ist die Auf sättigung mit $MgCl_2$ durch das vorlaufend angeordnete Bischofitdepot von entscheidender Bedeutung. Deshalb bezieht sich die positive Prognose auf die Streckenverschlüsse als Bestandteil des konzipierten Verschlusssystems im Zusammenwirken mit den übrigen Funktionselementen.

Bezüglich einer genehmigungsreifen technischen Umsetzung der Schacht- und Streckenverschlussbauwerke unter Praxisbedingungen besteht, wie bereits in Kapitel 5.1.4.4 erwähnt, noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Die Herstellbarkeit des Verschlusssystems unter Praxisbedingungen liegt allerdings infolge bereits existierender Prototypen und Bauwerke nahe /MÜL 12a/.

In Bezug auf den ausstehenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu den Streckenverschlüssen ist folgendes festzustellen:

Durch Temperaturänderungen ausgelösten chemischen Einwirkungen wurden nicht explizit untersucht. Dies betrifft sowohl die Barrierenbaustoffe als auch die zutretende Salzlösung, insbesondere wenn sie, wie im Fall der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“, in größerer Menge erwärmte Bereiche erreicht. Für den Baustoff Sorelbeton, der schon in seiner Erhärtungsphase Temperaturen ausgesetzt ist, die über den ermittelten Temperaturen an den Lokationen der Streckenverschlüsse infolge der Wärmeproduktion der eingelagerten Abfälle liegen, ist dieser Fall abgedeckt. Das erhöhte Lösungspotential erwärmter Salzlösungen bedarf jedoch zusätzlicher Betrachtungen (s. FEP *Auflösung und Ausfällung* /WOL 12b/). Hierzu wird in /MÜL 12a/ Forschungs- und Entwicklungsbedarf ausgewiesen. In Bezug auf die $MgCl_2$ -Aufsättigung wurde diesem Sachverhalt bereits empirisch Rechnung getragen, indem ein entsprechender Überschuss des Bischofitdepots im Infrastrukturbereich der Erkundungssohle eingeplant wurde. Konstruktiv sind auch Alternativen, z. B. die Anordnung eines zusätzlichen Streckenverschlusses im schachtnahen Bereich, der die Menge an Salzlösung in den erwärmten Bereichen und damit das Lösungspotential zusätzlich beschränkt, denkbar. Dazu ist jedoch anzumerken, dass nach derzeitigem Erkundungsstand im Bereich des Schachtes Gorleben 1 ein solcher Streckenverschluss nur sinnvoll angeordnet werden kann, wenn der Anschluss der Einlagerungssohle an den Schacht im Teufenniveau von etwa 880 m im Süden durch das Anhydritmittelsalz erfolgt. Dies sollte im Rahmen einer zukünftigen Erkundung berücksichtigt werden, damit dieser Bereich nicht durch bergbauliche Auffahrungen wie Nischen und Bohrorte für Abdichtungszwecke unbrauchbar wird.

5.2.3 Einschluss der Radionuklide und Einhaltung der radiologischen Schutzziele

Die Bewertung des Einschlussvermögens des Endlagersystems erfolgte anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den Lösungspfad und über den Gaspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Für die radiologische Langzeitaussage wurde das Bewertungskonzept nach /MÖN 12/ für das vereinfachte Nachweisverfahren zugrunde gelegt. In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ wird die vereinfachte radiologische Langzeitaussage nur für in der wässrigen Phase gelöste Radionuklide skizziert. Zur radiologischen Bewertung von gasförmig freigesetzten Radionukliden wurde in /LAR 13/ – analog zum Vorgehen beim Lösungstransport – ein generisches Expositionsmodell für gasförmig freigesetzte Radionuklide in Ansatz gebracht. Das Expositionsmodell sieht

ein bewohntes Wohnhaus vor, in das die Aktivitätsströme der Radionuklide, die über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich gelangen, eingeleitet werden. Es wird fiktiv die radiologische Konsequenz aufgrund der Aktivitätsströme ermittelt.

Konzept der Nachweisführung:

In der radiologischen Konsequenzenanalyse wurden die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden aus dem Endlager ermittelt, sowohl für das erwartete Systemverhalten in der Langzeitphase, als auch für die aufgrund von Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems für die in der Szenarienentwicklung systematisch abgeleiteten Szenarien. Dabei waren im Einzelnen die folgenden Aspekte zu bearbeiten:

- Analyse des Lösungsangebotes im Endlagerbergwerk: Es war zu untersuchen, welche Lösungsmengen für die zu untersuchenden Szenarien jeweils im Grubengebäude und insbesondere in den Einlagerungsbereichen zu unterstellen sind. Hierbei war einerseits die Barrierenwirkung der geotechnischen Verschlussysteme zu überprüfen und zu klären, ob und ggf. in welchem Umfang es zum Eindringen externer Lösungen (Deckgebirgs- oder Formationswässer) von außerhalb in die Einlagerungsbereiche kommen kann. Dabei waren auch weniger wahrscheinliche Entwicklungen zu berücksichtigen, bei denen einzelne Abdichtbauwerke den an sie gestellten Entwurfsanforderungen nicht vollumfänglich genügen. Andererseits waren interne Lösungsmengen zu betrachten, die als Restfeuchte im Salzgrusversatz und in den Abfallbehältern zu unterstellen sind.
- Analyse von Korrosionsprozessen und Gasbildung: In Abhängigkeit von den abfallnah zu unterstellenden Lösungsmengen war zu prüfen, in welchem Ausmaß eine Korrosion der Metalle der Abfallbehälter stattfindet und in welchem Umfang es zur Gasbildung infolge Metallkorrosion kommt. Dabei war auch der Einfluss des Gastransportes auf die Hydraulik etwaiger im Grubengebäude vorhandener Lösungen sowie auf den zeitlichen Verlauf der Salzgruskompaktion mittels Zweiphasenflussrechnungen zu untersuchen.
- Analyse der Radionuklidfreisetzung und ihres Transports im Grubengebäude: Für den Fall, dass ein Lösungszutritt zu den Abfällen nach Verlust der Dichtigkeit von Behältern nicht ausgeschlossen werden kann, war das zeitliche Freisetzungsverhalten von Radionukliden aus den Abfällen (Quellterme) zu bestimmen. Entsprechendes gilt für die Freisetzung von gasförmigen Radionukliden, wobei diese schon

durch Reaktion der Abfälle mit den internen Lösungen (Abfall und abfallnahen Versatz) freisetzt sind. Hiernach war entsprechend der Lösungs- und Gasflussdynamik und unter Berücksichtigung des möglichen Auspressens von Lösungen und Gasen infolge der konvergenzbedingten Salzgruskompression der Transport von gelösten und gasförmigen Radionukliden im Grubengebäude und ggf. durch die geotechnischen Abdichtbauwerke hindurch zu analysieren.

- Ermittlung der radiologischen Konsequenzen: Nach Maßgabe des Sicherheits- und Nachweiskonzepts des Vorhabens VSG waren für verschiedene Gebirgsbereiche in der Umgebung der konzipierten Endlagerbergwerke Aufpunkte zur Bewertung ihres Einschlussvermögens entlang der Transportwege der Radionuklide festzulegen /MÖN 12/. Hierbei waren alle Wegsamkeiten, die zu einem Transport von Radionukliden aus dem Gebirgsbereich beitragen können, zu berücksichtigen. Zur Bewertung des Einschlussvermögens waren an den Aufpunkten die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden zu analysieren. Unter Verwendung wissenschaftlich anerkannter Expositionsmodelle wurde getrennt für den Lösungspfad und den Gaspfad jeweils ein radiologischer Indikator (RGI) errechnet, der im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG aus den Schutzkriterien der Sicherheitsanforderungen des BMU (Abschnitte 6.2 und 6.3 in /BMU 10a/) abgeleitet worden war (vgl. Kap.4.2.4).

Für die radiologische Konsequenzenanalyse wurden zwei Rechencodes eingesetzt, der Einphasencode MARNIE für den Lösungstransport und der Zweiphasencode TOUGH2 für den gekoppelten Lösungs- und Gastransport. Beide Codes ergänzten sich sowohl hinsichtlich des Modellaufbaus des Endlagerbergwerks als auch im Hinblick auf das Transportverhalten von Lösungen, Gasen und Radionukliden. Analyseergebnisse waren i. d. R. die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden sowohl in der Lösung als auch in der Gasphase über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich des Endlagerbergwerks und von dort aus weiter über die Schachtverschlüsse in Richtung Deckgebirge.

Im Hinblick auf die Zielsetzung, mit TOUGH2 Transporte von radioaktiven Gasen zu betrachten, wurden Berechnungen für die in gasförmigen Verbindungen auftretenden Radionuklide ^{14}C und ^{129}I durchgeführt. In den MARNIE-Modellrechnungen wurden alle zur Ermittlung der radiologischen Konsequenzen relevanten Radionuklide berücksichtigt. Dies sind sowohl Spalt- und Aktivierungsprodukte mit Halbwertszeiten > 20 Jahren als auch Radionuklide aus der Thorium-, Neptunium-, Uran- und Actinium-Zerfallsreihe.

Die Beschreibung der Freisetzung der Radionuklide aus den Abfallbehältern in die Lösung basiert auf Freisetzungsmodellen für die unterschiedlichen Abfallarten. Dabei wird nach einem Kontakt mit wässrigen Lösungen zunächst der Behälterausfall berücksichtigt, danach die Freisetzung aus den verschiedenen Abfallmatrizes. Die geochemischen Randbedingungen und die zu berücksichtigenden Löslichkeitsgrenzen der jeweiligen Radionuklide wurden im Vorfeld der Konsequenzenanalysen in technische Berichte für das Vorhaben VSG zusammengestellt /KIE 12, KIE 13/. Das Anfangsinventar der Radionuklide für die Freisetzungsberechnungen wurde dem Abschlussbericht /PEI 11b/ entnommen.

Bei allen Rechnungen wurde eine mögliche Adsorption von Radionukliden an Festphasen, z. B. Korrosionsprodukte der Behälter bzw. der Verschlüsse vernachlässigt. Der radioaktive Zerfall wurde mit den entsprechenden nuklidspezifischen Halbwertszeiten in den Berechnungen berücksichtigt. Diffusion der Komponenten in der Flüssig- und Gasphase wurde ebenfalls betrachtet. Es wurde angenommen, dass die Radionuklide in den gasförmigen Verbindungen nicht chemisch mit den Phasen reagieren und daher als inerte Tracer betrachtet werden können.

Die Umsetzung des Endlagerbergwerks in Rechenmodelle erfolgte entsprechend den Bedingungen der jeweiligen Rechencodes. Grundlage für beide Modelle war das in /BOL 11/ erstellte und dann aufgrund der geänderten Abfallmengen aktualisierte Endlagerkonzept des Vorhabens VSG /BOL 12/.

Für MARNIE wurde das Endlagerbergwerk in einzelne Module zerlegt und eine Netzwerkstruktur aufgebaut, die aus eindimensionalen Segmenten besteht /LAR 13/. Diese Netzwerkstruktur erlaubte die Modellierung des Endlagerkonzepts in der Variante AB1 ohne vereinfachende Abstrahierungen bezüglich des Grubenbauplans. Das Grubenmodell für den Ostflügel des Endlagerbergwerks mit dem Infrastrukturbereich, den Querschlägen mit den Streckenverschlüssen sowie den Schächten ist in Abb. 5.26 dargestellt. Durch die Übernahme des Einlagerungsfahrplans /BOL 11/, /BOL 12/ wurden die bereits in der Betriebsphase einsetzende Kompaktion des Salzgruses in den versetzten Strecken und der radioaktive Zerfall der Radionuklide in den bereits endgelagerten Gebinden während der Betriebsphase berücksichtigt.

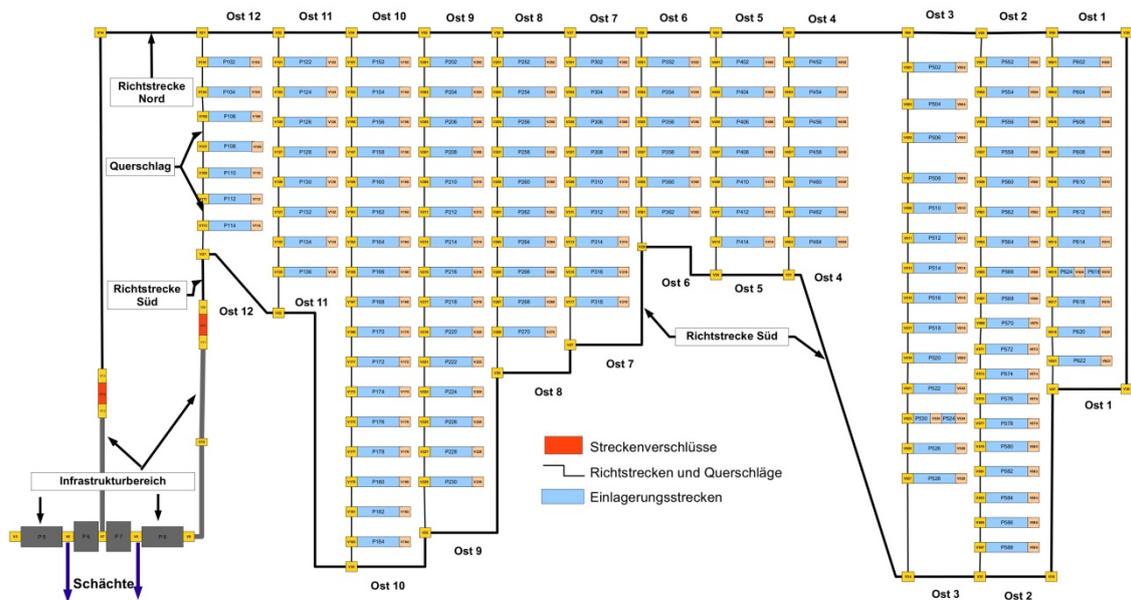


Abb. 5.26 Darstellung des Ostflügels (Einlagerungsvariante B1) mit dem Infrastrukturbereich auf der 870-m-Sohle im MARNIE-Grubenmodell

Im Unterschied dazu waren für die Nachbildung des Grubengebäudes in einem TOUGH2-Gitter geometrische Vereinfachungen notwendig. Einen Überblick über das Modellgitter gibt Abb. 5.27. Die TOUGH2-Berechnungen erfordern rechtwinklige Gitternetze, so dass das Grubengebäude mit einigen Vereinfachungen abgebildet werden musste. Wegen der Orthogonalität des Modellgitters entsprechen nicht alle Streckenlängen denen des Endlagerkonzeptes. Bei der Gittererstellung wurde darauf geachtet, dass die Volumina der Strecken und Hohlräume denjenigen des Endlagerkonzeptes entsprechen. Der Grund für die Wahl eines volumentreuen Gitters war die Relevanz der Volumina für den Gasdruck und -transport sowie weitere damit in Zusammenhang stehende Prozesse. Um Volumentreue zu erreichen, wurden die Streckenquerschnitte entsprechend angepasst. Die Anpassungen betreffen in erster Linie die südliche Richtstrecke und vereinzelt Querschläge (vgl. Abb. 5.26 und Abb. 5.27). Mit diesen Anpassungen treten auch Abweichungen von den hydraulischen Widerständen auf, deren Einfluss auf das Transportgeschehen der Fluide von untergeordneter Bedeutung ist. Neben den Gittervereinfachungen wurden auch einzelne Prozessabläufe vereinfacht modelliert. So wurde in TOUGH2 der Einlagerungsfahrplan nicht berücksichtigt, sondern das Einsetzen der Kompaktion des Salzgrusversatzes, der Gasentwicklung und der Freisetzung von Radionukliden in eine gasförmige Verbindung erfolgt im Modell instantan mit dem Verschluss des Endlagers.

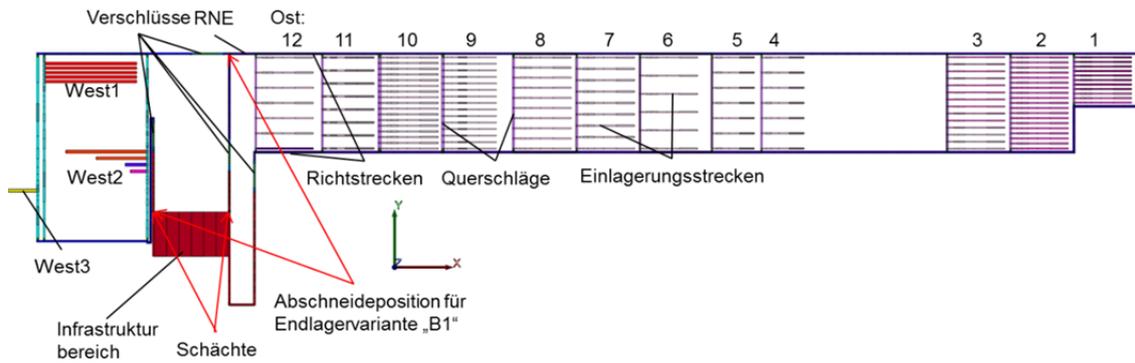


Abb. 5.27 Modellgitter des Grubenbaus für die Einlagerungsvarianten AB1 und B1 im TOUGH2-Grubenmodell

Um den Einfluss von Parameter- und Datenungewissheiten auf die Analyseergebnisse bewerten zu können, wurden zusätzlich Analysen mit Variationen der Parameter und Randbedingungen durchgeführt. Weiterhin wurde mit beiden Rechenprogrammen der Einfluss bestehender Prozess- und Modellungewissheiten auf die Belastbarkeit der numerischen Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse ermittelt und bezüglich der Robustheit der Aussageergebnisse gewürdigt.

Einzelnachweise und Ziele:

Mit Hilfe der Einphasenrechnungen des Programms MARNIE wurde für das Referenzszenarium und die Alternativszenarien analysiert, ob und in welchem Umfang Lösungen über die Streckenverschlüsse in das Endlagerbergwerk eintreten, und wenn ja, ob die eingelagerten Abfälle von den Lösungen erfasst und Radionuklide aus den Abfällen freigesetzt werden können. Im Falle der Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen wurde der Radionuklidtransport in der Lösung analysiert mit dem Ziel, die über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich gelangten Aktivitätsströme entsprechend dem Bewertungskonzept /MÖN 12/ radiologisch zu bewerten.

Ziel der Zweiphasenrechnungen für das Referenzszenarium und die Alternativszenarien war es, sowohl das Vordringen von Lösung unter Zweiphasenbedingung als auch den Transport der Gasphase bzw. Lösungsphase inklusive den darin ggf. enthaltenen Radionukliden zu analysieren. Im Falle der Freisetzung von Radionukliden aus einem Endlagerbehälter wurde jeweils festgestellt, ob es unter Berücksichtigung der physikalischen Wechselwirkung der Radionuklide mit den Phasen einen Radionuklidtransport in der Lösung und/oder in der Gasphase über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich geben kann. Bei der Modellierung des Transports von Radionukliden in

der Gasphase wurde aufgrund unzureichender Kenntnisse eine Reihe von konservativen Annahmen getroffen, z. B. bezüglich der Verteilung von ^{14}C in CO_2 - oder CH_4 -Verbindungen.

Ein weiteres Ziel war die radiologische Bewertung der potenziell über den Streckenverschluss in den Infrastrukturbereich freigesetzten Radionuklide nach dem vereinfachten Nachweisverfahren zur radiologischen Langzeitaussage /BMU 10a/. Die Streckenverschlüsse werden hier als Aufpunkte (s. vorhergehende Diskussion zum Konzept der Nachweisführung) zur späteren Ermittlung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs verwendet. Zur radiologischen Bewertung ist für die mit der Lösung freigesetzten Radionuklide die im Nachweiskonzept (Kap. 4.2.4.1) vorgegebene Rechenvorschrift, für gasförmig freigesetzte Radionuklide eine analoge Rechenvorschrift /LAR 13/ herangezogen worden.

Ergebnisse der Analysen :

Einphasen-Lösungstransport

Die Analysen mit dem Programm MARNIE zu den als relevant identifizierten Szenarien weisen die folgenden Ergebnisse auf:

- Alle Rechnungen zum Radionuklidtransport in der Lösungsphase mit einer Restporosität des kompaktierten Versatzes von 1 % führen zu einer quasi Null-Freisetzung über die Streckenverschlüsse und damit zu einem RGI gleich 0 (vollständiger Einschluss der Radionuklide). Sowohl für das Referenzszenarium I als auch für die Alternativszenarien finden keine Freisetzung über die Streckenverschlüsse statt, da keine Lösungen aus dem Infrastrukturbereich zu den Abfällen vordringen können. Die vorhandenen Lösungsmengen in den Abfällen und im Versatz reichen nicht aus, die Behälter zu korrodieren oder Radionuklide in Lösung zu bringen. Auch Analysen mit Variation der Parameter ändern das Systemverhalten in Bezug auf die Freisetzung nicht, da auch in diesen Modellrechnungen keine oder eine rein rechnerische geringe Freisetzung von Radionukliden über die Streckenverschlüsse (= Rand des hier angenommenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, s. Kap. 5.2.5) erfolgt, die praktisch als Nullfreisetzung interpretiert werden kann (s. Abb. 5.28). Für den Lösungstransport ist somit der vollständige Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich als erfüllt anzusehen.

- Die Rechenfälle zu den Alternativszenarien Schachtverschlussversagen und Streckenverschlussversagen weisen im Ergebnis ebenfalls keine oder eine sehr kleine rechnerische Freisetzung von Radionukliden über die Streckenverschlüsse (= Rand des hier angenommenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) aus, die praktisch als Nullfreisetzung interpretiert werden kann. Auch für die Alternativszenarien ist der sichere Einschluss gegeben.

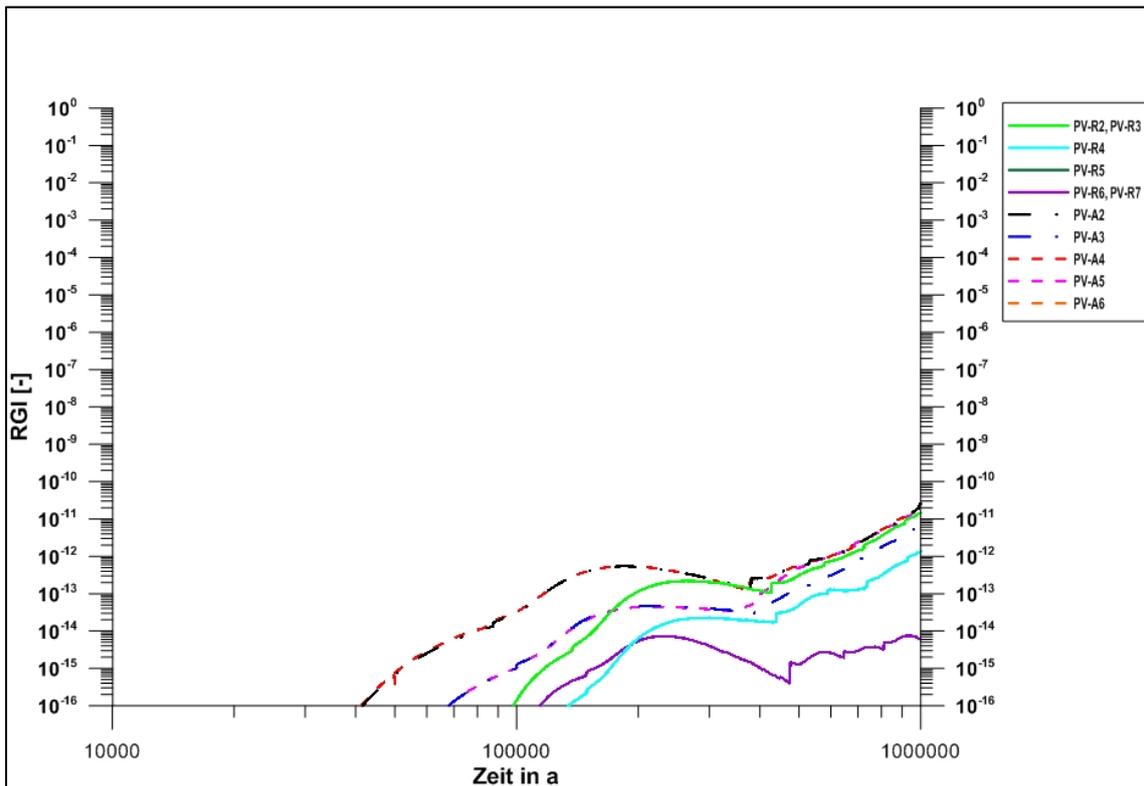


Abb. 5.28 RGI am Streckenverschluss Ost (Einlagerungsvariante B1) als Ergebnis durchgeführter Radionuklidtransportrechnungen: Ausschnitt aus den Parametervariationen des Referenz- und Alternativszenariums Schachtverschlussversagen, aus /LAR 13/

Zweiphasen-Transportrechnungen

Mit Hilfe der Zweiphasenrechnungen mit dem Programm TOUGH2 zu den als relevant identifizierten Szenarien wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Referenzszenarium

Die Freisetzung von ^{14}C aus dem Endlagerbehälter wurde konservativ als in CO_2 gebunden angenommen, wobei die ^{14}C -Aktivität zugrunde gelegt wurde, die als sofort freisetzbare Anteil (IRF, vgl. Kap. 5.1.1.2) ermittelt wurde. Mit dem Programm TOUGH2 wurden der ^{14}C -Aktivitätsfluss in Form eines CO_2 -Transportes in der Gas- und Flüssigphase im Endlager ermittelt und die Freisetzung von Radionukliden über die Streckenverschlüsse in Richtung Infrastrukturbereich berechnet. Dabei wurden die RGI für die Flüssig- und Gasphase und für die in der jeweiligen Einlagerungsvariante relevanten Streckenverschlüsse ermittelt und summiert. Für die Einlagerungsvariante B1 bedeutet dies, dass der RGI auf Basis eines CO_2 -Ausstroms und damit von ^{14}C -Aktivitätsströme über die beiden Streckenverschlüsse Mitte und Ost errechnet wird. In der Einlagerungsvariante AB1 wird der RGI für drei Streckenverschlüsse (West, Mitte und Ost) berechnet.

Endlagervariante B1: Defekte Behälter

Bei diesen Untersuchungen wurde die Auswirkung eines vorzeitigen Versagens eines Behälters aufgrund von Fertigungsfehlern analysiert. Dabei wurde im Referenzszenarium angenommen, dass vier POLLUX[®]-10-Behälter direkt zu Beginn der Nachverschlussphase versagen (im Folgenden als „defekt“ bezeichnet). Da deren Verteilung im Endlager auf die Einlagerungsstrecken nicht näher spezifiziert werden konnte, wurde in den Analysen konservativ davon ausgegangen, dass im Einlagerungsfeld Ost 12 (erstes Einlagerungsfeld hinter den Streckenverschlüssen, s. Abb. 5.29) ein defekter Behälter vorhanden ist. Diese Annahme wurde als wahrscheinlich eingestuft. Daraus leiteten sich mehrere Rechenfälle ab, in welchen der Ort der Freisetzung von Radionukliden variiert wird.

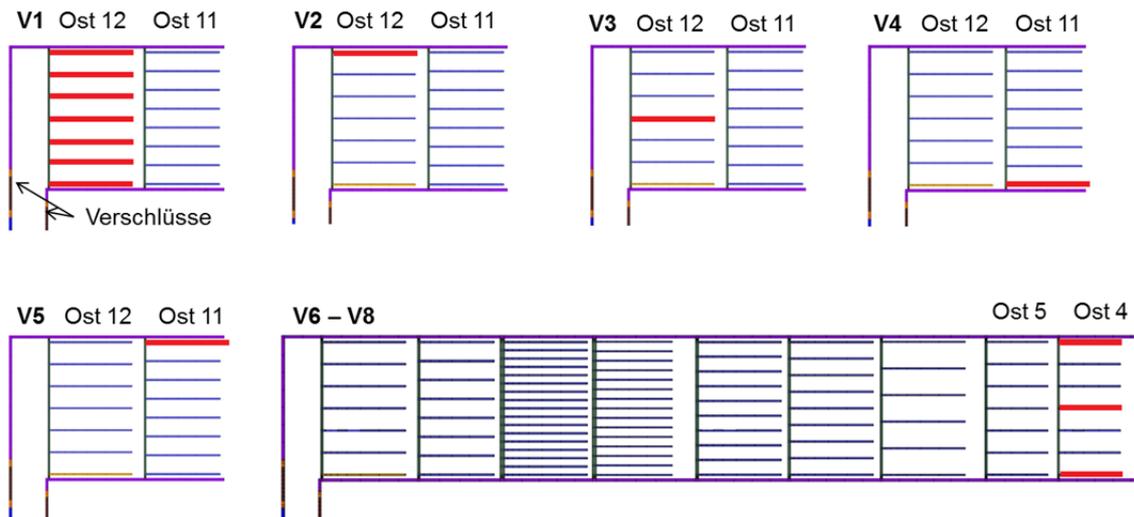


Abb. 5.29 Variation der Position defekter Behälter (Variante B1), aus /LAR 13/

Freisetzungsorte in Rot, der volatile IRF-Anteil eines Behälters wird freigesetzt in:

V1: im gesamtem Einlagerungsfeld Ost 12, V2: in der nördl. Strecke des Feldes Ost 12, V3: in der mittl. Strecke des Feldes Ost 12, V4: in der südl. Strecke des Feldes Ost 11, V5: in der nördl. Strecke des Feldes Ost 11, V6: in der nördl. Strecke des Feldes Ost 4, V7: in der mittl. Strecke des Feldes Ost 4, V8: in der südl. Strecke des Feldes Ost 4

Die Annahme von zwei defekten Behältern in einem Feld (insbesondere im ersten Einlagerungsfeld Ost 12) wurde als weniger wahrscheinlich eingestuft und deshalb als Eingabewert zu den Alternativszenarien zugerechnet, die Verteilung von drei defekten Behältern in einem Feld wird als unwahrscheinlich betrachtet. Auf die Berechnung weiterer möglicherweise als wahrscheinlich einzustufender Behälterverteilungen wurde verzichtet (z. B. Verteilung von zwei Behältern in benachbarten Feldern) und stattdessen ein abdeckender Rechenfall analysiert, in welchem davon ausgegangen wurde, dass sich in Feld Ost 12 ein defekter und im Nachbarfeld (Feld Ost 11) zwei defekte Brennelement-Behälter befinden (letzteres ist für sich bereits weniger wahrscheinlich). Der Einlagerungsort des vierten defekten Behälters östlich des Feldes Ost 11 spielt bzgl. der Höhe der ^{14}C -Freisetzung über die Streckenverschlüsse eine untergeordnete Rolle und wurde nicht weiter variiert.

Zusätzlich zu den defekten Behältern wurde gemäß /BEU 12b/ angenommen, dass die restlichen Brennelement-Behälter 500 Jahre lang gasdicht bleiben. Ab dem Zeitpunkt 500 Jahre ist in allen Rechenfällen die vollständige instantane Freisetzung des in die Gasphase freisetzbaren ^{14}C -Anteils angenommen worden.

Die Ergebnisse der Rechenfälle zur Variation der Freisetzungsorte der volatilen IRF aus defekten Behältern zeigen, dass der Ort der defekten Behälter einen großen Einfluss auf die errechneten Aktivitätsflüsse über die Streckenverschlüsse hat. Die Rechenfälle zu defekten Behältern in Feld Ost 12 weisen einen insgesamt höheren RGI als die Rechenfälle zu defekten Behältern in Feld Ost 11 auf, erreichen aber im Maximum alle einen $RGI < 1$. Für die Rechenfälle mit einer Verteilung der initial defekten Behälter in den weiter von den Streckenverschlüssen entfernt liegenden Einlagerungsfeldern werden RGI errechnet, die Größenordnungen unter einem RGI von 1 liegen.

Der Einfluss der Korrosionsrate auf den Transport gasförmiger Radionuklidverbindungen wurde ebenfalls analysiert. Die Analyseergebnisse zeigen, dass bezüglich des Gaspfades eine hohe Korrosionsrate zu einem hohen und frühen ^{14}C -Austrag über die Streckenverschlüsse führt, während eine niedrige Korrosionsrate zu niedrigem und frühem ^{14}C -Austrag führt. Zu späteren Zeiträumen liegt der Austrag bei niedriger Korrosionsrate aber etwas höher als bei hoher Korrosionsrate. Dieser Effekt ist modelltechnisch durch den zusätzlich im Umfeld der Behälter entstehenden Gasdruckaufbau aufgrund der entstehenden Korrosionsgase zu erklären. Die Korrosionsrate selbst hat einen geringen Einfluss auf die Freisetzung von ^{14}C aus den Brennelementen (Quellterm), da das ^{14}C im Model aus der IRF in den Porenraum des Salzgrusversatzes unabhängig von der Korrosionsrate instantan freigesetzt wird. Auch in diesen Fällen wird der Bemessungswert $RGI = 1$ nicht überschritten. Gleiches gilt für eine erhöhte Wassermenge in den POLLUX[®]-10-Behältern.

Die über die Streckenverschlüsse freigesetzte ^{14}C -Aktivität aus der IRF der Abfälle in den POLLUX[®]-9-Behältern der Felder Ost 2 und 3 führt zu einem RGI, der unterhalb von $1 \cdot 10^{-5}$ liegt und damit praktisch gleich Null gesetzt werden kann.

Endlagervariante B1: Einfluss der eingelagerten Strukturteile

Der Einfluss der in den Einlagerungsvarianten AB1 und B1 vorgesehenen Einlagerungstrecke mit Strukturteilen in Mosaikbehältern wurde untersucht. Die Planung (AP 5 /BOL 11/) sieht vor, dass die Strecke in unmittelbarer Nähe zum Streckenverschluss angeordnet ist, wobei an die Behälter keine Anforderungen an die Gasdichtheit gestellt wurden. Die Rechenfälle für dieses Konzept weisen aus, dass der RGI deutlich oberhalb von 1 liegt. Für den Fall, dass an diese Behälter Anforderungen hinsichtlich der Gasdichtheit unterstellt werden können, ergeben sich eine deutliche Reduzierung der ^{14}C -Freisetzung und RGI-Werte < 1 .

Einlagerungsvariante AB1

In den Rechenfällen, in welchen ausschließlich die Freisetzung aus dem Westflügel betrachtet wurde, zeigt sich eine starke Abhängigkeit des RGI von der angenommenen Korrosionsrate. Eine Erhöhung der Korrosionsrate der Gebinde der nicht wärmeentwickelnden Abfälle führt aufgrund des schnellen Gasdruckaufbaus wegen der hohen Korrosionsrate zu einer Erhöhung der ^{14}C -Freisetzung aus dem Westflügel. Es sei darauf hingewiesen, dass in anderen Endlagerkonzepten für einige dieser Behälter andere Materialien vorgesehen sind (z. B. Beton), wodurch die Korrosionsraten verringert werden.

Der Rechenfall U5 (Abb. 5.30) stellt die Kombination der Rechenfälle dar, aus denen jeweils die höchsten ^{14}C -Aktivitätsflüsse aus dem Ost bzw. dem Westflügel (U1) resultierten. Die Überlagerung der ^{14}C -Aktivitätsflüsse über die Streckenverschlüsse zwischen beiden Flügeln führt zu einem RGI von ca. 2,3. Dieser RGI ist etwas geringer als es die Summe der RGI der beiden einzelnen Rechenfälle wäre (ca. 2,6). Dies deutet darauf hin, dass ein Teil des im Ostflügel freigesetzten ^{14}C über den nördlichen Streckenverschluss in den Westflügel transportiert wird. Tatsächlich zeigt sich, dass in den ersten zehn Jahren nach Verschluss des Endlagers Gas vom Ost- in den Westflügel transportiert wird bevor sich nach ca. zehn Jahren die Richtung umkehrt. Nach 10 Jahren stellt sich ein erhöhter Druck auf der westlichen Seite des nördlichen Streckenverschlusses ein und dementsprechend kehrt sich die Strömungsrichtung des Gases um und verläuft nun vom Westflügel in den Ostflügel /KOC 12/.

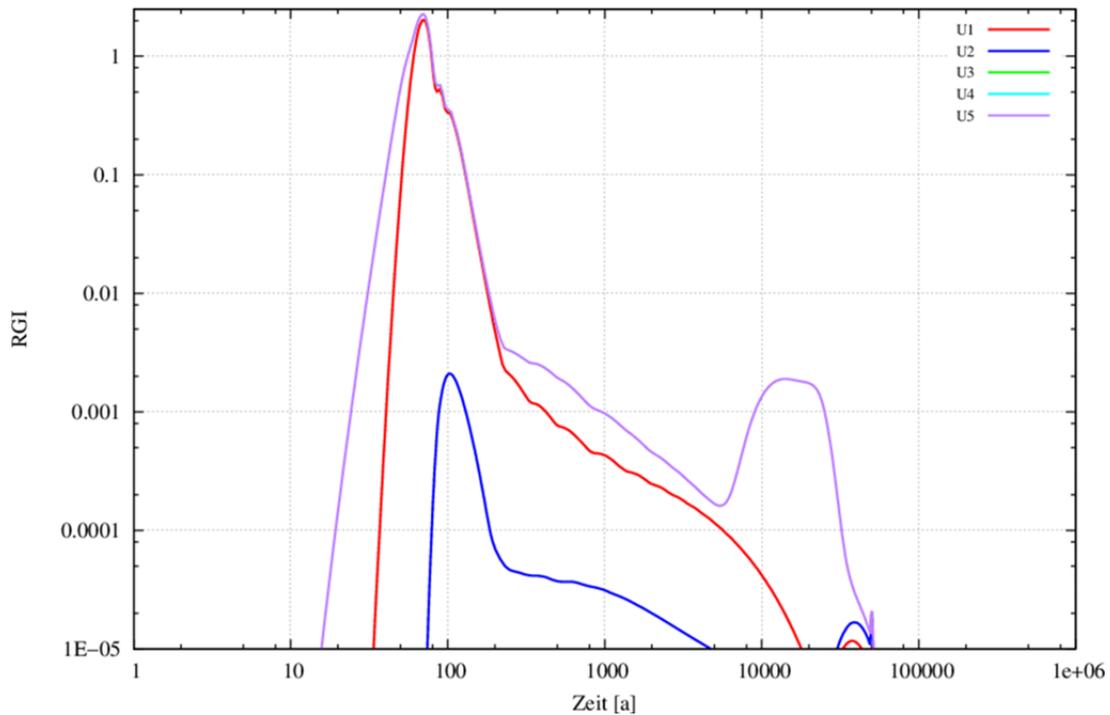


Abb. 5.30 ^{14}C -Freisetzung in den Infrastrukturbereich, Rechenfälle für das Referenzszenarium (U1 – U4 nur Westflügel, U5 beide Flügel)

Einlagerungsvariante AB1, West- und Ostflügel

In weiteren Rechenfällen wurde die Freisetzung von volatilem ^{129}I aus den POLLUX[®]-Behältern sowie der Transport im Endlager analysiert. Die Analysen ergaben, dass über die Streckenschlüsse eine Freisetzung von ^{129}I als volatile IRF-Komponente aus den POLLUX[®]-10-Behältern erst nach sehr langen Zeiträumen erfolgt und nur einen geringen RGI ($< 0,01$) aufweist.

Alternativszenarien: Defekte Behälter

Alternativszenarien ergeben sich nach /BEU 12b/ sowohl aus der Anzahl defekter Behälter als auch aus deren Verteilung auf die Einlagerungsfelder. Analog zu den Rechenfällen des Referenzszenariums wurde, um die Anzahl der Rechenfälle der Variation der Einlagerungsorte zu minimieren, ein abdeckender Rechenfall definiert. Für diesen wurde angenommen, dass sich ein defekter Behälter am Ort V2 in Feld 12 befindet und zwei weitere defekte Brennelement-Behälter in Feld 11 am Ort V4 und V5. Diese Verteilung der drei defekten Behälter ist für sich bereits unwahrscheinlich und bedeutet eine äußerst konservative Betrachtung der Radionuklidfreisetzung aus den Einlagerungsfeldern Ost 12 und Ost 11.

Des Weiteren muss nach /BEU 12b/ bei diesen Alternativszenarien davon ausgegangen werden, dass insgesamt nicht vier sondern sechs Brennelement-Behälter defekt eingelagert werden. Hierzu wurde folgender abdeckender Rechenfall betrachtet: alle Behälter befinden sich in einer Einlagerungsstrecke (Ort: V2) in Feld 12. Diese Annahme ist analog zu den vorigen Annahmen extrem konservativ und unwahrscheinlich.

Im Ergebnis liegen für die Rechenfälle aus den Alternativszenarien alle ermittelten RGI deutlich unterhalb von 1. In Analogie zu den Rechenfällen für das Referenzszenarium zeigen die Ergebnisse auch in diesen Fällen eine starke Abhängigkeit vom Ort der Einlagerung für die defekten Behälter (Rechenfälle Y-Z1 bis Y-Z4). Der Rechenfall, in welchem sechs defekte Behälter am (durch andere Rechenfälle ermittelten) ungünstigsten Ort V2 eingelagert werden, weist mit einem Wert von ca. 0,37 den höchsten RGI auf.

Alternativszenarien: Streckenverschlussversagen

Für den Rechenfall des Referenzszenariums zum Endlagerkonzept, Variante B1, der die höchste Freisetzung volatiler Radionuklide aus den POLLUX[®]-Behältern aufwies, wurden das vorzeitige Versagen eines Streckenverschlusses unmittelbar nach Verschluss des Endlagers betrachtet und die Lokation der Ausfälle variiert: Im Rechenfall Y-Z5 wird das vorzeitige Versagen des östlichen, im Rechenfall Y-Z6 das vorzeitige Versagen des mittleren Streckenverschlusses angenommen. Die integrale Permeabilität der Streckenverschlüsse nach dem Versagen wurde jeweils mit $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ angesetzt.

Für den Rechenfall des Referenzszenariums, der die höchste Freisetzung von volatilen Radionukliden aus den Behältern mit Brennelement-Strukturteilen zeigte, wurde das vorzeitige Versagen der Streckenverschlüsse für jeden Streckenverschluss ebenfalls einzeln betrachtet. Es entstanden die Rechenfälle P-Z1 (Streckenverschluss Ost), P-Z2 (Streckenverschluss West) und P-Z3 (Schachtverschluss). Auch hier wurde die integrale Permeabilität der Verschlüsse nach Versagen jeweils auf $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ gesetzt.

Die Analysen wiesen folgende Ergebnisse auf:

- In den Ergebnissen der Rechenfälle aus den Alternativszenarien zur Einlagerungsvariante B1 (ohne Strukturteile) lagen alle ermittelten RGI deutlich unterhalb von eins. In Analogie zu den Rechenfällen für das Referenzszenarium zeigten die Er-

gebnisse auch in diesen Fällen eine starke Abhängigkeit vom angenommenen Ort der Einlagerung für die defekten Behälter.

- Wie bei dem Referenzszenarium wiesen die Ergebnisse der Rechenfälle für die Alternativszenarien bezüglich der Freisetzung aus den Brennelement-Strukturteilen RGI-Werte aus, die sämtlich den Wert von 1 überschritten. Die deutlichste Auswirkung auf die Entwicklung des RGI zu frühen Zeitpunkten hatte das Alternativszenarium des vorzeitigen Versagens des Streckenverschlusses „Ost“. Analog zu den Rechenfällen des Referenzszenariums hatte dagegen die Annahme, dass für diese Behälter eine Gasdichtheit über 500 a Jahre unterstellt werden kann (im Vorhaben VSG wird damit auch eine Gasdichtigkeit gegenüber CO₂ unterstellt), einen RGI zur Folge, der Größenordnungen unter 1 lag.

Für die Rechenfälle der Alternativszenarien zu Abfällen im Westflügel in Kombination mit dem Ostflügel (Einlagerungsvariante AB1) ergaben die Analysen, dass keiner der ermittelten RGI höher als 0,5 war (Abb. 5.31). Bemerkenswert dabei ist, dass die Rechenfälle vorzeitiges Versagen des Streckenverschlusses „Ost“ und vorzeitiges Versagen des Streckenverschlusses „Nord“ kaum Unterschiede bzgl. ihres Freisetzungsverhaltens über die Streckenverschlüsse aufwiesen.

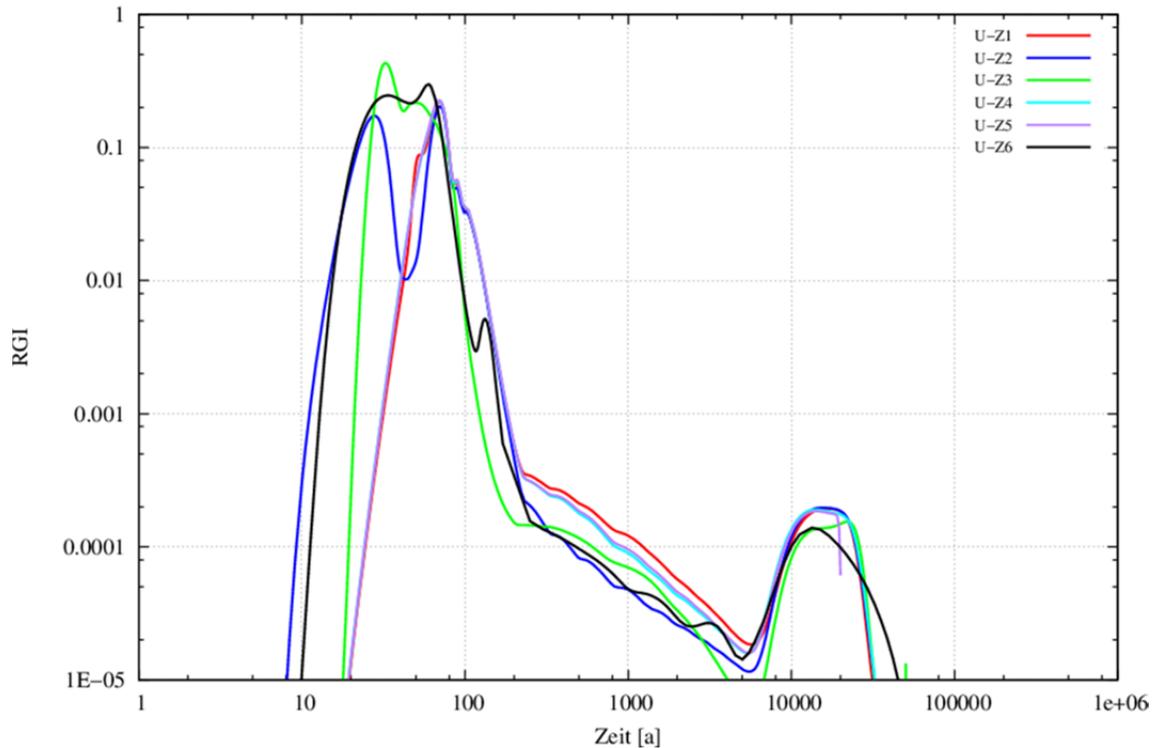


Abb. 5.31 ^{14}C - Freisetzung in den Infrastrukturbereich: Rechenfälle für die Alternativszenarien, Einlagerungsvariante AB1, aus /LAR 13/

Vorzeitiges Versagen der Streckenverschlüsse Ost (U-Z1), Mitte (U-Z2), West (U-Z3) und Nord (U-Z4), vorzeitiges Versagen des Schachtverschlusses (U-Z5), erhöhte Korrosionsrate (U-Z6).

Alternativszenarien: frühzeitiges Schachtverschlussversagen

Die Analysen zeigen, dass bei einem frühzeitigen Versagen des Schachtverschlusses die benötigte Zeit zum Auffüllen des Infrastrukturbereiches mehr als 1.000 Jahre beträgt. Erst nach dieser Zeit steht voller hydrostatischer Druck am Streckenverschluss an und vermag Lösung in die Einlagerungsbereiche einsickern zu lassen. In diesem Zeitraum sind jedoch alle Prozesse, die zu den frühzeitigen ^{14}C -Freisetzungen führen, bereits abgeschlossen. Die für das Alternativszenarium eines frühzeitigen Schachtverschlussversagens ermittelten RGI unterscheiden sich daher nicht wesentlich von denjenigen, die im Fall des Referenzszenariums errechnet wurden.

Fazit:

Für den **Einphasen-Lösungstransport** konnte gezeigt werden, dass sowohl für das Referenzszenarium als auch für die Alternativszenarien der vereinfachte radiologische

Nachweis geführt werden kann. Die Bewertungsgröße $RGI < 1$ wurde in allen Fällen so deutlich unterschritten, dass entweder gar kein Transport oder praktisch keine Freisetzung stattfindet.

Die **Zweiphasen – Transportanalysen** bestätigten die Ergebnisse der Einphasen-Lösungstransportrechnungen für den Radionuklidtransport in der Lösung. Für den Transport in der Gasphase sind die Analyseergebnisse differenzierter. Für die gasförmigen Radionuklide konnte sowohl für das Referenzszenarium als auch die Alternativszenarien der vereinfachte Nachweis geführt werden, wenn für die endgelagerten Strukturteile eine Optimierung hinsichtlich der Einlagerung in gasdichten Behältern unterstellt wurde. Im Falle der ursprünglich vorgesehenen Lagerung der Strukturteile ohne weitere Anforderung an die Konditionierung und Verpackung nahe dem Streckenverschluss Süd wurde die Bemessungsgröße RGI in allen Rechenfällen überschritten. Diese Aussage gilt insoweit, wenn die Aufpunkte für die Bestimmung des RGI an den schachtseitigen Stirnflächen der Streckenabdichtungen (Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, vgl. Kap. 5.2.5 und Abb. 5.33) angesetzt werden. Werden die Aufpunkte für die Bestimmung des RGI über den Infrastrukturbereich hinaus (außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) im Bereich der unteren Schachtabdichtungen positioniert, ergeben sich für alle untersuchten Alternativszenarien RGI -Werte, die deutlich unterhalb von 1 liegen (Abb. 5.32). Hintergrund ist, dass die Gasdiffusion dem Zustrom von Lösungen durch den Schacht in den Infrastrukturbereich entgegengerichtet ist und die resultierenden Aktivitätsflüsse daher extrem gering sind.

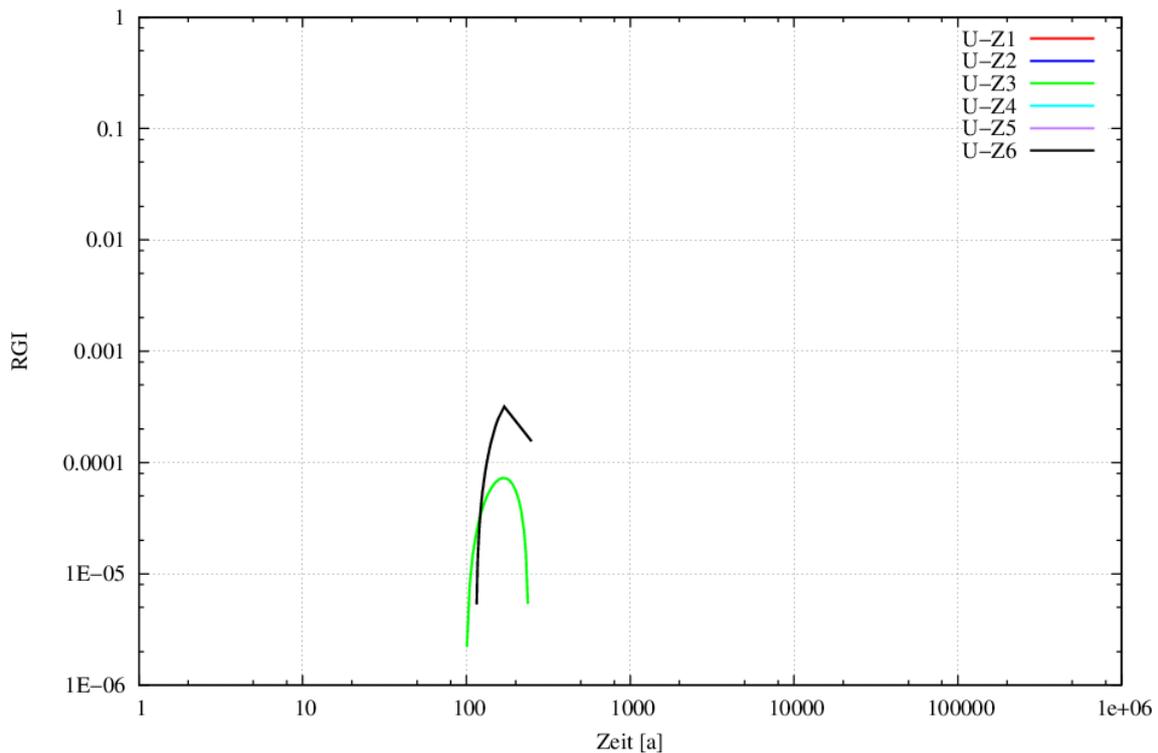


Abb. 5.32 Mit TOUGH2 berechneter RGI auf Basis der Aktivitätsströme durch die untersten Dichtelemente der Schachtverschlüsse (Summe aus Schacht 1 und 2), aus /LAR 13/

Die Kurven wirken aufgrund der logarithmischen Darstellung „abgeschnitten“ und würden für die nicht dargestellten Bereiche in einer linearen Darstellung in den negativen Bereich fallen, was auf einen Fluidtransport in umgekehrte Richtung, also in das Endlager hinein, hinweist. Dargestellt sind nur die Rechenfälle U-Z3 und U-Z6, alle anderen Rechenfälle ergaben RGI-Werte $<10^{-20}$.

Endlagerrelevante Prozesse, wie zum Beispiel die Kompaktion des Salzgrusversatzes, die Barrierendegradation und die Behälterkorrosion sind in keinem gängigen Zweiphasenfluss-Rechenprogramm vollständig implementiert. Wie in /NAV 13/ und /KOC 13/ dargestellt, wurde das Rechenprogramm TOUGH2 durch entsprechende Modifikationen in dieser Hinsicht erweitert. Dabei wurden auch die Modifikationen einigen Qualitätssicherungsmaßnahmen unterzogen, wobei betont werden muss, dass diese noch nicht vollständig abgeschlossen wurden. Weiterhin fehlen für die durchgeführten Modellbetrachtungen abgesicherte Zweiphasenflussparameter, die innerhalb der Rechnungen durch Annahmen bzw. Abschätzungen ersetzt wurden.

Die Rechenergebnisse weisen darauf hin, dass dem Transport der Radionuklide in der Gasphase in zukünftigen Sicherheitsanalysen besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte und weiterer F&E-Bedarf besteht /LAR 13/.

5.2.4 Nachweis des Kritikalitätsausschlusses

Zum Nachweis des Kritikalitätsausschlusses von spaltbaren Nukliden in der Nachverschlussphase des Endlagers wurden Analysen durchgeführt. Wesentliche Randbedingungen und Parameter, die hierbei eine Rolle spielen, sind zum einen der Zustand des endzulagernden Kernbrennstoffes selbst, wie z .B. dessen Zusammensetzung, Anfangsanreicherung, Abbrand, Art der Konditionierung und zum anderen die Auslegung der Endlagerbehälter. Hierbei wurden die möglichen Einwirkungen auf die Endlagerbehälter bis hin zum Integritätsverlust mit Degradation der Behältereinbauten und der Brennelementstrukturen sowie im weiteren das Lösen und der Transport von Radionukliden in das umgebende Wirtsgestein berücksichtigt.

Konzept der Nachweisführung:

Es wurden Nachweise zur Einhaltung der Unterkritikalität für intakte Behälter sowie bis zu einem gewissen Grad, d. h. für eine Reihe von Betrachtungsfällen, für beschädigte oder korrodierte Behälter geführt. Darüber hinaus wurden hypothetische Konfigurationen und Verteilungen des eingelagerten Kernbrennstoffes ermittelt, unter denen eine Kritikalität möglich wäre, die aber als unwahrscheinlich bzw. als auszuschließen anzusehen sind.

Einzelnachweise und Ziele:

Zur Kritikalitätssicherheit der Endlagerbehältertypen POLLUX® und Brennstabkokille BSK-3, beide mit Stäben aus DWR-Brennelementen, sowie für generische Modelle von Transport- und Zwischenlagerbehältern wurden Untersuchungen in Anlehnung an die zur Brennelement-Zwischenlagerung in Deutschland eingesetzten Behälter durchgeführt. Dabei sind die für deutsche Anlagen repräsentativen Brennelementtypen und Spaltstoffgehalte zugrunde gelegt worden. Durch die getroffenen Annahmen wurde der Großteil der zur Endlagerung vorgesehenen, bestrahlten Brennelemente aus Leistungsreaktoren abgedeckt. Um die bei Berücksichtigung des Brennelementabbrands entstehende Problematik der Nachweisführung des erreichten Abbrands (zunächst) auszuklammern, wurde in den Rechnungen frischer Brennstoff angenommen. Dies kann je nach Behältermodell und weiteren Randbedingungen rechnerisch zu einem um bis zu 0,25 höheren Wert des Multiplikationsfaktors gegenüber der Berücksichtigung des vollen Abbrands führen, wie Vergleiche zu früheren, generischen Untersuchungen

zeigten. Darüber hinaus wurden Ergebnisse früherer, z. T. generischer, standortunabhängiger Studien zusammengefasst.

Hervorzuheben ist, dass der Zutritt von Wasser zu den Kernbrennstoffen eine generelle Voraussetzung für alle analysierten Betrachtungsfälle in der Nachverschlussphase darstellt, die zu einem Anstieg des Neutronenmultiplikationsfaktors k_{eff}^{36} führen. Einerseits kann Wasser als Neutronenmoderator die Reaktivität gegenüber einer trockenen Anordnung von Kernbrennstoff wesentlich erhöhen, andererseits kann es durch chemische Prozesse zur Veränderung einer zunächst unterkritischen Anordnung in einem Behälter bis hin zu einer kritischen Anordnung beitragen. Umgekehrt lässt sich daraus folgern, dass bei der Endlagerung von niedrig angereichertem Kernbrennstoff eine Kritikalität ausgeschlossen ist, wenn kein Lösungszutritt zu den Kernbrennstoffen erfolgt. In der vorliegenden Arbeit wurde ein Lösungszutritt postuliert. Zeitpunkt und Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Geschehens waren hierbei nicht Gegenstand der Untersuchung.

Ergebnisse der Analysen:

Eine wesentliche Randbedingung für die Nachweisführung ist die Berücksichtigung der Neutronen absorbierenden Wirkung des Nuklids ^{35}Cl , welches in einer Salzstruktur, wie die von Gorleben, in großen Mengen zu finden ist. Wie die Rechenergebnisse für die gewählten Betrachtungsfälle zeigen, wird durch die Neutronen absorbierende Wirkung des Nuklids ^{35}Cl , das – bei der Annahme, dass bei Lösungszutritt von einer gesättigten Salzlösung ausgegangen werden kann – in hoher Konzentration vorliegt, ein stark reaktivitätsmindernder Effekt im Vergleich zu reinem Wasser bewirkt. Eine Berücksichtigung des Abbrands der Brennelemente wird in diesem Fall nicht erforderlich. Im Hinblick auf mögliche Langzeiteffekte wurden in den Kritikalitätsrechnungen ausgewählte Degradationsszenarien wie Flutung des Behälterinnenraums mit reinem Wasser bzw. gesättigter Salzlösung, Verlust des eingebauten Neutronenabsorbers oder Auflösung des Brennelementkorbes modelliert. Unter Berücksichtigung des ^{35}Cl in der Konzentration, die in gesättigter Lösung vorliegt, bleiben alle betrachteten Systeme und Betrachtungsfälle unterkritisch, so dass das Nachweiskonzept der Kritikalitätssicherheit für LWR-Brennstoffe darauf abgestützt werden kann. Für einige höher angereicherte

³⁶ Als Indikator für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird der Multiplikationsfaktor k_{eff} verwendet, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltprozess entstehen. Eine Kritikalität kann bei einem Wert $k_{eff} < 0,95$ ausgeschlossen werden.

Brennstoffe aus Forschungs- und Prototypreaktoren kann – je nach Brennstoffart und explizitem Behälterkonzept – dennoch eine Umkonditionierung der Brennstoffe vor ihrer Endlagerung erforderlich werden. Dies gilt insbesondere für die besonders reaktiven Brennstoffe der Reaktoren FRM-II und KNK-II. Eine bessere Einschätzung hierzu erfordert jedoch tiefer gehende Untersuchungen, die den Rahmen des Vorhabens VSG gesprengt hätten.

Zusätzlich wurden verschiedene Formen möglicher Behälterverfüllungen exemplarisch untersucht. Je nach Behältertyp und Brennstoffart, v. a. CASTOR® V/19 und CASTOR® MTR2, kann durch eine geeignete Verfüllung von Behälterhohlräumen der Nachweis der Unterkritikalität nach derzeitigem Stand ggf. auch ohne Berücksichtigung der Neutronen sorbierenden Wirkung des Chlors auf Basis von frischem Brennstoff geführt werden. Um dies abschließend zu bewerten, müssen aber genau definierte Randbedingungen vorliegen.

Fazit:

Als Ergebnis der Kritikalitätsuntersuchungen im Vorhaben VSG ist die Bildung einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion in einem Endlager in einem chloridbasierten Salzgestein auf Basis des Nuklidinventars eines einzelnen Endlagerbehälters der Typen BSK-3, POLLUX®-10 sowie bei der direkten Endlagerung von Zwischenlagerbehältern CASTOR® mit bestrahlten LWR-Brennstoffen ausgeschlossen.

Je nach Behältertyp und Brennstoffart, v. a. CASTOR® V/19 und CASTOR® MTR2, kann durch eine geeignete Verfüllung von Behälterhohlräumen der Nachweis der Unterkritikalität nach derzeitigem Stand ggf. auch ohne Berücksichtigung der Neutronen absorbierenden Wirkung des Chlors auf Basis von frischem Brennstoff geführt werden.

Für einige höher angereicherte Brennstoffe aus Forschungs- und Prototypreaktoren kann – je nach Brennstoffart und explizitem Behälterkonzept – dennoch eine Umkonditionierung der Brennstoffe erforderlich werden. Dies gilt insbesondere für die besonders reaktiven Brennstoffe der Reaktoren FRM-II und KNK-II.

5.2.5 Ausweisung von Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Mit dem Vorhaben VSG wurde erstmalig eine Bewertung des Einschlussvermögens für die radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage der am Standort Gorleben angetroffenen geologischen Situation in Verbindung mit im Vorhaben entwickelten Endlagerkonzepten und vor dem Hintergrund systematisch abgeleiteter Szenarien zur Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen durchgeführt. Es lagen vorab keine Erkenntnisse vor, für welche Salzstockbereiche ein Integritätsnachweis geführt werden kann. Aus diesem Grund kann der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht vorab, d. h. nicht vor Durchführung der numerischen Analysen zur Integrität der Salzbereiche und zum Radionuklidtransport, abschließend festgelegt werden, sondern erst anhand der Ergebnisse der numerischen Analysen.

Auf Basis der umfangreichen und langen Erfahrungen im Salzbergbau konnte abgeleitet werden, dass ein Sicherheitsabstand allseitig um das Endlagerbergwerk in der Größenordnung von einigen Zehner Metern ausreicht, um die Integrität des Gebirgsbereichs zu bewahren /MIN 10/. Als Planungsgrundlage für die Entwicklung der Endlagerkonzepte wurde daher festgelegt, für die Auslegung der Grubenbaue in den Einlagerungsbereichen einen Mindestabstand von 50 m zwischen dem Endlagerbergwerk und den geologischen Strukturen außerhalb des Hauptsalzes anzusetzen, der an jeder Stelle der konzipierten Endlagerbergwerke, mit Ausnahme des Infrastrukturbereichs, einzuhalten ist.

Dieser Sicherheitsabstand berücksichtigt die Ungewissheiten bei der Detektion von geologischen Schichtgrenzen, die mögliche Existenz von Klüften begrenzter Reichweite am Übergang zu den an das Hauptsalz angrenzenden Salinarschichten sowie die Ausdehnung der Auflockerungszone um die Grubenbaue. Unter der Voraussetzung, dass die Integrität der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nachgewiesen werden kann und folglich keine Wegsamkeiten durch das Salzgestein bestehen oder sich ausbilden, können Radionuklide den einschlusswirksamen Gebirgsbereich lediglich entlang der bei der Auffahrung geschaffenen Hohlräume verlassen, sofern sie nicht durch die geotechnischen Verschlussbauwerke zurückgehalten werden. Für die Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber Radionukliden wurde zur Ermittlung der Freisetzung in einem ersten Ansatz die Außenfläche der Streckenschlüsse auf der Seite des Infrastrukturbereichs gewählt, siehe auch die Ergebnisse der Analysen in Kapitel 5.2.3.

Da die Integritätsanalyse zur geologischen Barriere im Ergebnis ausreichend mächtige integrale Salzbereiche in der Umgebung des Endlagerbergwerks im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) ausgewiesen hat, die in der Lage sind, aufgrund ihrer Eigenschaften den Einschluss der Radionuklide zu gewährleisten, ergeben sich Spielräume für die Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Das bedeutet, es ergeben sich mehrere sinnvolle Alternativen hinsichtlich Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erfolgt mittels eines Abwägungsverfahrens, welches das Einschlussverhalten, das potenzielle Freisetzungverhalten sowie die Robustheit der Integrität und des Einschlusses würdigt. Die Kriterien zur Abwägung umfassen folgende Aspekte /MÖN 12/:

- Die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der betreffenden Gesteinsbereiche der geologischen Barriere sowie der geotechnischen Barrieren und die allgemeine Datenlage,
- die Qualität des Einschlusses unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Freisetzungsberechnungen einschließlich der ihnen zugrunde liegenden Annahmen bzgl. der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und
- die Aussagesicherheit des Integritätsnachweises unter Berücksichtigung der Ungewissheiten des Integritätsnachweises (z. B. Homogenität der geomechanischen Materialeigenschaften, Einbeziehung der Modellungsgewissheiten).

Die Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs hinsichtlich Lage und Ausdehnung erfolgte im Vorhaben VSG anhand einer Gesamtwürdigung der Ergebnisse der Integritätsanalysen und der Konsequenzenanalyse.

Geologische Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept wurde durch die Maßnahme „M2“ festgelegt, dass die Einlagerungsbereiche des Endlagers im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) angelegt werden. Das Hauptsalz im Kernbereich der Salzstruktur Gorleben zeichnet sich durch ein großes zusammenhängendes Volumen in der Salzstruktur, einen hohen Rekristallisationsgrad und die Abwesenheit von offenen Klüften, größeren Lösungsvorkommen oder anderen Inhomogenitäten aus. Die Materialeigenschaften der Unterformationen des Hauptsalzes, Knäuelsalz (z2HS1), Streifensalz (z2HS2) sowie Kristallbrockensalz (z2HS3) sind dabei weitgehend identisch.

Das Hauptsalz zeichnet sich im Hinblick auf seine Einschlusseigenschaften durch einen gut charakterisierbaren Homogenbereich, d. h. bezüglich seines Aufbaus und der einschlussrelevanten Eigenschaften durch Homogenität, aus. Es verfügt über eine sehr geringe Permeabilität, Porosität und Diffusivität, d. h. das Hauptsalz ist praktisch dicht. Advektiver und diffusiver Transport können im ungestörten Hauptsalz praktisch nicht stattfinden. Das Hauptsalz stellt somit aufgrund seiner Eigenschaften und seiner volummäßigen Ausprägung die geologische Barriere im Umfeld des Einlagerungsbereichs dar.

Das in der Szenarienentwicklung identifizierte Referenzszenarium und die Alternativszenarien wurden hinsichtlich einer potenziellen Gefährdung der geologischen Barriere Hauptsalz analysiert. Die zu betrachtenden Prozesse, die am Standort Gorleben potenziell auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich einwirken können, wurden während der Entwicklung des FEP-Katalogs identifiziert.

Die Integritätsrechnungen wiesen im Ergebnis einen Bereich, in dem die Integrität des Salzstocks nachgewiesen werden kann, von mehr als 300 (Referenzszenarium) bzw. 250 m (Alternativszenarium) in vertikaler Richtung oberhalb des Einlagerungsbereichs aus. Auch im unmittelbaren Umfeld der Einlagerungsfelder, d. h. im Sicherheitsabstand vom Endlagerbergwerk zu den geologischen Strukturen außerhalb des Hauptsalzes von 50 m, blieb – abzüglich der dilatanten Auflockerungszone von weniger als drei Metern – die Integrität erhalten (vgl. Kap. 5.2.2.1). Hierbei ist festzustellen, dass mit der Kompaktion des Salzgruses in den Grubenbauen die Auflockerungszone ebenfalls kompaktiert und sich dabei zurückbildet.

Aus den Ergebnissen der Integritätsanalysen kann festgestellt werden, dass der einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausreichend bemessen ist, wenn er in der geologischen Barriere mit einem allseitigen Abstand von 50 m um das Endlagerbergwerk ausgewiesen ist.

Verschlussbauwerke:

Schon bei der Auslegung der Verschlussbauwerke wurden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zugrunde gelegt. Im Rahmen der Vorbemessung und der vertieften Nachweisführung wurden für die behandelten mechanischen, thermischen, hydraulischen und chemischen Einwirkungen die erforderlichen Einzelnach-

weise zur Integrität des Verschlussystems geführt. Für die Verschlussbauwerke konnte der Nachweis über Funktion und Funktionsdauer, d. h. ihre Integrität positiv geführt werden (vgl. Kap. 5.2.2.2)

Einschluss der Radionuklide:

Aus den Integritätsanalysen zur geologischen Barriere ergaben sich keine weiteren im Hinblick auf radiologische Freisetzung zu untersuchenden Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems. Aufgrund der Dichtheit der geologischen Barriere gegen Fluid- und Radionuklidtransport sowie ihrer Integrität beschränkte sich die radiologische Konsequenzenanalyse zur Freisetzung von Radionukliden auf Transportwege innerhalb des versetzten und verschlossenen Bergwerks. Zur Bewertung von potenziellen Freisetzungen von Radionukliden wurde der Aktivitätsstrom über die Streckenverschlüsse in den Infrastrukturbereich gewählt.

Das Ergebnis der Analysen zur vereinfachten radiologischen Langzeitaussage nach /MÖN 12/ für das Endlagerkonzept der Streckenlagerung ist, dass für die Referenz- und Alternativszenarien bei Betrachtung der Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad die vorgegebenen radiologischen Kriterien ($RGI < 1$) eingehalten wurden. Für den gekoppelten Gas- und Lösungspfad (Zweiphasenfluss) führte die vereinfachte radiologische Langzeitaussage ebenfalls zum Ziel, wenn für die endgelagerten Strukturteile eine Optimierung hinsichtlich der Einlagerung in gasdichten Behältern unterstellt wurde. Hiermit konnte der Einschluss der Radionuklide im beladenen und verschlossenen Endlagerbergwerk im Sinne des Sicherheits- und Nachweiskonzepts nachgewiesen werden.

Fazit:

Aufgrund der großräumigen Integrität der an das Endlagerbergwerk angrenzenden Bereiche der geologischen Barriere, der Integrität der Verschlussbauwerke über ihre Funktionsdauer sowie der Einschlusseigenschaften des kompaktierten Versatzes kann für den Standort ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Lage und Grenze ausgewiesen werden:

Der im Vorhaben VSG für den Standort ausgewiesene einschlusswirksamen Gebirgsbereich umfasst die geologische Barriere, mit einer Mächtigkeit des Hauptsalzes der Staßfurtserie (z2HS) von 50 m Hauptsalz in alle Richtungen um die Einlagerungsbe-

führung (z. B. Homogenität der geomechanischen Materialeigenschaften, Einbeziehung der Modellungswissheiten) in Kapitel 5.3.4 bewertet.

5.2.6 Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien

Zielsetzung:

Eine Sonderstellung bezüglich der Szenarientwicklung nehmen mögliche Entwicklungen durch zukünftige menschliche Aktivitäten am Standort ein. Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung eines Endlagersystems sind dabei Szenarien menschlichen Eindringens nach Verlust der Kenntnisse zur Existenz des Endlagers (Human Intrusion, kurz: „HI“) zu berücksichtigen, die aufgrund der Beeinträchtigungen des Barrierensystems das Potenzial haben, den Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gefährden. Aufgrund der unzureichenden Prognosemöglichkeit zur Motivation und Fähigkeit zukünftiger Gesellschaften bezüglich des Eindringens in den tiefen Untergrund sowie zu deren technisch-wissenschaftlichem Potenzial werden solche menschlichen Aktivitäten separat von der Szenarientwicklung behandelt.

Die Behandlung und Untersuchung von menschlichen Aktivitäten ist gemäß den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10a/ auf die Optimierung des Endlagers auszurichten. Ausgegebene Ziele hierbei sind die Reduzierung der Wahrscheinlichkeit menschlichen Eindringens und der radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung. Resultierende Optimierungen aus der Untersuchung dürfen jedoch weitere spezifizierte vorrangige (primäre) Optimierungsziele wie z. B. den Strahlenschutz, die Langzeitsicherheit und die Betriebssicherheit nicht gefährden.

Rahmenbedingungen/Vorgaben:

Mit der Erkenntnis, dass das menschliche Verhalten nicht prognostiziert werden kann, sind die zu untersuchenden Szenarien unter bestimmten Rahmenbedingungen und Vorgaben festzulegen. Um Verwechslungen mit anderen Szenarien aus der Szenarientwicklung zu vermeiden werden diese stilisierten Szenarien als HI-Szenarien bezeichnet. Zu den Rahmenbedingungen und Vorgaben gehört, dass nur ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlagersystem zu berücksichtigen ist, wobei heute übliche Aktivitäten und Praktiken nach Stand von Wissenschaft und Technik zu-

grunde zu legen sind. Ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen impliziert den Verlust über die Kenntnis des Endlagers und das Wissen um das Gefahrenpotenzial der eingelagerten Abfälle. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass mit Verschluss des Endlagers ein sofortiger Kenntnis- und Wissensverlust einhergeht. Daher wurde in früheren Forschungsvorhaben unter Berücksichtigung erhaltener Dokumentationen aus bestehenden Archiven abgeleitet, dass frühestens 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers unbeabsichtigte menschliche Aktivitäten am Standort zu unterstellen sind.

Darüber hinaus wurde für die VSG vereinbart, dass sich die Untersuchungen auf den Ostflügel des Endlagers mit den wärmeentwickelnden Abfällen in Form bestrahlter Brennelemente sowie verglaste Spaltproduktkonzentrate und hochverpresster Hülsen und Strukturteile aus der Wiederaufarbeitung unter Einbeziehung der einlagerungstechnischen Varianten B1 und C beschränken.

Methodik:

Unter Berücksichtigung der genannten Rahmenbedingungen und Vorgaben wurden folgende in einer abgestimmten Vorgehensweise definierten Arbeitsschritte zur Behandlung des unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Rahmen des Vorhabens VSG abgearbeitet /BEU 12a/:

- In einem ersten Arbeitsschritt wurden heute übliche menschliche Aktivitäten in der Standortregion identifiziert, die in Bezug auf die damit verbundene Technik bzw. Handlungsabläufe und die geplanten Endlagertiefe das Potenzial für ein Eindringen in das Endlager aufweisen. Im Ergebnis wurden drei Basisaktivitäten ausgemacht, die sich auf die Erstellung einer Bohrung, das Anlegen einer Kaverne und das Auffahren eines Bergwerks beziehen.
- Für die Zielsetzung der Ableitung von Optimierungsmaßnahmen im Zusammenhang mit zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist es essenziell, die genannten Basisaktivitäten in Bezug auf deren praktische Durchführung und Anwendung genau und umfassend zu kennen. Hierzu wurden Informationen und Fakten zusammengetragen und Gespräche mit entsprechenden Fachleuten zur Klärung offener Punkte geführt.
- Danach wurden für jede Basisaktivität Fallunterscheidungen, in Bezug auf unterschiedliche Positionierungen von Bohrungen, Kavernen und Bergwerke zum End-

lager, betrachtet und hinsichtlich der möglichen Einwirkungen auf das Endlager diskutiert.

Darüber hinaus wurde untersucht, inwieweit aufgrund der Handlungsabläufe der Basisaktivitäten die Möglichkeit einer Wahrnehmung oder Detektion von vorliegenden Auffälligkeiten bzw. Anomalien – verursacht durch das Endlager und die eingelagerten radioaktiven Abfälle – besteht.

Ergebnisse:

Aus den Fallbetrachtungen, die sicherheitsrelevante Implikationen für das Endlager nach sich ziehen können, und aus der fallbezogenen Diskussion einer möglichen Wahrnehmung von endlager- und abfallinduzierten Auffälligkeiten wurden folgende HI-Szenarien für die weitere Untersuchung festgelegt:

- Es wird eine verrohrte Erkundungsbohrung durch die Salzstruktur Gorleben niedergebracht, die innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs liegt und nicht zur Entdeckung des Endlagers führt. Für die Bohrung werden heute übliche Abmessungen und Bohrtechnologien angesetzt.
- 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 etc.) oder Salzgewinnung gesolt, die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich komplett durchteuft und damit auch Einlagerungsfelder erfasst. Weder die Standorterkundung noch die Erkundungsbohrung führen zur Entdeckung des Endlagers. Für die Kaverne werden heute übliche Abmessungen und Betriebszeiten und -technologien angesetzt.
- Es wird nach vorheriger umfassender Standorterkundung und mehreren Erkundungsbohrungen, die teilweise später als Transport- und Bewetterungsschächte ausgebaut werden, ein Bergwerk im Salzstock Gorleben zum Zwecke des Abbaus von Salz errichtet, das den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und die Einlagerungsfelder erreicht. Die Standorterkundung und die Erkundungsbohrungen führen nicht zur Entdeckung des Endlagers. Für das Bergwerk werden eine Abbaufolge vom Hangenden ins Liegende sowie heute übliche Betriebszeiten und -technologien angesetzt.

Diese definierten HI-Szenarien wurden dahingehend untersucht, ob durch entsprechende Maßnahmen die Möglichkeiten eines Eindringens (bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten) reduziert werden können und/oder ob den radiologischen Auswirkungen entgegengewirkt werden kann. Ausgangsgrundlage für diese Untersuchung war eine Liste von denkbaren Optimierungsmöglichkeiten, die auf der Basis einer Ideensammlung, ausgewählter Referenzen und entsprechender Erkenntnisse aus den Gesprächen mit Fachleuten des Salzbergbaus zusammengestellt wurde. 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. Beispiele für konzeptionelle Maßnahmen beinhalten das Einbringen von Materialien zur Erhöhung des Bohr- bzw. Vortriebswiderstandes, das Versetzen der Strecken der Erkundungssohle mit geeigneten Materialien (z. B. Sand, Kies und Schotter oder Granitblöcken), die im Falle der Kaverne zu einem Druckverlust bzw. Druckimpuls führen sollen und die Separierung der Abfälle durch weitere Verschlussbauwerke.

Die identifizierten möglichen Optimierungsmaßnahmen wurden abschließend hinsichtlich ihrer Umsetzbarkeit und möglicher Konflikte zu den primären Optimierungszielen Strahlenschutz und Sicherheit in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie technischer und finanzieller Realisierbarkeit /BMU 10a/ abgewogen. Weiterhin wurde eine Einschätzung der Erfolgsaussichten bzw. des Nutzens der jeweiligen Optimierungsmaßnahme vorgenommen. Darüber hinaus wurden die Möglichkeiten der quantitativen Beurteilung von Szenarien vor und nach der Berücksichtigung von Optimierungsmaßnahmen diskutiert.

Im Ergebnis der Abwägung und Diskussion möglicher Optimierungsmaßnahmen verblieben nur zwei Maßnahmen, die sich unter den vorliegenden Rahmenbedingungen für eine Umsetzung anbieten. Hierzu gehören

- die Verwendung eines chemischen Indikatormaterials zur Farbänderung der Bohrspülung bzw. der Versatzmaterialien (Salzgrus und Schotter) und
- bei entsprechender Anpassung der konzeptionellen Planung hinsichtlich des Abstandes zwischen Einlagerungssohle und Erkundungssohle das Einbringen von setzungsarmen Materialien (z. B. Sand, Kies und Schotter) in die Erkundungssohle.

In beiden Fällen ist eine quantitative Beurteilung der Reduktion radiologischer Konsequenzen nicht möglich, da die Maßnahmen lediglich einen hinweisgebenden Charakter in Bezug auf menschliche Aktivitäten bzw. stattgefundenen Altbergbau am Standort haben können. Ob und auf welche Weise zukünftige Generationen auf derartige Hinweise auf bergbauliche Anomalien reagieren werden, ist ungewiss. Zur quantitativen Beurteilung der Wirkung der Maßnahmen lassen sich somit 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.

Fazit:

Insgesamt ist aus den Erfahrungen aus dem Vorhaben VSG festzustellen, dass die Möglichkeiten zur Optimierung eines Endlagersystems gegen menschliches Eindringen stark begrenzt sind. Darüber hinaus verbleiben signifikante Ungewissheiten, 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.

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die hier betrachteten einlagerungstechnischen Varianten B1 und C konzeptinhärente Maßnahmen wie die Teufenlage des Endlagers, Behälterwandstärken und Separierung der Abfälle in Einlagerungsfelder, Einlagerungsstrecken bzw. verrohrten Einlagerungsbohrlöcher beinhalten, die die Möglichkeiten eines menschlichen Eindringens bereits einschränken.

Zusätzlich ist festzuhalten, dass neben den abgeleiteten Optimierungsmaßnahmen und den vorliegenden konzeptinhärenten Maßnahmen auch die im Abschnitt 10 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ enthaltenen Vorgaben zum Informationserhalt und zur institutionellen Überwachung zum Schutz des tieferen Untergrundes vor menschlichen Eingriffen im Bereich eines Endlagers als wirkungsvolle Maßnahmen erachtet werden. Die Festlegung entsprechender Rahmenbedingungen zur Implementierung dieser Maßnahmen ist eine regulatorische Aufgabe.

5.3 Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben VSG

- Wie in Kapitel 4.3 ausgeführt, musste im Vorhaben VSG mit den bestehenden Ungewissheiten aus der Standorterkundung und den im Laufe des Vorhabens identifizierten Ungewissheiten in geeigneter Weise umgegangen werden. Die geforderten Schritte – Identifizieren, Beurteilen und Quantifizieren sowie Reduzieren und Vermeiden – wurden im Vorhaben VSG, soweit wie möglich, umgesetzt.
- Die Ungewissheiten wurden während der Bearbeitung des Vorhabens identifiziert und im Hinblick auf die Sicherheitsanalyse eingeteilt in
- Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems,
- Daten- und Parameterungewissheiten und
- Modellungsgewissheiten.
- Im Vorhaben VSG konnten die identifizierten Ungewissheiten insbesondere aus zeitlichen Gründen nicht durch ein begleitendes F&E-Programm weiter reduziert oder beseitigt werden. Daher erfolgte der Umgang mit ihnen in der Sicherheitsanalyse durch plausible, fachlich begründete Annahmen. Diese wurden mittels Expertenurteil abgeleitet und müssen in einem späteren Standorterkundungsprogramm bzw. F&E-Programm so weit wie möglich Bestätigung finden oder weiter untermauert werden.

5.3.1 Ungewissheiten der Grundlagen der Sicherheitsanalyse

Standorterkundung:

Das Vorhaben VSG gründet sich auf die vorliegenden umfangreichen geowissenschaftlichen Befunde. Im Hinblick auf die Charakterisierung des Standortes liegt eine bedeutende Quelle von Ungewissheiten im Vorhaben aufgrund der nicht abgeschlossenen Erkundung des gesamten Standortes vor. Während die obertägige Erkundung abgeschlossen ist, beschränkte sich die untertägige Erkundung bislang auf einen kleinen Teilbereich des Salzkörpers, so dass nur eingeschränkte Kenntnisse hinsichtlich der lateralen Struktur des Salzstockes, zu Daten und ihren Bandbreiten sowie zu möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagerstandortes bestehen.

Zur Durchführung der VSG wurden daher folgende wesentliche grundlegende Annahmen getroffen /MÖN 12/:

- Die laterale Ausbildung des Salzstockes Gorleben entspricht dem geologischen Riss nach /BOR 04/ und die Übertragbarkeit dieses Schnittes auf den Teufenbereich der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Die Übertragbarkeit der für die Salzgesteine im Erkundungsbereich EB1 und im Infrastrukturbereich ermittelten Gesteinseigenschaften auf die Salzgesteine im gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den ggf. außerhalb liegenden Teilen der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge weist eine ausreichende Mächtigkeit für die Aufnahme der Einlagerungsbereiche für alle im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte auf. Dabei ist der festgelegte Sicherheitsabstand zu den Gesteinsschichten, die potenziell lösungsführend sind oder Wegsamkeiten für Lösungen bilden können, zu berücksichtigen.
- Diese aus dem noch nicht vollständigen Kenntnisstand zum Internaufbau der Salzstruktur Gorleben im Bereich der Einlagerungssohle resultierenden Ungewissheiten konnten im Vorhaben VSG nur dadurch behandelt werden, dass die oben angeführten **grundlegenden Annahmen** Prämissen darstellen, die der Gesamtwürdigung der Ergebnisse des Vorhabens VSG in Kapitel 6 zugrunde gelegt werden. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse im Vorhaben VSG unter dem Vorbehalt stehen, dass zukünftige Erkundungsarbeiten die oben genannten grundlegenden Annahmen bestätigen.

Abfallcharakterisierung:

Aufgrund des Ausstiegs aus der Kernenergie /ATG 11/, den der Bundestag als Konsequenz aus den Ereignissen in Fukushima beschlossen hat, sowie auf Basis der regulativen Vorgaben zur Kernenergienutzung war es möglich, die für die Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente (direkte Endlagerung) mit einer für die Endlagerplanung ausreichenden Sicherheit zu bestimmen.

Vergleichbare Randbedingungen trafen auch auf die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestrahlter Brennelemente zu. Der weitere Zugang zu den Wiederaufarbeitungsanlagen in Großbritannien und Frankreich wurde mit der Einstellung der Transporte von bestrahlten Brennelementen ins Ausland Mitte 2005 beendet. Hier-

durch war es möglich, die aus der Wiederaufarbeitung resultierenden radioaktiven Abfälle in Art, Menge und Qualität mit einer für die Endlagerplanung ausreichenden Sicherheit zu bestimmen.

Die endzulagernden radioaktiven Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren lassen sich ebenfalls gut quantifizieren, wobei über die Betriebszeiten der Forschungsreaktoren noch keine abschließenden Aussagen möglich sind. Die Abfallmengen und das entsprechende Radionuklidinventar aus diesem Bereich sind im Vergleich zu den Leistungsreaktoren allerdings eher gering.

Grundsätzlich kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zukünftig radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung geben wird, deren Endlagerung zusätzlich zu den wärmeentwickelnden Abfällen vorgesehen ist. Für die Ableitung der Menge und Qualität der Abfälle können zurzeit nur grobe Annahmen getroffen werden. Die abgeleiteten Daten mussten für die Zwecke des Vorhabens VSG lediglich plausibel sein, um die grundsätzliche Auswirkung der Einlagerung solcher Abfälle zu beurteilen.

Für die Belastbarkeit der Sicherheitsaussagen ist entscheidend, dass alle Abfallarten in einer realistischen Menge und mit repräsentativen Stoffzusammensetzungen berücksichtigt wurden. Für die wärmeentwickelnden Abfälle wurde dies dadurch erreicht, dass die den Sicherheitsanalysen zugrunde liegenden Abfallspezifikationen und Mengengerüste von den endzulagernden Abfällen ein umfassendes und realitätsnahes Bild wiedergeben. Auch stellt der Detaillierungsgrad der Angaben eine solide Grundlage für die durchzuführenden Sicherheitsanalysen im Vorhaben VSG dar. Für die vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle sollte die Machbarkeit der gemeinsamen Endlagerung mit den wärmeentwickelnden Abfällen untersucht werden, wobei Art, Menge und die radiologischen und stofflichen Eigenschaften der Abfälle zum großen Teil auf Abschätzungen beruhen und somit mit großen Ungewissheiten behaftet sind. Die Analyse der Machbarkeit zielte allerdings lediglich darauf ab zu eruieren, ob sich in den sicherheitsanalytischen Arbeiten unüberwindbare Probleme der gemeinsamen Endlagerung beider Abfallströme ergeben. Insofern werden die oben beschriebenen Ungewissheiten im Sinne der Aufgabenstellung einer prototypischen vorläufigen Sicherheitsanalyse als vertretbar angesehen.

Die Ungewissheit im Hinblick auf die Menge der Abfälle sowie zur detaillierten Historie der einzelnen Abfälle, z. B. Abbrand eines einzelnen Brennelements, lässt eine dezidierte Charakterisierung der stofflichen und radiologischen Eigenschaften der einzel-

nen Abfälle nicht zu (vgl. Kap. 5.1.1.2). Mit der Einführung von Modellbrennelementen konnte jedoch die Aufgabe der Charakterisierung für den Abfallstrom der Brennelemente aus Leistungsreaktoren gelöst werden. Die Randbedingungen für die Genese der jeweiligen einzelnen Modellabfälle wurden realitätsbezogen festgelegt. Für die Sicherheitsanalysen wurde somit ein Abfallmengengerüst mit Abfallspezifikationen abgeleitet, das umfassend und abdeckend ist im Hinblick auf die Sicherheitsanalyse des Endlagersystems.

Einlagerungs- und Verschlusskonzept:

Das Einlagerungs- und Verschlusskonzept basiert auf den Erkenntnissen der bisherigen Standorterkundung sowie den oben genannten grundlegenden Annahmen. Die Planung für das Einlagerungs- und Verschlusskonzept hat Konzeptstatus erreicht. Es liegen für die meisten Komponenten des Konzepts, ihre Baubarkeit und die Erfüllung der an sie gestellten Anforderungen, nur eingeschränkte praktische Erfahrungen oder Nachweise vor. Daher mussten weitere Annahmen hinsichtlich ihrer Machbarkeit und Qualität getroffen werden. Dies gilt beispielsweise für die auslegungstechnischen Anforderungen an die Einlagerungsbehälter, wie etwa ihre Dichtigkeit, ihre Standsicherheit gegen die geomechanische Belastung oder ihre Bergbarkeit über einen Zeitraum von 500 Jahre. Eine qualifizierte Behälterauslegung konnte im Vorhaben VSG nicht durchgeführt werden. Für die Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse wurden zwar Planungen und Auslegungen erarbeitet die zeigen, dass die gestellten Anforderungen erfüllbar sind, jedoch entspricht ihr Tiefgang nicht dem der Genehmigungsreife. Auch dies konnte im Vorhaben VSG als einer prototypischen Sicherheitsanalyse nicht erreicht werden.

Es kann jedoch festgestellt werden, dass im Vorhaben VSG keine Erkenntnisse gewonnen wurden, die bereits heute gegen die technische Umsetzung des Einlagerungs- und Verschlusskonzepts in der geforderten Qualität sprechen. Die oben getroffenen Aussagen gelten, soweit sie das Verschlusskonzept betreffen für die schnellwirkenden geotechnischen Verschlussbauwerke. Bezüglich der Ungewissheiten zur Kompaktionsgeschwindigkeit des Salzgrusversatzes als langfristige geotechnische Barriere und seinen hydraulischen Eigenschaften im fortgeschrittenen Kompaktionsstadium wird auf die Ausführungen in Kapitel 5.3.5 verwiesen.

5.3.2 Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen

FEP-Katalog:

Wie in Kapitel 5.2.1.1 ausgeführt, wurden im FEP-Katalog systematisch und umfassend die für die im Vorhaben VSG durchgeführten Systemanalysen relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse des Endlagersystems dargelegt. Dabei wurden für jedes FEP der Kenntnisstand und die identifizierten Ungewissheiten dokumentiert.

Darüber hinaus war ein Ziel des Vorhabens, den noch notwendigen Untersuchungs- und Erkundungsbedarf festzustellen. Hierzu wurden – sofern sich dies bei der Bearbeitung des FEP-Kataloges ergeben hat – für jedes FEP Aspekte angegeben, die im Detail noch besser untersucht werden sollten. Es wurden auch Fragestellungen genannt, die keinen F&E-Bedarf im eigentlichen Sinne darstellen, aber zu deren Beantwortung noch konkrete Arbeiten durchgeführt werden müssen.

Eine inhärente Ungewissheit im FEP-Katalog stellen unerkannte Merkmale dar, die sich einer objektiven Bewertung entziehen. Die Vorgehensweise in der Szenarientwicklung ermöglicht aber, auf diesen Aspekt im Rahmen von Alternativszenarien einzugehen /BEU 12b/.

Bei der Erstellung des FEP-Katalogs ist die Identifikation der FEP mit ihren Abhängigkeiten voneinander und ihren gegenseitigen Beeinflussungen sowie die Einordnung der FEP und ihre Ausprägungen in Wahrscheinlichkeitsklassen im Einzelnen mit Ungewissheiten behaftet. Diese sind stark geprägt durch die Notwendigkeit, subjektive Entscheidungen vornehmen zu müssen, wenn der Kenntnisstand für eine objektive Entscheidung nicht ausreicht.

Im Vorhaben VSG sind zur Reduzierung der Ungewissheiten aufgrund von subjektiven Entscheidungen eine Reihe von Maßnahmen ergriffen worden, wie etwa die Nutzung vorlaufender Forschungsarbeiten und die Einbindung einer großen Anzahl von Wissenschaftlern unterschiedlicher Fachdisziplinen. Aufbauend auf den Entwicklungen im F+E-Vorhaben ISIBEL /ISI 08/ wurde die Entwicklung eines FEP-Katalogs im Vorhaben VSG fortgeführt. Im Vorhaben ISIBEL wurde unter Einbeziehung des universellen FEP-Katalogs der OECD-NEA /NEA 00/ erstmals ein FEP-Katalog für die Endlagerung bestrahlter Brennelemente und anderer wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle in einem Salzstock am Beispiel eines generischen Standortes in der norddeutschen

Tiefebene unter Nutzung der Daten des Standortes Gorleben erstellt. Dieser FEP-Katalog wurde bereits im Vorhaben einem externen Review unterzogen /RÖH 09/ und im Anschluss daran überarbeitet /ISI 10/. Die Zielsetzung bei der Erarbeitung des FEP-Katalogs durch die beteiligten Institutionen war, einen Ausgangspunkt für die Erstellung eines FEP-Katalogs im Rahmen eines zukünftigen Safety Cases zu schaffen. Im Rahmen des Vorhabens VSG wurden die Liste der FEP sowie die Struktur und Inhalte der 112 FEP des im Vorhaben ISIBEL erstmals entwickelten FEP-Katalogs /ISI 10/ systematisch hinterfragt und aufgrund der fortgeschrittenen Kenntnisse und der Anforderung an das Vorhaben VSG entsprechend überarbeitet und ergänzt.

Zur Absicherung der vielen durch die FEP angesprochenen Fachdisziplinen sowie zur Reduzierung der Subjektivität von Einzelmeinungen, wurde der Arbeitskreis zur Erstellung eines VSG-FEP-Katalogs interdisziplinär und interinstitutionell besetzt. An der Erstellung des FEP-Kataloges waren 19 Wissenschaftler aus fünf Institutionen beteiligt, die sich seit Jahrzehnten mit Fragen der Endlagerung beschäftigen.

Der Umgang mit Ungewissheiten zu einzelnen FEP innerhalb der Systemanalyse wird in den folgenden Kapiteln behandelt.

Trotz der systematischen interdisziplinären Bearbeitung des FEP-Katalogs verbleibt eine Ungewissheit im Hinblick auf die Vollständigkeit bei der Identifikation der relevanten FEP. Sowohl aus der Nutzung des VSG-FEP-Katalogs im Vorhaben als auch aus einem internen Review hat sich gezeigt, dass der FEP-Katalog bei der Anwendung in zukünftigen Sicherheitsanalysen weiter entwickelt werden sollte.

Fazit:

Zusammenfassend wird festgestellt, dass der für das Vorhaben VSG entwickelte FEP-Katalog /WOL 12b/ spezifisch für den Standort Gorleben und die im Vorhaben VSG erarbeiteten Endlagerkonzepte ist. Da er als spezifischer FEP-Katalog für die Endlagerung ausgedienter Brennelemente und anderer wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle in einem Salzstock erstellt wurde, ist sowohl das methodische Vorgehen als auch die Identifikation und die Behandlung von FEP auf andere Salzstöcke übertragbar. Mit der gewählten Vorgehensweise zur Erstellung des VSG-FEP-Katalogs wurde sichergestellt, dass als Grundlage für die nachfolgenden numerischen Systemanalysen ein grundlegendes Dokument erstellt wurde, welches systematisch und umfassend den heutigen Stand der Kenntnisse und der Ungewissheiten der das Endlagersystem cha-

rakterisierenden relevanten Merkmale, Ereignisse und Prozesse erfasst. Die Beschreibungen der FEP im Katalog stellen somit den Stand von Wissenschaft und Technik dar.

Szenarientwicklung:

Voraussetzung für die Durchführung der Systemanalysen sind Vorstellungen zur zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems. Diese werden beeinflusst durch

- die geologischen und klimatischen Entwicklungsmöglichkeiten am Standort,
- durch die von der Auslegung und Konzeption des Endlagers abhängigen Wirkungen dieser Entwicklungsmöglichkeiten sowie
- durch die eingelagerten Abfälle auf das Endlagersystem.

In der Realität wird der Standort mitsamt seinem Endlager zukünftig genau eine Entwicklung durchlaufen. Trotz der umfangreichen Kenntnisse der verschiedenen Einflussfaktoren kann diese tatsächliche Entwicklung des Endlagersystems für den Nachweiszeitraum nicht belastbar in allen Einzelaspekten und Details prognostiziert werden. So sind Zeitpunkte und Ausprägungen bestimmter zukünftiger Ereignisse am Standort Gorleben nicht eindeutig bestimmbar. Die daraus resultierende Ungewissheit bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems kann durch weitere Erkundungs- und Forschungsarbeiten zwar reduziert, jedoch nie in Gänze überwunden werden.

Um die Ungewissheit bezüglich der künftigen Entwicklung des Endlagersystems in einem für die Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems im Rahmen der VSG ausreichendem Maß zu überwinden, wurden für die Endlagersysteme am Standort Gorleben (Standortgegebenheiten und Endlagerkonzept) die Szenarien identifiziert, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit nach dessen Stilllegung relevant sind. Es wurden für jede Einlagerungsvariante jeweils ein Referenzszenarium und insgesamt 17 Alternativszenarien identifiziert, die sich wiederum aufgrund der sie bestimmenden FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen einordnen ließen.

Für das Referenzszenarium mussten – neben den grundlegenden Annahmen aus der Standorterkundung – aufgrund fehlender Befunde weitere spezifische Annahmen getroffen werden. Diese sind im Folgenden aufgeführt:

- Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten. Die Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale entspricht dem vorgegebenen Klimabild. Bei dem ersten Auftreten des Kaltzeittyps Elster ist die Entstehung einer glazialen Rinne zu unterstellen, die dem Verlauf der bereits auf dem Standort vorliegenden Gorlebener Rinne folgt.
- Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.
- Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) von den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.
- Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.

Zu allen vier oben genannten spezifischen Annahmen wurden entsprechende Abweichungen untersucht, die in Alternativszenarien mündeten /BEU 12b/.

Fazit:

Wesentliche Grundlagen zur Identifikation von für die Sicherheitsbewertung relevanten Szenarien waren die geowissenschaftliche Langzeitprognose und vor allem der FEP-Katalog mit den in ihnen ausgewiesenen Kenntnissen und Ungewissheiten. Die Szenarientwicklung wurde auf Basis einer systematischen Analyse der relevanten Einflussfaktoren (FEP) unter Berücksichtigung ihrer Ungewissheiten und Annahmen durchgeführt /BEU 12b/. Insofern werden durch die Szenarientwicklung die Ungewissheiten über die eine reale zukünftige Entwicklung des Endlagersystems systematisch und umfassend identifiziert und durch die für die Systemanalyse relevanten Szenarien behandelt.

5.3.3 Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen

Bei der Erarbeitung des FEP-Katalogs sowie der Szenarienentwicklung wurden potenzielle Entwicklungen aufgedeckt, die praktisch nicht zu prognostizieren sind. Im Vorhaben VSG betraf dies insbesondere die auf den Endlagerstandort einwirkenden exogenen Lastfälle, die sich aus klimatischen Entwicklungen ableiten. Hierzu wurden plausible Annahmen getroffen, wie etwa die in /BEU 12b/ dargestellten spezifischen Annahmen zur Klimaentwicklung und der Bildung von glazialen Rinnenstrukturen. Eine weitere Annahme stellt die Mächtigkeit eines Inlandeisgletschers, der während einer Kaltzeit den Standort überfährt, dar. Diese sind in die Sicherheitsanalyse eingeflossen.

Für den Zeitraum nach einer Kaltzeit mit Eisüberfahung ist die hydrogeologische Situation nicht zu prognostizieren, da durch die dabei ablaufenden Prozesse die Topologie am Standort und das Deck- und Nebengebirge im hohen Maße verändert werden können. Im Vorhaben VSG wurden daher sicherheitskonzeptionell für das Deckgebirge keine Sicherheitsfunktionen hinsichtlich einer belastbar quantifizierbaren Reduktion von Radionuklidkonzentrationen (z. B. infolge Verdünnung im Grundwasserstrom oberflächennaher Aquifere) vorgesehen; vielmehr wurde die in /BMU 10a/ vorgeschlagene vereinfachte radiologische Langzeitaussage, die sich hinsichtlich der Bewertung einer Radionuklidfreisetzung allein auf die Umrandungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beschränkt, zur Sicherheitsbewertung herangezogen.

5.3.4 Umgang mit Modellungewissheiten

Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten:

Die modellhafte Beschreibung des Standortes unterliegt den oben beschriebenen Ungewissheiten, die aus der nicht abgeschlossenen Standorterkundung resultieren. Um die Integritätsanalysen und radiologische Konsequenzenanalyse durchführen zu können, wurden daher im Vorhaben VSG die im Kapitel 5.3.1 zur Standorterkundung beschriebenen wesentlichen grundlegenden Annahmen getroffen.

Inbesondere für die Integritätsanalysen wurden von den verschiedenen Arbeitsgruppen, bestehend aus den Institutionen BGR, IfG und GRS für die jeweilig eingesetzten Rechenmodelle Standortmodelle auf Basis dieser Annahmen entwickelt, so

dass die erzielten Ergebnisse über eine gemeinsame Grundlage verfügten und somit deren Vergleichbarkeit gegeben war.

Ungewissheiten zu den Endlagermodellen:

Der Planung der Endlagerkonzepte /BOL 11/ und /BOL 12/ liegen die gleichen Ungewissheiten bezüglich der Standorterkundung zugrunde. Daher sind die Ungewissheiten und die in Kapitel 5.3.1 ausgeführten grundlegenden und spezifischen Annahmen bei der Erstellung der Endlagermodells inhärent. Wie im Rahmen der Systemanalyse mit Modellungsgewissheiten umgegangen wurde, wird im Folgenden dargelegt.

Umgang mit Modellungsgewissheiten bei den Integritätsanalysen:

Der Nachweis der Integrität der **geologischen Barriere** (Kap. 5.2.2.1) erforderte Berechnungsmodelle, die eine Abstraktion der realen Standortgegebenheiten mit dem in den Modellen integrierten Endlagerbergwerk darstellen. Gründe hierfür sind – selbst nach sorgfältigster Erkundung – die begrenzten Kenntnisse der Standortgegebenheiten, und die hiermit verbundenen Ungewissheiten. Wie in Kapitel 5.3.1 ausgeführt, müssen im Vorhaben VSG aufgrund des begrenzten Standes der Erkundung der Salzstruktur grundlegenden Annahmen getroffen werden, um trotz dieser grundlegenden Ungewissheiten eine vorläufige Sicherheitsanalyse durchführen zu können. Auf der Grundlage dieser Annahmen wurde für die Berechnungsmodelle das durch den Erkundungsbereich EB1 verlaufende geologische Profil des Querschlags 1 West gewählt, dessen detaillierte Geologie die Basis der geometrischen Diskretisierung der thermo-mechanischen Berechnungsmodelle ist. Die den Berechnungsmodellen zugrundeliegenden Ungewissheiten können nur im Zuge einer weiterführenden Standorterkundung weiter reduziert werden.

Wie in Kapitel 5.2.2.1 ausgeführt, konnten die Zielsetzungen der Integritätsanalysen nicht mit einem einzigen Berechnungsmodell allein erreicht werden. Daher brachten drei unterschiedliche Arbeitsgruppen ihre unterschiedlichen Modellkonzepte (Berechnungsprogramme und Stoffgesetze) zur Anwendung, die auf unterschiedlichen räumlichen Skalen für die verschiedenen Zielsetzungen unterschiedliche Herangehensweisen und Modellgeometrien realisierten. Da allen Modellkonzepten die gleichen grundlegenden Annahmen zugrunde lagen, konnten die erzielten Ergebnisse miteinan-

der verglichen und so auf Plausibilität überprüft und Modellungsgewissheiten identifiziert und reduziert werden.

Die geologische Struktur des Salzstocks Gorleben einschließlich des Neben- und Deckgebirges ist verhältnismäßig komplex. Aus diesem Grund und auch wegen der aufgrund der Einhaltung des Sicherheitsabstandes an das Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2HS) anschließenden geologischen Formationen (vgl. Kap. 5.2.5) bedingten geometrisch heterogen ausgebildeten Einlagerungsfelder sind für die räumliche Diskretisierung eigentlich dreidimensionale Berechnungsmodelle unerlässlich. Da aber 3D-Modelle in ihrer Berechnung immer noch schnell an die Leistungsgrenzen moderner Hochleistungsrechner stoßen, konnte im Rahmen der Modellbildung aufgrund der Vielzahl der durchzuführenden Rechnungen auf die 2D-Modellierung nicht vollständig verzichtet werden. Darüber hinaus liegen derzeit keine hinreichend belastbare Erkundungsdaten in der Längserstreckung des Salzstockes vor.

Für die detaillierte Erfassung des Nahfeldes der Einlagerung einschließlich der Strecken und Einlagerungsbehälter kamen nur 2D-Modelle in Betracht. Für die Untersuchung der thermo-mechanischen Auswirkungen auf den gesamten Salzstock wurden bevorzugt 3D-Modelle herangezogen. Dabei wurde auf eine räumliche Diskretisierung sämtlicher Hohlräume des Einlagerungsbergwerks vollständig verzichtet. Durch den erheblich gröberen Diskretisierungsgrad der 3D-Modelle im Einlagerungsbereich wurden die Behälter nicht mehr diskret berücksichtigt, so dass deren Wärmefreisetzung als über den Einlagerungsbereich homogenisiert angenommen wurde.

Im Rahmen ihrer Zusammenarbeit wurde von IfG und BGR ein skalenübergreifender Ansatz gewählt, mit dem die Integrität der geologischen Barriere durch detaillierte 2D-Nahfeldmodellierungen bis hin zu großräumigen 3D-Modellierungen untersucht werden konnte. Zudem konnte die Konsistenz des Systemverhaltens unter Verwendung unterschiedlicher Stoffmodelle überprüft und der Einfluss von Schichtflächeneffekten beurteilt werden. In den 2D-Nahfeldstudien wurden hierfür sowohl die Einlagerungsgeometrie nachgebildet, als auch die Einlagerungsbehälter und deren Wärmeentwicklung sowie die Versatzkompaktion explizit modelliert.

Mit diesem Ansatz wurden die Modellungsgewissheiten, soweit sie nachweistechnisch bedingt waren, minimiert.

Der Integritätsnachweis der **geotechnischen Barrieren** (Kap. 5.2.2.2) weist insofern eine Modellungsgewissheit auf, dass für die Schächte eine modellmäßige Auslegung vorgenommen wurde, die den geologischen sowie sonstigen Gegebenheiten am Schacht Gorleben 1 gerecht wird. In Bezug auf die lokationsspezifischen Randbedingungen wurde Schacht Gorleben 1 als repräsentativ angenommen. Für den Schacht Gorleben 2 wurde im Rahmen des Vorhabens VSG angenommen, dass ein bzgl. seiner Funktionserfüllung vergleichbares Schachtverschlussystem wie im Schacht Gorleben 1 erstellt werden kann.

Umgang mit Modellungsgewissheiten bei der Konsequenzenanalyse:

Die Integritätsanalysen wiesen die Integrität der geologische Barriere in der Umgebung des Endlagerbergwerks aus, d. h. ihre Barriereigenschaften bleiben erhalten. Ein Fluidtransport in das Barrierengestein musste daher nicht betrachtet werden. Hieraus folgte für die Modelle zur radiologischen Konsequenzenanalyse, dass die geologische Barriere nicht explizit zu modellieren war. Sie konnte vielmehr als fluiddichte Randbedingung in die Modellbildung eingehen. Die Modelle beschränkten sich daher auf die Abbildung des verfüllten und verschlossenen Endlagerbergwerks.

Das Endlagermodell für das Programm TOUGH2 zur Analyse des Zeiphasenflusses im Endlagerbergwerk konnte aus programmtechnischen Gründen nur durch orthogonale Gitternetze simuliert werden, so dass das Grubengebäude mit einigen Vereinfachungen abgebildet werden musste. Wegen der Orthogonalität des Modellgitters entsprechen nicht alle Streckenlängen denen der untersuchten Einlagerungsvariante AB1. Bei der Gittererstellung wurde darauf geachtet, dass die Volumina denjenigen des Endlagerkonzeptes entsprechen. Weiterhin konnte der zeitliche Prozess der sukzessiven Einlagerung der radioaktiven Abfälle im Rückbau nicht modelliert werden. Die Berechnung der Konsequenzen mittels TOUGH2 startet somit mit einem instantan verschlossenen Endlager ohne Berücksichtigung der Betriebsphase. Diese Vorgehensweise ist im Hinblick auf die Gasbildung, den Druckaufbau und den Transport des Gases mit den gasförmigen Radionukliden als konservativ einzuschätzen.

Mit dem Einphasencode MARNIE konnte das Endlagerbergwerk als 1D-Netzwerkstruktur ohne vereinfachende Abstrahierungen bzgl. des Grubenbauplans abgebildet werden. Auch wurde mit MARNIE der zeitliche Verlauf des Einlagerungsprozesses, des Versetzens und Verschließens des Endlagers simuliert.

Fazit:

Das Endlagerbergwerk wurde durch MARNIE als 1D-Netzwerkstruktur aufgebaut und erlaubte die Modellierung des Endlagerkonzepts in der Variante AB1 ohne vereinfachende Abstrahierungen bzgl. des Grubenbauplans unter Berücksichtigung des Einlagerungsregimes.

Das Endlagermodell für die 2-Phasenrechnungen mittels TOUGH 2 musste den Bedingungen der Codestruktur angepasst werden, d. h. der Modellaufbau erfordert orthogonale Gitternetze, so dass das Grubengebäude mit einigen Vereinfachungen abgebildet werden musste. Die Anpassung erfolgte derart, dass im Hinblick auf die Nachweisziele konservative Ergebnisse erzielt wurden.

Mit dem skalenübergreifenden Ansatz in der Modellanwendung bei den Integritätsanalysen der geologischen Barriere wurden die Ungewissheiten, soweit sie nachweistech-nisch bedingt waren, minimiert. Ungewissheiten, resultierend aus der nicht abge-schlossenen Standorterkundung, wurden durch die in Kapitel 5.3.1 genannten grundlegenden Annahmen überbrückt.

5.3.5 Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von im Endlagersystem ablaufenden Prozessen

Im FEP-Katalog wird für jeden Prozess ausgewiesen, welche Ungewissheiten er aufweist. Diesen Prozess-Ungewissheiten wurden bei der Modellierung entweder durch Abschätzungen oder durch im Hinblick auf potenzielle Radionuklidfreisetzung konser-vative Annahmen begegnet. In der Sicherheitsanalyse sind die im Hinblick auf die Si-cherheitsbewertung des Endlagersystems relevanten Prozesse und deren Ungewiss-heiten wie folgt behandelt worden:

- Bei den **Auswirkungen von Kaltzeiten** auf das Aufstiegsverhalten des Salzstocks wurde der maximal anzusetzende Aufstieg des Salzstockes abgeschätzt und in seiner Konsequenz bewertet
- Die gleiche Vorgehensweise wurde für die Berücksichtigung der **Rinnenbildung** gewählt. Zur Erfassung dieses Prozesses der Rinnengenese wurde eine Abschät-zung möglicher Erosionstiefen und Tiefenwirkung der Eisauflast, bzw. Mächtigt-keitsminderung des Deckgebirges abgeschätzt und die Auswirkungen untersucht.

- Ungewissheiten bestehen vor allem hinsichtlich des Prozesses der **Kompaktion von Salzgrus**. Es wurden im Vorhaben VSG empirische oder auf Experteneinschätzungen beruhende Stoffmodelle zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus bis zu kleinen Porositäten verwendet. Bis zu welchen Endporositäten der Versatz kompaktierbar ist und welche hydraulische Eigenschaftsentwicklungen (Permeabilitäten für Lösung und Gas) mit kleiner werdenden Porositäten anzunehmen sind, ist derzeit nicht hinreichend genau belegbar. Um diese Ungewissheiten zu überwinden, wurden im Vorhaben VSG Parametervariationen bzgl. der Kompaktionsgeschwindigkeit, der Endporositäten sowie der Permeabilitätsentwicklung durchgeführt. Die Parametervariationen erfolgten für angefeuchteten und trockenen Salzgrusversatz in Folge der Wechselwirkung zwischen Gebirge und Versatz in Abhängigkeit von den sich einstellenden Temperaturen. Da auch der Einfluss von Fluiddrücken im Porenraum des Versatzes auf das Kompaktionsverhalten bislang nicht näher untersucht ist, wurde in den Modellrechnungen die Wirkung der Drücke im Porenraum in Analogie zur Wirkung des Fluiddrucks bei Steinsalzkonvergenz modelliert, d. h. mit zunehmendem Fluiddruck reduziert sich die Kompaktionsrate.
- Inwieweit bei kleinen Porositäten in **Porenräumen des Versatzes vorhandene Lösungsmengen mobil** sind und somit zu einer potenziellen Radionuklidfreisetzung beitragen können, oder ob sie immobil sind, z. B. eingeschlossen bzw. an Korngrenzen gebunden, ist derzeit nicht ausreichend bekannt bzw. belegbar. Im Hinblick auf den Radionuklidtransport wurde in den Analysen auch bei geringen Porositäten als konservativer Ansatz ein advektiver Transport unterstellt. Ein diffusiver Transport der Radionuklide wird in jedem Fall berücksichtigt.

Diese aus dem noch nicht vollständigen Kenntnisstand zum langfristigen Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz resultierenden Ungewissheiten konnten im Vorhaben VSG nur dadurch behandelt werden, dass die oben angeführten **grundlegenden Annahmen** Prämissen darstellen, die der Gesamtwürdigung der im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse in Kapitel 6 zugrunde gelegt werden. Dies bedeutet, dass zur Absicherung der Ergebnisse des Vorhabens VSG weitere Forschungsvorhaben zu den Eigenschaften von Salzgrusversatz bezüglich Kompaktion erforderlich sind.

- **Verschlussbauwerke** weisen eine Reihe von Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von Prozessen auf, wie beispielsweise bzgl. der langzeitigen Stabilität der Materialeigenschaften und deren Entwicklung bei Durchströmung von Lösung. Diese wurden bei der Auslegung durch entsprechende Planungsänderungen zu Funktionselementen berücksichtigt und brauchten daher in den Modellrechnun-

gen nicht weiter berücksichtigt werden. Als Begründung für diese Vorgehensweise konnte festgestellt werden, dass das Verschlussystem einen hinreichenden Widerstand gegen einen korrosionsinduzierten durchgängigen Lösungspfad aufweist. Die auftretende Korrosion wird durch die vorgesehene Opferschicht beherrscht sowie durch das Bischoffitdepot im Vorfeld vermieden. Alterationsprozesse im Bentonit verlaufen unter den thermischen und geochemischen Bedingungen im Schacht Gorleben 1 sehr langsam und sind deshalb vernachlässigbar /XIE 12/. Abdeckend wurde in den Sicherheitsanalysen im Rahmen von verschiedenen Alternativszenarien ein Versagen der Verschlussbauwerke deterministisch unterstellt.

- Die Ungewissheiten über die Entwicklung des **geochemischen Milieus** über lange Zeiträume, Kopplung mit Transportprozessen bei Temperaturen über 25 °C (hohe Temperaturen im Einlagerungsbereich für wärmeentwickelnde Abfälle) sowie Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen unter Temperatureinfluss bei Anwesenheit sehr geringer Lösungsmengen wurden durch sehr konservative Annahmen abgedeckt. Bei Anwesenheit von Lösung wurde unabhängig von der Lösungsmenge die Auflösung der Abfälle modelliert. Transportverzögernde Prozesse wie Sorption z. B. an Behälterwandungen oder Korrosionsprodukten wurden nicht berücksichtigt.
 - Die Verheilung der **Auflockerungszone** (ALZ) z. B. im Bereich der Verschlussbauwerke ist wissenschaftlich noch nicht in Gänze verstanden. Insbesondere die komplexe Wechselwirkung zwischen Konvergenz, Dammkörper, Kontaktzone und ALZ sowie unter zusätzlicher Einwirkung eines Porendrucks birgt eine Reihe von Ungewissheiten. In den Modellen wurde vom Verheilen der Auflockerungszone kein Kredit genommen. Stattdessen wurde unter Berücksichtigung einer dauerhaft verbleibenden Durchlässigkeit der Auflockerungszone eine integrale Mindestpermeabilität in Ansatz gebracht.
 - Auf die geologische Barriere eines Endlagers wirken von außen hydraulische **Belastungen durch das Grundwasser** und von innen durch **Gasdrücke**. Gleichzeitig stehen aufgrund ihrer geologischen Vorgeschichte die Schichtflächen und Diskontinuitäten in Salzstöcken steil und reichen bis an das wasserführende Deckgebirge. Im Ergebnis der für die VSG durchgeführten Analysen wird deutlich, dass vorrangig das Minimalspannungskriterium für den großräumigen Nachweis der Barrierenintegrität von Bedeutung ist, wobei Schichtflächen mögliche Schwachstellen in der geologischen Barriere darstellen. Die durchgeführten Berechnungen zur Integrität der geologischen

Barriere basieren fast ausschließlich auf thermo-mechanischen Berechnungen ohne hydraulische Kopplung. Dabei wird der stattfindende Prozess einer druckgetriebenen Infiltration von Fluiden möglicherweise unterschätzt. Zur Bewertung der Auswirkungen einer druckgetriebenen Fluidinfiltration im Salzgebirge fehlen weitergehende experimentelle Ergebnisse zur Ermittlung der Reichweite eines Fluidtransports und des potenziellen Speichervermögens, die im Rahmen von Labor- und Felduntersuchungen gewonnen werden müssen, sowie qualifizierte numerische Rechentools, die neben Zweiphasenfluss auch Fluidtransport entlang von Diskontinuitäten sowie hydro-mechanische Kopplung beschreiben können.

- Der Prozess der **Korrosion** der Abfallbehälter weist eine Reihe von Ungewissheiten auf wie etwa Korrosionseffekte bei geringen Lösungsmengen oder bei hohen Temperaturen oder unter Anwesenheit von Wasserdampf. Eine weitere Ungewissheit stellt die mit den Abfällen eingebrachte Feuchtemenge dar. Angesichts der großen Behältermassen stellt die Feuchtemenge das für die Gasbildung limitierende Element dar. Im Hinblick auf die Gasbildung wurden für die zur Korrosion verfügbaren Feuchtemengen konservative Annahmen getroffen, d. h. die gesamte mit den Behältern eingebrachte Feuchte sowie die im Porenraum des den Behälter umgebenden Versatzes, wurde als korrosionswirksam in Ansatz gebracht. Die weiteren Ungewissheiten sind in den Analysen durch Variation des Parameters Korrosionsrate aufgefangen worden. Insofern konnte im Hinblick auf Gasbildung und Radionuklidtransport in der Gasphase die konservative Korrosionsrate identifiziert werden. Ungewissheiten zur Zersetzung und Gasbildung aus Organika im salinaren Milieu wurden durch die Variation der Korrosionsrate und damit der Gasbildungsrate beim Korrosionsprozess abdeckend behandelt.
- Die Beschreibung des **Mehrphasen-Mehrkomponentenflusses** in kompaktierendem Salzgrus insbesondere bei kleinen Porositäten ist mit wesentlichen Ungewissheiten behaftet. Die Zweiphasenflussparameter (Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke) zum Salzgrusversatz für die hydraulische Entwicklung und den Stofftransport im Endlager sowie die Henry-Konstanten zur Beschreibung der Löslichkeit von Gasen in der Lösung waren weitestgehend unbekannt. Daher wurden die Parameter im Hinblick auf eine maximale Radionuklidfreisetzung in der Gasphase konservativ gewählt, d. h. die Henry-Konstante wurde derart gewählt, dass der Radionuklidanteil in der Gasphase überschätzt wurde. Kritisch anzumerken ist jedoch, dass die Zweiphasenflussparameter weitestgehend

unbekannt sind und deren Ermittlung in zukünftigen F&E-Arbeiten dringend zu empfehlen ist. Für das Vorhaben VSG wurden daher Expertenschätzungen für die Parameter vorgenommen.

- Die Beschreibung und Modellierung eines **Quellterms** von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen aufgrund von Lösung in kompaktiertem Salzgrus ist mit großen Ungewissheiten behaftet. Derzeit ist völlig unbekannt, wie in einem System von Abfallbehältern umgeben von kompaktiertem Salzgrus, der sehr geringe Mengen an Lösung aufweist, die Entwicklung der Behälter, die Auflösung des Abfalls, die Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfall beschrieben werden kann. In der Modellierung wurde konservativ bei Anwesenheit von Lösung, und sei die Menge noch so gering, die Freisetzung der Abfälle in die Lösung unterstellt. Dies führt rechnerisch zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem Abfall, der unrealistisch groß ist.
- Die Beschreibung und Modellierung eines **Quellterms von gasförmigen Radionukliden** aus den eingelagerten Abfallbehältern weist ebenfalls große Ungewissheiten auf. Insbesondere ist unklar, wie aus einem POLLUX[®]-Behälter, dessen Undichtheit nach 500 Jahren in den Modellrechnungen unterstellt wird, gasförmige Radionuklide in den Porenraum des Salzgrusversatzes gelangen können. Im Vorhaben VSG wurde der Quellterm für gasförmige Radionuklide derart modelliert, dass zum Zeitpunkt des unterstellten Defektwerdens eines Behälters dessen Gasinhalt instantan in den Porenraum des Versatzes gelangt und transportiert wird. Mechanismen, wie der Behälter versagt und gasförmige Radionuklide im defekten Behälter zurückgehalten werden, wurden bislang nicht untersucht. Im Vorhaben VSG wurde daher der extrem konservative Ansatz der instantanen Freisetzung in den Porenraum gewählt.
- Behandlung der Ungewissheiten bei der **Analyse gasförmig freigesetzter Radionuklide**: Es hat sich gezeigt, dass für die Behandlung der Freisetzung von Radionukliden über dem sog. „Gaspfad“ eine Vielzahl von Ungewissheiten vorliegen, die für die Bewertung der berechneten Ergebnisse relevant sind. Diese Ungewissheiten führen u. a. einerseits zu einer Überschätzung des aus dem Endlager strömenden Gases und andererseits zu einer erhöhten Freisetzung des ¹⁴C aus den Behältern. Dadurch errechnet sich insgesamt ein stark erhöhter ¹⁴C-Austrag aus dem Endlager. Dies ist im Sinne der Konservativität beabsichtigt und bei der Würdigung der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Eine weitere modelltechnische Ungewissheit liegt vor allem in der Annahme der instantanen Beladung und dem Verschluss, d. h. im nicht berücksichtigten zeitlichen Ablauf der Belade- und Verschlussvorgänge im Endlagersystem, begründet. Die in /LAR 13/ präsentierten Ergebnisse zur radiologischen Konsequenzenanalyse wie auch die Integritätsanalysen in /KOC 12/ zeigen, dass die Kompaktion des Salzgrusversatzes ein wesentlicher Antrieb für den Gastransport ist. Hierzu ist es zwingend erforderlich, in zukünftigen Analysen deshalb die sukzessive Einlagerung modelltechnisch umzusetzen, so dass die schon in der Betriebsphase einsetzende Kompaktion des Salzgrusversatzes in den Rechnungen betrachtet wird. Die Nicht-Berücksichtigung dieses Effekts durch den instantanen Beginn der Gasbildungs- und Kompaktionsprozesse unmittelbar nach Endlagerverschluss führt zu einer massiven Erhöhung des berechneten Gastransports aus dem Endlager in der Nachbetriebsphase.

Der zweite wesentliche Antrieb für den Gastransport ist die Korrosion der Behälter. Die Korrosionsrate wurde in den Rechnungen über 5 Größenordnungen variiert. Dies spiegelt die Ungewissheit über die tatsächlichen Korrosionsvorgänge bei sehr geringem Lösungsangebot in Abfallnähe wieder. Nahezu alle initial verfügbaren Lösungen in den Einlagerungsfeldern wurde für die Korrosion als zur Verfügung stehend angenommen. Die Auswirkungen der Gasbildung durch Korrosion der Behälter im Zusammenhang mit der Kompaktion des Salzgrusversatzes sind komplex und verursachen jeweils unterschiedliche Strömungs- und Druckverhältnisse im Endlager. Die auf Basis dieser komplexen Vorgänge induzierten Transportvorgänge von volatilen Radionukliden berechneten Aktivitätsströme über die Streckenverschlüsse führen zu berechneten RGI-Werten, die unabhängig von der Korrosionsrate meist unterhalb von 1 bleiben. Dies kann als Indikator für die Robustheit des Endlagersystems angesehen werden. Gleichzeitig erschwert die Ungewissheit, die durch die modelltechnischen Vereinfachungen hervorgerufen werden, letztlich auch eine zielgerichtete Optimierung, da nicht klar ist, ob eine Optimierung mit den vorliegenden Ergebnissen begründet werden kann oder worin Optimierungsziele bestehen könnten.

Die Ungewissheit über die volatile Freisetzung des ^{14}C und ^{129}I aus den Behältern spiegelt sich in der dargestellten VSG-Modellvorstellung der Annahme einer instantanen und vollständigen Freisetzung des IRF-Anteils trotz des geringen Lösungsangebots wieder. Diese Annahme ist gleichbedeutend mit dem sofortigen „Verschwinden“ der Behälter ohne Berücksichtigung einer durch die Korrosion bestimmten Freisetzungsrates. Weiterhin wird außer Acht gelassen, dass nach wenigen Jahren der Gasinnendruck der Behälter (durch die dort stattfindende Korrosion) kleiner ist als der Au-

ßendruck (hervorgerufen durch die Salzgruskompaktion). Bei der Annahme der vollständigen Umsetzung der im POLLUX[®]-10-Behälter verfügbaren Menge Wasser (60 g H₂O entsprechen ca. 3,37 mol H₂O), entsteht nur wenig CO₂ (maximal 1,69 mol, dies entspricht einer Volumenzunahme von ca. 44 l bei 38 °C), welches den Innendruck im Behälter nur gering erhöht, so dass möglicherweise nach Verlust der Behälterintegrität zunächst Gas in die Behälter strömen würde.

Auch ohne Berücksichtigung dieses Effektes wird das ¹⁴C nicht instantan und vollständig in Form von CO₂ freigesetzt angenommen, sondern vielmehr durch ein entsprechendes „Leck“ am Behälter über einen Zeitraum langsam freigesetzt. Dabei ist die zur Entstehung eines Lecks erforderliche Lösungsmenge (Restfeuchtigkeit in den Behältern und Feuchtegehalt im Salzgrusversatz) im Grunde genommen bereits verbraucht. Es wurde aber aufgrund der Ungewissheit der detaillierten Prozessabläufe wiederum angenommen, dass das entstandene CO₂-Gas den vollständigen volatilen IRF-Anteil an ¹⁴C enthält und transportiert werden kann (auch in der danach eigentlich nicht mehr vorhandenen flüssigen Phase).

Letztlich beruht die Menge der IRF, vor allem der volatile Anteil, bei allen Abfallarten, auf Modellvorstellungen und Abschätzungen und ist insbesondere für die Abfälle im Westflügel nicht bekannt. Für zukünftige Analysen ist erforderlich, dass diese Prozesse durch noch zu leistende Forschungs- und Entwicklungsarbeit detaillierter analysiert und ggf. in Rechenmodelle umgesetzt werden.

Vor dem Hintergrund dieser zahlreichen Ungewissheiten ist die Bewertung des Systems anhand eines einheitlichen Indexes (des summierten RGI sowohl von Flüssig- und Gasphase) letztlich stark vereinfachend und spiegelt nicht die mögliche Freisetzung von ¹⁴C über die Streckenverschlüsse wieder.

Vor dem Hintergrund dieser zahlreichen Ungewissheiten ist die Bewertung des Systems anhand eines einheitlichen Indexes (des summierten RGI sowohl von Flüssig- und Gasphase) letztlich stark vereinfachend und spiegelt nicht die mögliche Freisetzung von ¹⁴C über die Streckenverschlüsse wieder. Gemäß dem Sicherheits- und Nachweiskonzept wurde für die vereinfachte radiologische Langzeitaussage die potenzielle Freisetzung von volatilen Radionukliden für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrachtet. Die Analysen waren so angelegt, dass die errechneten Freisetzungen der volatilen Radionuklide in der Tendenz überschätzt wurden.

Es wird in diesen Analysen deutlich, dass der vollständige Einschluss der Radionuklide (Null-Emission) innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für den reinen Lösungspfad ausgewiesen wird. Für den Gaspfad konnte ein vollständiger Einschluss der Radionuklide innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgrund der aufgeführten Ungewissheiten nicht zweifelsfrei gezeigt werden.

Auch vor dem Hintergrund der extremen Konservativität der Rechnungen wird in weit- aus den meisten Rechenfällen der sog. sichere Einschluss der Radionuklide über den Gaspfad gezeigt. In den Fällen, in denen dies nicht gezeigt wird, führen ein Abbau von Konservativitäten oder eine einfache Optimierung des Endlagerkonzepts dazu, dass der sichere Einschluss gewährleistet ist.

5.3.6 Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten

In den Sicherheitsanalysen zur Integrität und zur vereinfachten radiologischen Langzeitaussage wurden die Ungewissheiten der den Analysen zugrundeliegenden Daten und Parameter systematisch untersucht und ausgewiesen. In der FEP-Analyse wurden für jedes FEP der Kenntnisstand und die identifizierten Ungewissheiten dokumentiert. Insbesondere wurden die Ungewissheiten über das Vorliegen eines jeden FEP sowie über seine Intensität (Ausprägung) beschrieben und den Wahrscheinlichkeitsklassen „wahrscheinlich“, „weniger wahrscheinlich“ und „nicht zu betrachten“ zugeordnet.

In den Integritätsanalysen und in der radiologischen Konsequenzenanalyse sind die im FEP-Katalog ausgewiesenen Daten- und Parameterungewissheiten systematisch berücksichtigt worden. Für die Daten und Parameter, die im FEP-Katalog nicht ausgewiesen waren, wurden Befunde ausgewertet und mit Datum und Bandbreite für die Analysen aufbereitet.

Im Rahmen der Konsequenzenanalyse sind umfangreiche deterministische Unsicherheitsanalysen durchgeführt worden. In diesen deterministischen Analysen wurden alle transportrelevanten Parameter variiert und kombiniert, um ihren Einfluss auf den Lösungstransport und den lösungstragenen Stofftransport zu ermitteln. Die den Lösungstransport und den Radionuklidtransport bestimmenden wesentlichen Parameter und Daten wurden in Bandbreiten variiert, die den wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Ausprägungen entsprachen. Die Analyseergebnisse wiesen allesamt rechnerische Freisetzungen von Radionukliden aus, die praktisch Null bedeuteten. Es

wurden keine Parameterkombinationen erkannt, die ein grundlegend anderes Verhalten erkennen ließen. Dies kann damit begründet werden, dass die den Lösungszutritt verhindernden Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse über den Zeitraum, der zum Volllaufen des Infrastrukturbereichs mit Lösung benötigt wird, voneinander entkoppelte Systeme darstellen. In dieser Zeit hat der Versatz aufgrund seiner Kompaktion eine ausreichende Dichtwirkung erreicht, so dass er die Dichtfunktion der Verschlüsse übernehmen kann. Ein gleichzeitiges Versagen der Verschlussysteme muss nicht unterstellt werden. Jedes Verschlussbauwerk (Schachtverschluss, Streckenverschluss) ist so bemessen, dass ein Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche während der Volllaufzeit des Infrastrukturbereichs nicht zu besorgen ist und die rechnerische Freisetzung von Radionukliden hieraus praktisch Null ist. Dabei wurden in den deterministischen Unsicherheitsanalysen die die Verschlussbauwerke charakterisierenden Parameter in ihren Bandbreiten variiert. Aus den Analyseergebnissen konnte aufgrund der entkoppelten Systeme Schacht- und Streckenverschlüsse gefolgert werden, dass weitere probabilistische Unsicherheitsanalysen in der Bandbreite der vorgenommenen Parametervariationen für das Endlagermodell keine weiteren Erkenntnisse liefern würden. Die 2-Phasenrechnungen zeigten für den Radionuklidtransport in der Lösung das gleiche Ergebnis. Zur Analyse des Transports volatiler Radionuklide bedarf es weiterer intensiver F&E-Arbeiten zur Absicherung der Beschreibung der Transportanalysen sowie zur Erhebung der zu ihrer Beschreibung erforderlichen Parameter. Daher wurde auf probabilistische Transportanalysen verzichtet und der Einfluss von Ungewissheiten durch deterministische Parametervariationen verdeutlicht.

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

6.1 Grundlegende Annahmen

Im Ergebnis der Ausführungen in den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.5 zum Umgang mit Ungewissheiten wurden einige Aspekte identifiziert, die zu wesentlichen Ungewissheiten hinsichtlich der Umsetzung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes führten. Sie wurden deshalb als grundlegende Annahmen im Vorhaben VSG behandelt. Die grundlegenden Annahmen werden in diesem Kapitel der zusammenfassenden Ergebnismwürdigung als Prämissen vorangestellt, um wiederholte einschränkende Hinweise auf die grundlegenden Annahmen zu vermeiden.

Ein Großteil der im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse und die nachfolgenden Ausführungen stehen unter dem Vorbehalt, dass die Ergebnisse zukünftiger Erkundungs- bzw. Forschungsarbeiten bestätigen, dass die nachfolgend aufgelisteten grundlegenden Annahmen zutreffen.

Die ersten drei grundlegenden Annahmen, die auch im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG /MÖN 12/ aufgeführt sind, resultieren aus der Tatsache, dass der Standort Gorleben derzeit erst teilerkundet ist. Sie betreffen die Übertragbarkeit der bislang erzielten Erkundungsergebnisse auf die gesamten Salzbereiche, die für die Realisierbarkeit der im Vorhaben VSG konzipierten Endlagerkonzepte im Salzstock Gorleben erforderlich sind:

- 1) Die laterale Ausbildung des Salzstockes Gorleben entspricht dem geologischen Horizontalschnitt /BGR 03/. Die Übertragbarkeit dieses Schnittes auf den Teufenbereich der Einlagerungssohle ist gegeben.
- 2) Die Übertragbarkeit der für das Hauptsalz der Staßfurtfolge (z2HS) im Erkundungsbereich EB1 ermittelten Gesteinseigenschaften auf den gesamten einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist gegeben.
- 3) Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge weist eine ausreichende laterale Verbreitung und Mächtigkeit für die Realisierung der Einlagerungsbereiche für alle im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte auf. Dabei ist der festgelegte Sicherheitsabstand zu den Gesteinsschichten, die potenziell lösungsführend sind oder Wegsamkeiten für Lösungen bilden können, zu berücksichtigen.

- 4) Es bestehen derzeit noch erhebliche Ungewissheiten zur Dynamik des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz unter realen Gebirgsdruckbedingungen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtegehalt sowie zu den hydraulischen Eigenschaften, die Salzgrusversatz bei kleinen Porositäten (vgl. Kap. 5.1.4.6 und 5.3.5) aufweist. Als weitere grundlegende Annahme wird zusätzlich zu den oben aufgeführten grundlegenden Annahmen des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes davon ausgegangen, dass trockener Salzgrusversatz spätestens nach wenigen 1.000 Jahren einen Kompaktionsgrad mit Porositäten von $1 \pm 1 \%$ erreicht hat. Bei Porositäten $\leq 1 \%$ bestehen keine zusammenhängenden Porenräume mehr und es findet keine druckgetriebene Lösungsbewegung mehr statt. Im Fall geringfügig angefeuchteten und/oder der Wärmeentwicklung der Abfälle ausgesetzten Salzgrusversatzes wird davon ausgegangen, dass dieser Zustand in Zeiträumen deutlich unterhalb von 1.000 Jahren eintritt.

6.2 Umsetzung der Sicherheitsanforderungen des BMU im Vorhaben VSG

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG wurde so angelegt, dass alle sicherheitstechnischen Vorgaben der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, soweit diese gemäß den Zielvorgaben im Vorhaben VSG die Langzeitsicherheit betreffen, aufgegriffen wurden.³⁷ Die entsprechenden Vorgaben der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ wurden dabei standortspezifisch durch abgeleitete Maßnahmen sowie Nachweisforderungen für die konkreten Verhältnisse am Standort Gorleben spezifiziert (vgl. Kap. 4). Aus dieser Vorgehensweise folgt, dass die langzeitsicherheitsrelevanten Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU dann erfüllt sind, wenn die entsprechenden Maßnahmen und Nachweise erfolgreich umgesetzt bzw. geführt werden konnten. Für das Vorhaben VSG sind dabei vor allem Anforderungen relevant, die in den Abschnitten 4 (Sicherheitsprinzipien), 5 (Optimierung), 6 (Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen), 7 (Sicherheitsnachweise) und 8 (Endlagerauslegung) niedergelegt sind.

Zur Demonstration, welche Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ in welcher Weise im Vorhaben VSG umgesetzt wurden, erfolgt in diesem Kapitel eine Zusammenfassung der wesentlichen im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse entlang der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/. Dabei wurden die Sicherheits-

³⁷ Die Vorgaben zur Betriebssicherheit wurden auch berücksichtigt, z. B. bezüglich der Rückholbarkeit der Abfallgebinde, aber nicht vertieft behandelt.

anforderungen des BMU in den folgenden Themenfeldern zusammengefasst, an denen sich die Diskussion der entsprechenden Vorgaben orientiert:

- Anforderungen an die Endlagerauslegung (Kap. 6.2.1),
- Anforderungen an die Nachweisführung (Kap. 6.2.2),
- Anforderungen an die Qualität, Dauerhaftigkeit und Robustheit des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Kap. 6.2.3).

Die in /BMU 10a/ geforderte Optimierung ist zu unterteilen in Optimierungsmaßnahmen, die sich aus den Arbeiten der VSG ableiten lassen, sowie der Optimierung des Endlagersystems im Endlagerentwicklungsprozess. Während Optimierungsmaßnahmen in der VSG identifiziert und umgesetzt wurden, stellt die VSG selbst einen Schritt im iterativen Prozess der Standortbewertung dar.

6.2.1 Anforderungen an die Endlagerauslegung

Die Vorgaben der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, die auf die technische Ausgestaltung von Endlagerkonzepten abzielen, sind in Tab. 6.1 aufgelistet.

Tab. 6.1 Anforderungen an die Endlagerauslegung, nach /BMU 10a/

Abschnitt /BMU 10a/ ¹⁾	Anforderung	Anmerkung
S 5.1	Optimierungsanforderungen	Festlegungen bezüglich der technischen Auslegung des Endlagers
S 5.2	Optimierung bzgl. Human Intrusion	
S 8.2	Minimierung der Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, gebirgsschonendes Auffahren	
S 8.3	Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Abstand zu Störungen	
S 8.5	Gliederung in Einlagerungsbereiche, zügige Beladung, Verfüllung und Verschluss	
S 8.6	Rückholbarkeit/Bergbarkeit von Behältern	
S 8.7	Multibarrierensystem	

¹⁾ S: Sicherheitsanforderung

Die in Tab. 6.1 genannten Forderungen wurden im Vorhaben VSG folgendermaßen umgesetzt:

Festlegung der technischen Auslegung des Endlagers gem. Abschnitt 5.1 /BMU 10a/

- Eine Grundlage für die im Zusammenhang mit den Anforderungen an die technische Auslegung des Endlagers geforderte Festlegung der Lage und Abmessung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (vgl. Kap. 5.2.5) waren neben der Verbreitung des Hauptsalzes z2HS die entwickelten Endlagerkonzepte. Wesentlich für die geometrische Konturführung der Endlagerkonzepte, die ausführlich in /BOL 11 und BOL 12/ sowie zusammenfassend in Kapitel 5.1.2 beschrieben sind, waren neben dem Platzbedarf für die Einlagerung der radioaktiven Abfälle die Einhaltung des Sicherheitsabstandes zu den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzschichten (vorbemessener einschlusswirksamer Gebirgsbereich) sowie die Ergebnisse der thermischen Auslegungsrechnungen (vgl. Kap. 5.1.2.3). Die Erfahrungen im Vorhaben VSG haben gezeigt, dass die Festlegung der Lage und der Umgrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse ein iterativer Prozess ist und die endgültige Ausweisung erst auf Basis der Ergebnisse der Integritätsanalysen und der radiologischen Konsequenzenanalyse erfolgen kann. Nur auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass die entsprechenden Anforderungen an das dauerhafte und sichere Einschussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auch nachweislich gegeben sind. Eine entsprechende Empfehlung, diesen Aspekt in den Sicherheitsanforderungen des BMU aufzunehmen, ist in Kapitel 7.1.2 enthalten.
- Die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte enthalten Planungen zur Positionierung und technischen Ausführung der Schächte und der Infrastruktureinrichtungen (s. /BOL 11/ und /BOL 12/ sowie Kap. 5.1.2). Entsprechendes gilt für die Lage und die technische Ausführung der Verschlussbauwerke. (s. /BOL 11/ und /BOL 12/ sowie /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/ sowie Kap. 5.1.4). Konzeptionelle Planungen zu Einlagerungs-, Stilllegungs- und Verschlussmaßnahmen werden ebenfalls in /BOL 11/ und /BOL 12/ beschrieben.

Durchführung von Optimierungsmaßnahmen gem. Abschnitt 5.1 /BMU 10a/

Hintergrund der Vorgaben in Kapitel 5 der Sicherheitsanforderungen des BMU ist, dass aufgrund des Jahrzehnte langen Betriebszeitraums eines Endlagers dem Fortschritt des Standes von Wissenschaft und Technik durch eine schrittweise Optimierung eines

Endlagers Rechnung zu tragen ist. Grundsätzlich waren die Optimierungsforderungen aufgrund der kurzen Laufzeit von 32 Monaten im Vorhaben VSG nicht in dem in /BMU 10a/ geforderten Umfang umsetzbar. Dennoch wurde, soweit dies im Rahmen der Bearbeitungszeit möglich war, eine Optimierung der entwickelten Endlagerkonzepte zu verschiedenen Aspekten vorgenommen. Diese betrafen neben betriebssicherheitlich und strahlenschutztechnisch bedingten Modifikationen der Wetterführung und der technischen Auslegung der Einlagerungsmaschine sowie einem rückholungsoptimierten Layout der Kokillen für die Bohrlochlagerung (s. a. Kap. 5.1.2.2) folgende Aspekte der Langzeitsicherheit:

- Thermische Optimierung der Endlagerkonzepte (s. Kap. 5.1.2.3),
- Minimierung des Flächenbedarfs des Westflügels (s. Kap. 5.1.2.3),
- Optimierung des Schachtverschlusskonzeptes im Hinblick auf Lösungskorrosion und mechanische Einwirkungen durch Erdbeben (s. Kap. 5.1.4.4),
- Modifizierung der Lage der Einlagerungsstrecke für die Brennelement-Strukturteile (vgl. Empfehlung in Kapitel 7.2.1).

Ableitung von Optimierungsmaßnahmen gegen unbeabsichtigtes menschliches Eindringen (Human Intrusion) gem. Abschnitt 5.2 /BMU 10a/

In /BEU 12a/ wurden mögliche Arten unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in die konzipierten Endlagersysteme und eine Reihe hieraus abgeleiteter Gegenmaßnahmen vorgestellt. Diese wurden abgeleitet aus den menschlichen Aktivitäten, die am Standort oder vergleichbaren Standorten in der Vergangenheit aufgetreten sind. Nach Abwägung gegen die in Abschnitt 5.2 /BMU 10a/ genannten primären Optimierungsziele (Strahlenschutz und Sicherheit in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie technische und finanzielle Realisierbarkeit) verblieben lediglich zwei erfolgversprechende Optimierungsmaßnahmen. Diese zielen auf ein frühzeitiges Erkennen einer Anomalie bzw. von Auffälligkeiten durch hinweisgebende Indikatoren ab, womit sie – entsprechende Reaktionen des eindringenden Personenkreises vorausgesetzt – möglicherweise zu einer Reduzierung der mit dem menschlichen Eindringen verbundenen Konsequenzen führen können (vgl. Kap. 5.2.6). Alle anderen untersuchten Maßnahmen standen entweder im Konflikt mit den primären Optimierungszielen oder wiesen ein derart ungünstiges Aufwand-Nutzen-Verhältnis auf, dass sie für eine Optimierung nicht in Betracht kamen.

Weitere konzeptionelle Maßnahmen, die primär auf den sicheren und dauerhaften Einschluss von Radionukliden im einschlusswirksamen Gebirgsbereich abzielen, tragen indirekt zur Erschwerung menschlichen Eindringens bzw. zur Reduzierung der hiermit verbundenen Konsequenzen bei. Hierzu gehören die Teufenlage der Einlagerungssohle, die Behälterwandstärken und die Separierung des Endlagerbergwerks in Einlagerungsfelder und Einlagerungsstrecken bzw. verrohrte Einlagerungsbohrlöcher.

Die Quintessenz aus der Befassung mit dem Aspekt der Optimierung von Endlagersystemen gegen unbeabsichtigtes menschliches Eindringen im Vorhaben VSG ist, dass die Optimierungsmöglichkeiten generell stark begrenzt sind. Die Ursachen liegen vor allem darin, dass weder die Motivation und die technischen Möglichkeiten zum Eindringen noch die Art und Weise, wie Eindringende auf Anomalien oder Auffälligkeiten reagieren, belastbar prognostiziert werden können. Aufgrund des Fehlens klarer Randbedingungen sind weiterhin quantitative Beurteilungen der Wirksamkeit der Maßnahmen im Hinblick auf die Reduktion der Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. der radiologischen Auswirkungen völlig spekulativ, weshalb die Ergebnisse entsprechender radiologischer Konsequenzenanalysen den Charakter der Beliebigkeit aufweisen würden.

Anforderungen an die Auffahrungs- und Einlagerungskonzepte gem. Abschnitt 8.2 und 8.5 /BMU 10a/

Beide Anforderungen betreffen den Schutz bzw. Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Die Forderung gem. Abschnitt 8.2 /BMU 10a/ (Minimierung der Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/gebirgsschonendes Auffahren) aus der sich im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG die Maßnahme M1 ableitet wird aus den in Kapitel 5.1.2.3 dargelegten Gründen auf planerischer Ebene als umgesetzt angesehen: Anzahl, Längen und Querschnitte der Einlagerungsstrecken bzw. Einlagerungsbohrlöcher ergeben sich aus der Anzahl und den Abmessungen der Behälter. Die Behälter- und Strecken- bzw. Bohrlochabstände untereinander wurden als Ergebnis von thermischen Auslegungsrechnungen optimiert /BOL 12/. Die Auffahrungskonzepte sehen den Einsatz von gebirgsschonenden Teilschnittmaschinen im Bereich der gesamten Einlagerungssohle vor. Bezüglich der Schächte ist anzumerken, dass sie außerhalb des im Vorhaben VSG ausgewiesenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs liegen. Beide Planungsaspekte werden unter Praxisbedingungen als realisierbar angesehen.

Die Forderung gem. Abschnitt 8.5 /BMU 10a/ (Gliederung in Einlagerungsbereiche, zügige Beladung, Verfüllung und Verschluss), aus der sich im Sicherheitskonzept der VSG die Maßnahmen M10 und M11 ableiten, wird aus den in Kapitel 5.1.2.3 dargelegten Gründen ebenfalls als auf planerischer Ebene umgesetzt angesehen:

- Aufgrund der in /BOL 11/ und /BOL 12/ beschriebenen Einlagerungskonzepte, die eine sequenzielle strecken- bzw. bohrlochweise Auffahrung, Beladung und Verfüllung im Rückbauverfahren vorsehen, ist zu jedem Zeitpunkt des Einlagerungsbetriebes jeweils nur eine einzelne Einlagerungssektion (Strecke, Bohrloch) über wenige Monate in Betrieb. Es wird davon ausgegangen, dass diese Maßnahme auch in der Realität mit heutiger Bergbautechnologie umsetzbar ist.
- Bei den entwickelten Einlagerungskonzepten wurde die Forderung in Abschnitt 8.5 /BMU 10a/ nach einer Separierung der verschiedenen Abfalltypen durch
 - die räumliche Trennung wärmeentwickelnder und vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle in verschiedenen, nur über die nördliche Richtstrecke und den Infrastrukturbereich verbundenen Endlagerflügeln,
 - die weitgehende Trennung verschiedener Abfallarten innerhalb der Flügel in Einlagerungsfelder sowie
 - die Beladung einer Einlagerungssektion mit jeweils nur einer Abfallart realisiert (vgl. Kap. 5.1.2.3 sowie /BOL 12/).

Aus den Ergebnissen der Integritätsanalysen und den radiologischen Konsequenzenanalysen lassen sich keine Zustände erkennen, die schädliche Auswirkungen auf das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs infolge der Interaktion von Abfallarten mit unterschiedlichen physikalischen oder chemischen Eigenschaften zur Folge hätten. Durch die strikte Trennung der Abfallarten ließen sich die Endlagersysteme in ihrem sicherheitsrelevanten Verhalten jedoch deutlich besser prognostizieren, was sich positiv auf die Belastbarkeit (Robustheit) sicherheitsgerichteter Aussagen auswirkt. Gasströmungen zwischen beiden Endlagerflügeln könnten noch weiter reduziert werden, wenn im Sinne zukünftiger Optimierungen auf eine Verbindung beider Flügel durch die nördliche Richtstrecke verzichtet wird (vgl. Empfehlung in Kapitel 7.2.1).

Anforderungen an die Lage der Einlagerungsbereiche gem. Abschnitt 8.3 /BMU 10a/

Die Forderung zielt auf den dauerhaften Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ab, indem Sicherheitsabstände zu Bereichen einzuhalten sind, von denen aus die Integrität potenziell gefährdet werden könnte. Diese Integritätsgefährdungen können von exogenen Prozessen oder Ereignissen an oder nahe der Tagesoberfläche oder von geologischen Störungen ausgehen. Im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG wurde dieser Forderung durch die Maßnahmen M13 (ausreichende Teufenlage der Einlagerungsbereiche) bzw. M4 (Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten und den das Hauptsalz z2HS begrenzenden Salzschichten) entsprochen (vgl. Kap. 5.1.2.3).

Die Forderung wurde im Einzelnen folgendermaßen umgesetzt:

- **Teufenlage:** Die im Vorhaben VSG durchgeführte Endlagerplanung sieht bei der Streckenlagerung (Varianten B1 und B2) eine Teufenlage der Einlagerungssohle von 870 m NN, d. h. 30 m unterhalb der Erkundungssohle, vor. Gleiches gilt für die Lage der Richt- und Überfahrungsstrecken im Fall der Bohrlochlagerung (Variante C). Die Ergebnisse der Integritätsanalysen zeigten, dass bei allen untersuchten oberflächennah zu unterstellenden Einwirkungen ein Bereich von mindestens 300 m (Referenzszenarien) bzw. 250 m (Alternativszenarien) oberhalb der Einlagerungssohle verbleibt, in dem keine Integritätsverletzungen aufgrund oberflächennah ablaufender Prozesse und Ereignisse auftreten (vgl. Kap. 5.2.2.1 und /KOC 12/). Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass das gewählte Niveau der Einlagerungssohle ausreichend tief liegt, um eine nachteilige Beeinflussung der Einlagerungsbereiche durch klimatische oder sonstige Vorgänge, die an oder nahe der Erdoberfläche im Nachweiszeitraum ablaufen können, auszuschließen zu können.
- **Abstand zu Störungen:** Die Lage der Einlagerungsbereiche wurde im Hauptsalz der Staßfurt-Serie (z2HS) im Kernbereich des Salzstockes vorgesehen. Gemäß den Ergebnissen der bisherigen Erkundung des Salzstockes Gorleben und salzmechanischen Überlegungen wird aus den in /WEB 13/ und zusammenfassend in Kapitel 5.1.3 dargelegten Gründen ausgeschlossen, dass in diesen Hauptsalzvorkommen, die die geologische Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Bereich der konzipierten Einlagerungsbereiche bilden, offene Klüfte, Störungen oder Lösungsvorkommen mit Volumina im Kubikmeterbereich auftreten können. Der Umstand, dass nicht völlig ausgeschlossen werden kann, dass einzelne Klüfte im Übergangsbereich des Hauptsalzes zu den Gesteinen der Leine-Serie wenige

Meter in das Hauptsalz hineinreichen können, wurde bei der Bemessung des Sicherheitsabstandes berücksichtigt.

Aus den oben genannten Gründen wird davon ausgegangen, dass die Forderungen des Abschnittes 8.3 der Sicherheitsanforderungen im Vorhaben VSG auf planerischer Ebene erfüllt wurden. Diese Aussage steht bezüglich des ausreichenden Abstandes zu Störungen unter dem Vorbehalt der Richtigkeit der zweiten grundlegenden Annahme (Übertragbarkeit der für die im Erkundungsbereich EB1 ermittelten Gesteinseigenschaften des Hauptsalzes, Kap. 6.1).

Anforderungen zur Rückholbarkeit/ Bergbarkeit der Abfallbehälter gem. Abschnitt 8.6 /BMU 10a/

Bergbarkeit: In den Sicherheitsanforderungen des BMU wird als Bergung „die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme“ bezeichnet. Es wird gefordert, dass die Abfallbehälter unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes für die wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren handhabbar sein müssen, wobei auch die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten ist. Die Bergbarkeit von Behältern für wärmeentwickelnde Abfälle wurde bereits im Vorfeld des Vorhabens VSG auf konzeptioneller Basis untersucht. Die grundsätzliche Machbarkeit ist in der Studie /ENG 95/ beschrieben. Nach Abschätzungen in /MÜL 08/ kann für die POLLUX[®]- und CASTOR[®]-Behälter aufgrund der Wandstärken eine mechanische Stabilität und Handhabbarkeit für 500 Jahre nach Endlagerverschluss unterstellt werden. Angesichts der geringen Feuchtemengen in den Einlagerungsfeldern, welche im Ergebnis der radiologischen Konsequenzanalysen im Regelfall lediglich auf die in den Abfallbinden enthaltenen Restfeuchten und die geringe Versatzfeuchtigkeit zurückgehen, sind massive Korrosionsraten, die die Integrität der Behälter im Sinne der Bergbarkeit gefährden können, unwahrscheinlich. Insgesamt wird in /BOL 12/ davon ausgegangen, dass die für die Rückholung aufgestellten Konzepte prinzipiell auch eine Bergung ermöglichen. Dies gilt auch für die Transport- und Lagerbehälter sowie die rückholbaren BSK-R-Kokillen. Allerdings beruhen diese Aussagen weitgehend auf Analogieschlüssen. Ein entsprechender Eignungsnachweis ist zukünftig noch im Genehmigungsverfahren bzw. bei Zulassung der Behälter zu führen. Dabei sind lokale Effekte, wie z. B. Lochfraß-, Korngrenzen- oder Spannungsrissskorrosion, die unter Endlagerbedingungen auftreten können, im Hinblick auf die Aerosolfreisetzung ebenso

wie eine mögliche Versprödung der Behälter durch Wasserstoff zu untersuchen. Weiterhin ist die mechanische Stabilität der Behälter und der Bohrlochverrohrung über 500 Jahre in der Nachverschlussphase gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck und der mechanischen Belastung der Behälter bei der Bergung nachzuweisen.

Rückholbarkeit: In den Sicherheitsanforderungen des BMU wird als Rückholbarkeit „die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk“ bezeichnet, die gemäß der Anforderung in Abschnitt 8.6 /BMU 10a/ über den gesamten Betriebszeitraum eines Endlagers bis zum Verschluss der Schächte (oder Rampen) gegeben sein muss. Im Gegensatz zur Bergbarkeit ist im Rahmen von Genehmigungsverfahren vom Antragsteller ein technisches Konzept vorzulegen, aus dem schlüssig hervorgeht, dass die Rückholung von Abfallbehältern mit wärmeentwickelnden Abfällen technisch realisierbar ist. Die grundsätzliche Machbarkeit einer Rückholung wurde auch hier im Ergebnis der Studie /ENG 95/ für eingelagerte POLLUX[®]-Behälter bestätigt. Vergleichbare Überlegungen wurden auch für die Rückholung von CASTOR[®]-, Transport- und Lagerbehältern (Variante B2) angestellt /BOL 12/. Die im Rahmen des Vorhabens VSG erstmals angestellten Untersuchungen zur Rückholbarkeit von Kokillen aus tiefen Bohrlöchern ergaben dagegen, dass bei der Bohrlochlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen und bestrahlten Brennelementen in Kokillen (Variante C) eine Rückholung nicht ohne umfangreiche Modifikationen bei der Einlagerungstechnik sowie der Auslegung der Endlagerbehälter möglich ist /NSE 12/. Diese betreffen die Bohrlochkonfiguration, die Form der Kokillen sowie die technische Ausgestaltung der Einlagerungsmaschine (vgl. Kap. 5.1.2.2). Ähnlich wie im Fall der Bergbarkeit bestehen zu den im Vorhaben VSG entwickelten Rückholungskonzepten keine grundlegenden Zweifel an der technischen Umsetzbarkeit. Es erscheint plausibel, dass die Temperatur durch entsprechende Bewetterung auf Arbeitstemperatur reduziert wird und für die Auffahrung der Rückholstrecken prinzipiell die gleiche Technik wie beim Auffahren des Endlagerbergwerks eingesetzt werden kann. Dennoch ist auch hier festzustellen, dass bis zur Feststellung der Eignung der im Vorhaben VSG erstmalig entwickelten Rückholungskonzepte noch deutlicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Dieser betrifft insbesondere die Gebrauchstauglichkeit der im Vorhaben VSG vorgesehenen Kokillen im Hinblick auf ihre Rückholbarkeit, die Weiterentwicklung des Konzeptes zur Rückholung von Kokillen aus tiefen verrohrten Bohrlöchern sowie die generelle Praxistauglichkeit des Rückholungsbetriebes (vgl. Kap. 5.1.2.2).

Anforderungen an das Multibarrierensystem gem. Abschnitt 8.7 /BMU 10a/

Die Umsetzung der Anforderungen an das Barrierensystem wird im Zusammenhang mit der Darstellung der Robustheit der im Vorhaben VSG entwickelten Endlagersysteme in Kapitel 6.2.3 beschrieben.

Fazit:

Zusammenfassend ist folgendes festzustellen:

Die Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerauslegung können generell auf der für eine vorläufige Sicherheitsanalyse typischen konzeptionellen Ebene als erfüllt bzw. in Zukunft als erfüllbar angesehen werden.

Bis zur Genehmigungsreife der im Vorhaben VSG projektierten Behälterkonzepte (inkl. des Nachweises der Bergbarkeit) sowie der Einlagerungs-, Verschluss- und Rückholungskonzepte besteht noch weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, auf den in Kapitel 7.2.2 eingegangen wird. Bei der Konzeption der schnellwirkenden technischen Verschlussbauwerke konnte bereits auf praktische Erfahrungen mit prototypischen oder bereits abschließend realisierten Analoga zurückgegriffen werden.

Zum langfristigen Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz bestehen bei kleinen Porositäten auch auf konzeptioneller Ebene noch signifikante Ungewissheiten. Insbesondere ist zu klären, ob zukünftig nachgewiesen werden kann, dass dieser nach einigen 1.000 Jahren die im Sicherheitskonzept der VSG vorgesehene Dichtwirkung annimmt. Insofern gilt der Vorbehalt, dass sich durch zukünftige F&E-Arbeiten die in Kapitel 6.1 unter Nr. 4 dargestellte grundlegende Annahme als richtig erweist.

Die Aussagen zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an die Lage der Einlagerungsbereiche stehen unter dem Vorbehalt, dass durch zukünftige F&E-Arbeiten der Nachweis der Richtigkeit der in Kapitel 6.1 unter Nr. 2 dargestellten grundlegenden Annahme nachgewiesen werden kann.

Im Fall der Durchführung von Optimierungsmaßnahmen gilt die Einschränkung, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU hierbei von einem Optimierungsprozess während eines Jahrzehnte langen Endlagerentwicklungsprozesses ausgehen, wobei dem Fortschritt des Standes von Wissenschaft und Technik iterativ an bestimmten Halte-

punkten durch Optimierungsmaßnahmen Rechnung zu tragen ist. Dieser Anspruch kann jedoch nicht auf ein Forschungsvorhaben mit einer Laufzeit von wenigen Jahren übertragen werden. Insofern konnten im Vorhaben VSG nur Optimierungsmaßnahmen vorgenommen werden, die innerhalb der Vorhabenslaufzeit identifizierbar und konzeptionell umsetzbar waren.

6.2.2 Anforderungen an die Nachweisführung

Die Vorgaben der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, die auf Umfang und Inhalt der zu führenden Nachweise abzielen, sind in Tab. 6.2 aufgelistet.

Tab. 6.2 Anforderungen an die Sicherheitsnachweise, nach /BMU 10a/

Abschnitt /BMU 10a/ ¹⁾	Anforderung	Anmerkung
S 7.2	Anforderungen an den Langzeitsicherheitsnachweis	Festlegung des Nachweiszeitraums, Anforderungen an den inhaltlichen Umfang des Langzeitsicherheitsnachweises
S 7.2.1	Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Inhaltliche Anforderungen an die Integritätsanalyse
S 7.2.2	Radiologische Langzeitaussage	Inhaltliche Anforderungen an die radiologische Konsequenzenanalyse
S 7.2.3	Nachweis der Robustheit geotechnischer Komponenten	Inhaltliche Anforderungen an die radiologische Konsequenzenanalyse
S 7.2.4	Nachweis des Kritikalitätsausschlusses	Inhaltliche Anforderungen an den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses
S 7.3	Anforderungen an die numerische Analyse des Langzeitverhaltens	
S 7.7	Anforderungen an die Qualität der Standortdaten	
S 7.9	Untersuchung nicht-radiologischer Umwelteinflüsse	Schadstoffmobilisierung, Veränderung der hydrogeologischen Situation im Deckgebirge

¹⁾ S: Sicherheitsanforderung

Im Nachfolgenden wird dargestellt, in welcher Form die im Abschnitt 7 der Sicherheitsanforderungen des BMU aufgelisteten Vorgaben an die zu führenden langzeitsicher-

heitsbezogenen Nachweise im Vorhaben VSG umgesetzt wurden. Diese Prüfung geschieht formal, d. h. im Hinblick auf die Vollständigkeit der Umsetzungen der Forderungen in /BMU 10a/. Die zusammenfassende Würdigung wesentlicher Ergebnisse im Sinne der Qualität und der Dauerhaftigkeit des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie der Robustheit der konzipierten Endlagersysteme wird vornehmlich in Kapitel 6.2.3 vorgenommen.

Anforderungen an die Langzeitsicherheitsanalyse gem. Abschnitt 7.2 /BMU 10a/

Abschnitt 7.2 /BMU 10a/ gibt allgemein den Umfang der in einer Langzeitsicherheitsanalyse zu berücksichtigenden Aspekte vor. Die Bewertung und Dokumentation muss dabei folgende Punkte umfassen:

Das jeweils zugrundeliegende Endlagerkonzept: Im Vorhaben VSG wurden drei Endlagerkonzepte entwickelt: Die Einlagerung aller Endlagerbehälter (POLLUX[®]) für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in horizontalen Strecken (Variante B1) bzw. von Transport- und Lagerbehältern in horizontalen Bohrlöchern (Variante B2) sowie in tiefen, vertikalen Bohrlöchern (Brennstabkokillen, Triple-Packs, Variante C). Diese Varianten wurden jeweils mit der Variante A (Optionale Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern im Westflügel) kombiniert. Die Einlagerungsvariante AB2 wurde im Vorhaben VSG nicht eigenständig behandelt, sondern es wurde eine Differenzbetrachtung zur Einlagerungsvariante AB1 vorgenommen. Die Endlagerkonzepte sind ausführlich in /BOL 11 und /BOL 12/ und zusammenfassend in Kapitel 5.1.2.1 beschrieben. Sie wurden einschließlich der entsprechenden Rückholungskonzepte bezüglich der Umsetzung der Vorgaben aus dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG (Maßnahmen) in Kapitel 5.1.2.3 bzw. derjenigen aus den Sicherheitsanforderungen des BMU in Kapitel 6.2.1 bewertet.

Die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung: Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, baut die Datengrundlage zur Standorterkundung im Vorhaben VSG auf dem Stand der geowissenschaftlichen Erkundungsergebnisse zum Zeitpunkt vor dem Moratorium von 2000 auf. Die bis dahin erzielten Erkundungsergebnisse sind in /KLI 07a/, /KÖT 07a/, /BOR 08a/ und /BRÄ 11/ zusammenfassend dokumentiert. Soweit Ergebnisse aus der ab dem Jahr 2010 fortgesetzten Erkundung innerhalb der Laufzeit des Vorhabens VSG vorlagen, wurden diese mit berücksichtigt (vgl. /HAM 11/). Die geowissenschaftliche Langzeit-

prognose wurde im Vorhaben VSG erarbeitet /MRU 11/. Das Vorhaben VSG enthält insofern eine Synthese sämtlicher bis heute zum Standort Gorleben erzielter Erkundungsergebnisse. Weiterhin wurde eine Bewertung der Standortdaten im Hinblick auf deren Vollständigkeit, Aussagekraft und Ungewissheiten für eine vorläufige Sicherheitsanalyse sowie der Eignung der zugrunde liegenden Untersuchungsmethoden vorgenommen. Diese Aufgabe wurde durch Professoren geologischer Institute der RWTH Aachen in Kooperation mit der Geophysica Beratungsgesellschaft mbH wahrgenommen, Institutionen, die nicht an der Erkundung der Salzstruktur Gorleben beteiligt waren. Ihre Ergebnisse sind im Bericht /KUK 12/ dokumentiert. Die Autoren kommen zusammenfassend zu dem Schluss, dass die vorliegenden Daten zum Standort Gorleben sowohl hinsichtlich ihres Umfangs als auch hinsichtlich ihrer Qualität unter Berücksichtigung noch vorhandener Ungewissheiten für die Durchführung einer vorläufigen Sicherheitsanalyse (VSG) geeignet sind. Die Ungewissheiten werden in /KUK 12/ im Wesentlichen darauf zurückgeführt, dass derzeit fortentwickelte und damit bessere Erkundungsmethoden bestehen als diejenigen, die vor dem Moratorium, insbesondere in den 1990er Jahren, eingesetzt wurden. In diesem Zusammenhang ist zusätzlich darauf hinzuweisen, dass die Standortcharakterisierung, soweit sie auf Erkenntnisse der untertägigen Erkundung zurückgeht, noch unvollständig ist und sich bis jetzt lediglich auf einen Teil der für die Realisierung der im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte erforderlichen Hauptsalzvolumina erstreckt. Insofern müssen die Ergebnisse unter die in Kapitel 6.1 aufgeführten Vorbehalte Nr. 1. – 3. gestellt werden.

Weiterhin wurde im Vorhaben VSG der **Stand von Wissenschaft und Technik** zur Endlagerforschung im Steinsalz in Deutschland zusammengetragen. So wurden nahezu alle Institutionen, die im Bereich dieses Forschungszweiges intensiv tätig sind, in das Vorhaben VSG eingebunden. Insbesondere baut das Vorhaben VSG auf den Erkenntnissen aus dem Vorhaben ISIBEL /ISI 08/ auf, in welchem bereits die wesentlichen Teile für eine Synthese des Standes der Wissenschaft zur Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Salzstöcken erarbeitet wurden. Insofern ist zusammenfassend davon auszugehen, dass das Vorhaben VSG auf dem aktuellen Stand der Informationen zu den Standortverhältnissen sowie der Forschung und Entwicklung zur Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in Salzstöcken beruht. Dies ist auch die Bedingung für die Ausweisung des zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarfs, der, die Inhalte dieses Berichtes betreffend, in Kapitel 7.2.2 aufgelistet wird sowie, ganzheitlich auf das Vorhaben VSG bezogen, in einem separaten Abschlussbericht /THO 13/ zusammengefasst wird. Die wissenschaftlichen Grundlagen, auf denen die im Vorhaben

VSG durchgeführten Analysen aufbauen, werden ebenso wie der hieraus resultierende F&E-Bedarf in den jeweiligen Arbeitspaket-Abschlussberichten ausführlich dargestellt.

Die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren: Auf diesen Aspekt wird im Zusammenhang mit der Diskussion der Umsetzung der Sicherheitsanforderung S 7.2.3 (Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems) in Kapitel 6.2.3 eingegangen.

Die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse und die diesbezügliche Vertrauensbildung sowie die Qualifizierung der Modelle: Auf diese Anforderungen wird im Zusammenhang mit den Vorgaben aus Abschnitt 7.3 der Sicherheitsanforderungen in Kapitel 6.2.3 eingegangen. Im Hinblick auf die Darstellung der Qualifizierung der im Vorhaben VSG verwendeten Rechencodes wird auf das Memorandum /KOC 13/ verwiesen.

Die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Ungewissheiten: Die Strategie zum Umgang mit den verschiedenen Formen von Ungewissheiten wurde im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG festgelegt (vgl. /MÖN 12/). Die Art und Weise, wie im Vorhaben VSG, insbesondere bei den Systemanalysen, mit bestehenden Ungewissheiten umgegangen wurde, wird in Kapitel 5.3 erläutert. Im Vorhaben VSG wurden die bestehenden Ungewissheiten folgendermaßen unterteilt:

1. Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen

Diese Ungewissheiten werden im Wesentlichen durch den Erkenntnisstand, der im FEP-Katalog /WOL 12b/ niedergelegt ist, und die darauf aufbauende Szenarienentwicklung (gestützt auf die geowissenschaftliche Langzeitprognose /MRU 11/) behandelt, da dort alle Prozesse und Ereignisse (ausgenommen Human Intrusion), deren Auftreten aus heutiger Sicht innerhalb des Nachweiszeitraums vorstellbar sind, berücksichtigt und hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens klassifiziert wurden. In der Szenarienentwicklung /BEU 12b/ wurden auf dieser Basis zu jeder Einlagerungsvariante Referenzszenarien definiert, die eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender, möglicher Entwicklungen des Endlagersystems repräsentieren. Hiervon abweichende, weniger wahrscheinliche Entwicklungen wurden durch Alternativszenarien charakterisiert. Referenzszenarien und Alternativszenarien bildeten die Grundlage für die Auslegung der Verschlussbauwerke und für die Ableitung von

Rechenfällen für die Integritätsanalysen zur geologischen Barriere /KOC 12/ sowie für die radiologische Konsequenzenanalyse /LAR 13/. Es wird somit davon ausgegangen, dass alle aus heutiger Sicht denkbaren zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems berücksichtigt und die hieraus resultierenden sicherheitstechnischen Konsequenzen im Vorhaben VSG analysiert wurden.

2. Nicht prognostizierbare zukünftige Entwicklungen

Diese Ungewissheiten betreffen vor allem die nicht belastbar prognostizierbaren zukünftigen klimatischen Entwicklungen. Im Rahmen der Szenarientwicklung wurden zwei verschiedene Klima-Entwicklungen betrachtet: Ein 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten, wobei eine Abfolge der Kaltzeiten vom Typ Weichsel, Elster und Saale unterstellt wurde. Hiervon abweichende Entwicklungen bezüglich der Kalt-/Warmzeitzyklen, des Auftretens und der Ausprägung glazialer Rinnen sowie alternative Abfolgen von Kaltzeittypen wurden durch weniger wahrscheinliche Alternativszenarien charakterisiert /BEU 12b/. Dennoch verbleiben bezüglich der tatsächlichen, jedoch unbekanntem zukünftigen Klimaentwicklung und ihrer Auswirkung auf die konzipierten Endlagersysteme signifikante Restungewissheiten. Diesen wurde zum einen durch die Position der Einlagerungsbereiche in einer großen Tiefe von 870 m NN, d. h. in weiter Entfernung von oberflächennah ablaufenden Klima-Einwirkungen (vgl. Maßnahme M13, Kap. 5.1.3 und 6.2.1), begegnet. Zum anderen wurde der klimabedingt unsicheren Prognostizierbarkeit der langfristigen geologisch-hydrogeologischen Situation im Deckgebirge dadurch Rechnung getragen, dass dem Deckgebirge im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG keine rückhaltenden oder konzentrationsmindernden Sicherheitsfunktionen zugeschrieben wurden.

3. Modellungewissheiten

Modellungewissheiten, die im Wesentlichen auf die Abstraktion der geologischen Strukturen bzw. der Geometrien der konzipierten Endlagerkonzepte zurückgehen, wurde dadurch begegnet, dass diversitäre Modelle zum Einsatz kamen. Die Integritätsanalysen /KOC 12/ wurden von drei unterschiedlichen Arbeitsgruppen mit drei unterschiedlichen Modellkonzepten (Berechnungsprogramme und Stoffgesetze) durchgeführt, wobei auf unterschiedlichen räumlichen Skalen für die verschiedenen Zielsetzungen unterschiedliche Herangehensweisen und Modellgeometrien zur Anwendung kamen. Da allen Modellkonzepten die gleichen grundlegenden Annahmen zugrunde lagen, konnten die erzielten Ergebnisse miteinander verglichen und so auf Plausibilität über-

prüft und Modellungswissheiten identifiziert und reduziert werden. Beispielsweise stimmten trotz Verwendung unterschiedlicher Modellansätze die Lokationen der Integritätsverletzungen überein, auch wenn die Ausmaße je nach verwendetem Stoffgesetz unterschiedlich waren. Modellungswissheiten, die auf die konzipierten Endlagerkonzepte zurückgehen, wurde u. a. durch den diversitären Einsatz der Programme MARNIE und TOUGH2 bei der Konsequenzenanalyse /LAR 13/ (vgl. Kap. 5.2.3) Rechnung getragen.

4. Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von am Standort ablaufenden Prozessen

Bei den Integritätsanalysen zur geologischen Barriere sowie zu den technischen Barrieren und der radiologischen Konsequenzenanalyse wurde eine Reihe von sicherheitsrelevanten Prozessen identifiziert, zu denen noch Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Da diese F&E-Arbeiten im Rahmen des Vorhabens VSG nicht geleistet werden konnten, verblieben Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung insbesondere folgender Prozesse:

- Auswirkungen von Kaltzeiten insbesondere hinsichtlich der Bildung von glazialen Rinnen,
- Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz,
- Langzeitstabilität der Dichtmaterialien in den Verschlussbauwerken,
- Ablauf der Verheilung der konturnahen Auflockerungszone im Bereich von Verschlussbauwerken,
- Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungsbereichen bei erhöhten zerfallsbedingten Temperaturen,
- geomechanische Auswirkung von salzstockinternen Schichtflächen,
- Ablauf der Metallkorrosion bei geringen verfügbaren Lösungsmengen,
- Beschreibung des Mehrphasen-Mehrkomponentenflusses (Zweiphasenflussparameter),
- Beschreibung und Modellierung der Quellterme bei geringen Lösungsmengen insbesondere im Fall der Freisetzung gasförmiger Radionuklide sowie
- modellhafte Beschreibung der Freisetzungsprozesse gasförmiger Radionuklide.

Den Ungewissheiten zum Ablauf und zur modellhaften Beschreibung dieser Prozesse wurde im Regelfall dadurch Rechnung getragen, dass aus heutiger Sicht konservative Annahmen getroffen wurden. Der jeweilige Umgang mit den einzelnen Prozess-ungewissheiten wurde zusammenfassend in Kapitel 5.3.5 und ausführlich in den entsprechenden Abschlussberichten zu den Systemanalysen in /KOC 12/, /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/ sowie /LAR 13/ dargestellt.

5. Parameter- und Datenungewissheiten

Sowohl bei den Integritätsanalysen als auch bei der radiologischen Konsequenzenanalyse wurden die im FEP-Katalog /WOL 12b/ zur Ausprägung der einzelnen FEP ausgewiesenen Daten- und Parameterungewissheiten systematisch berücksichtigt. Diese Ungewissheiten wurden durch Analysen der Referenzszenarien, deren FEP die wahrscheinliche Daten- und Parameterbandbreite zugrunde lag, sowie der Alternativszenarien, bei denen die FEP in weniger wahrscheinlichen Datenbandbreiten berücksichtigt wurden, bei den Systemanalysen im Hinblick auf ihren Einfluss auf das Rechenergebnis systematisch untersucht. Für die Daten und Parameter, die im FEP-Katalog nicht ausgewiesen waren, wurden Datum und Bandbreite für die Analysen aus Literaturstudien abgeleitet. Vor allem im Rahmen der Konsequenzenanalyse wurden umfangreiche deterministische Unsicherheitsanalysen durchgeführt, in denen die Datenbandbreiten von Parametern variiert und ihre Sensitivität im Hinblick auf den Einfluss auf das Rechenergebnis untersucht wurden.

6. Im Vorhaben VSG nicht reduzierbare Ungewissheiten

Einigen signifikanten Ungewissheiten konnte im Vorhaben VSG nur durch die Festsetzung grundlegender Annahmen begegnet werden. Diese Ungewissheiten resultieren aus der erst teilweise erfolgten untertägigen Standorterkundung sowie aus dem heutzutage noch nicht hinreichend experimentell nachgewiesenen Prozess des Kompaktionsverhaltens von Salzgrusversatz. Diese grundlegenden Annahmen sind in Kapitel 6.1 aufgelistet. Die Ergebnisse des Vorhabens VSG stehen unter dem Vorbehalt, dass die Ergebnisse zukünftiger Erkundungs- bzw. F&E-Arbeiten diese grundlegenden Annahmen bestätigen.

Der in Abschnitt 7.2 /BMU 10a/ vorgegebene Nachweiszeitraum von einer Million Jahren wurde im Vorhaben VSG durchgängig berücksichtigt. Dies betraf vor allem

- die geowissenschaftliche Langzeitprognose /MRU 11/, deren Ergebnisse zusammenfassend in Anhang A.4 dargestellt sind,
- den FEP-Katalog /WOL 12b/ und die Szenarientwicklung /BEU 12b/ (vgl. Kap. 5.2.1),
- die Integritätsanalysen zur geologischen Barriere /KOC 12/ (vgl. Kap. 5.2.2.1) sowie
- die radiologische Konsequenzenanalyse /LAR 13/ (vgl. Kap. 5.2.3).

Spezielle Anforderungen an die Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gem. Abschnitt 7.2.1 /BMU 10a/

Die Integritätsanalysen wurden auf der Basis des FEP-Kataloges und sämtlicher integritätsrelevanter Szenarien geführt. Da die Ergebnisse der geowissenschaftlichen Langzeitprognose eine wesentliche Grundlage sowohl für die Zusammenstellung des FEP-Kataloges als auch für die Ableitung von Szenarien war, erfolgten die Integritätsanalysen mittelbar ebenfalls auf dieser Grundlage. Es wurde im Nachweiskonzept des Vorhabens VSG die Strategie verfolgt, zunächst im Rahmen der Integritätsanalysen zu überprüfen, welche Bereiche des Salzstocks eine Integritätsverletzung erfahren, um auf der Basis dieser Ergebnisse und derjenigen der radiologischen Konsequenzenanalyse die Lage und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs endgültig festzulegen (vgl. Kap. 5.2.5). Bei der endgültigen Festsetzung wurde berücksichtigt, dass vorab im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG im Sinne einer Anfangsannahme (initial guess) davon ausgegangen wurde, dass eine Mindestmächtigkeit der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche von einigen Zehner Metern erforderlich ist. Dies führte unter Einbezug eines Sicherheitszuschlages zur Festlegung des Sicherheitsabstandes zu Gesteinspartien außerhalb des Hauptsalzes von 50 m (vgl. Kap. 5.1.2.3), aus dem auf der Grundlage der oben genannten Ergebnisse der Systemanalysen die Lage und die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs konzeptspezifisch festgelegt wurden. Diese iterative Vorgehensweise wird aus den Erfahrungen im Vorhaben VSG nachweisstrategisch als zielführend angesehen, weshalb empfohlen wird, auf diesen Aspekt in den Sicherheitsanforderungen des BMU zukünftig einzugehen (vgl. Empfehlung in Kapitel 7.1.2).

Die Integritätsanalysen /KOC 12/ wurden für einen Nachweiszeitraum von einer Million Jahre geführt. In den verwendeten verschiedenskaligen Fern-, Nahfeld- und Grubenmodellen wurden die Endlagerkonzepte (Einlagerungsvarianten AB1 und AC) in unterschiedlich detaillierter geometrischer Auflösung abgebildet. Die Rechnungen erfolgten unter Berücksichtigung der Wärmeentwicklung und Gasbildung der eingelagerten Abfälle. Als Maßstab für Integritätsverletzungen wurden die in den Sicherheitsanforderungen des BMU vorgegebenen Integritätskriterien – das Dilatanzkriterium und das Fluiddruckkriterium (Minimalspannungskriterium) – verwendet. Dabei wurden beide Kriterien unabhängig voneinander überprüft und bereits bei Verletzung eines der beiden Kriterien ein Integritätsverlust unterstellt. Weiterhin wurde die thermo-mechanische Beanspruchung der geologischen Barriere infolge des Eintrages der Zerfallswärme für die Einlagerungsvarianten B1 (Streckenlagerung) und C (Bohrlochlagerung) untersucht, wobei bereits durch die thermische Auslegung der Endlagerkonzepte /BOL 12/ eine wärmebedingte Schädigung der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche und der Verschlussbauwerke durch Einhalten der Temperaturkriterien ausgeschlossen werden konnte. Formal wurden damit die Vorgaben der Sicherheitsanforderungen an die Nachweisführung der Integritätsanalysen im Sinne der Vollständigkeit, d. h. der zu berücksichtigenden Aspekte erfüllt. Dies gilt auch für die Vorgabe aus Abschnitt 7.3 /BMU 10a/, soweit dies die numerische Analyse des Langzeitverhaltens im Hinblick auf die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrifft. Auf die Umsetzung der inhaltlichen Forderungen des Abschnitts 7.2.1 /BMU 10a/ im Sinne des Integritätsnachweises wird im Zusammenhang mit der Diskussion der Erfüllung der Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU zur Dauerhaftigkeit des sicheren Einschusses in Kapitel 6.2.3 eingegangen.

Spezielle Anforderungen an die radiologische Langzeitaussage gem. Abschnitt 7.2.2 /BMU 10a/

Bei der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/ erfolgte die radiologische Bewertung der Radionuklidfreisetzung für die Referenzszenarien und die Alternativszenarien für den reinen Lösungspfad auf der Basis des im Abschnitt 7.2.2 /BMU 10a/ dargestellten vereinfachten Verfahrens zur radiologischen Langzeitaussage. Für die Bewertung gasförmig freigesetzter Radionuklide wurde ein zum Lösungstransport adäquates Verfahren entwickelt. Die diesem Verfahren zugrunde liegende Modellvorstellung ist, dass sich gemäß der Zweiphasen-Gleichgewichtsbedingungen Radionuklide sowohl in Lösung gehen als auch im Gasstrom verbleiben, mit diesem transportiert und ggf. den einschlusswirksamen Gebirgsbereich im gasförmigen Zustand verlassen. Für

die gasförmig freigesetzten Radionuklide wird, wie im Falle der löslichen Radionuklide, ein Indikator RGI (s. u.) aus dem jährlichen volatilen Radionuklidstrom F [Bq/a] über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. aufgrund der nachgewiesenen Integrität der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, hergeleitet. In Ermangelung einer Rechenvorschrift zur Bewertung gasförmig freigesetzter Radionuklide wurde für die vereinfachte radiologische Langzeitaussage im Vorhaben VSG ein Biosphärenmodell zur Berechnung der Strahlenexposition durch Inhalation volatiler Radionuklide verwendet. Das in dieser Analyse zur Bewertung der radiologischen Konsequenz gewählte Biosphärenmodell umfasst den Einstrom der über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs freigesetzten volatilen Radionuklide in ein Wohnhaus mit einer im Haus lebenden Person. Die Rechenvorschriften, die diesem Verfahren zugrunde liegen, werden ausführlich in /LAR 13/ vorgestellt.

Als Ergebnis der Analysen wurde ein Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI) berechnet, der durch das Nachweiskonzept des Vorhabens /MÖN 12/ vorgegeben wurde (vgl. Kap. 4.2.4.1). Der RGI beschreibt das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verhältnis zu den im Abschnitt 7.2.2 der Sicherheitsanforderungen aufgeführten dosisbezogenen Bewertungskriterien (0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen).

Bei der radiologischen Konsequenzenanalyse wurden die Einflüsse von Parameterunsicherheiten durch deterministische Unsicherheitsanalysen untersucht. Darüber hinaus wurden auch What-if-Betrachtungen für unwahrscheinliche Entwicklungen mit herangezogen, um die Robustheit des Endlagersystems, d. h. die Zuverlässigkeit und Qualität der Analyseergebnisse bzw. die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegen Störungen, zu prüfen. Aus den Ergebnissen von What-if-Betrachtungen wurden Optimierungsmöglichkeiten für die Steigerung der Robustheit des Einlagerungsvariante AB1 (Streckenlagerung) abgeleitet. Diese betreffen die Verlagerung der Behälter für die verpressten Brennelement-Strukturteile in ein von den Streckenverschlüssen weiter entferntes Einlagerungsfeld bzw. eine mögliche Ertüchtigung der Behälterintegrität hinsichtlich einer Gasdichtigkeit über mehrere hundert Jahre (vgl. Kap. 7.2.1).

Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass die Vorgaben des Abschnitts 7.2.2 /BMU 10a/ an die Nachweisführung im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse formal vollständig umgesetzt wurden. Auf die Umsetzung der inhaltlichen Forderungen des Abschnitts 7.2.2 im Sinne der radiologischen Langzeitaussage wird im Zusammenhang mit der Diskussion der Erfüllung der Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU zur radiologischen Langzeitaussage in Kapitel 6.2.3 eingegangen.

Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems gem. Abschnitt 7.2.3 /BMU 10a/

Im Vorhaben VSG wurde die langfristige Robustheit technischer Komponenten der Verschlussysteme (Funktionselemente) auf konzeptioneller Basis, d. h. auf der Grundlage theoretischer Auslegungskonzepte und Nachweisführungen, prognostiziert und dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse sind ausführlich in /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/ sowie zusammenfassend in den Kapiteln 5.1.4 (Konzeption) und 5.2.2.2 (Nachweisführung) dargestellt. Die wesentlichen Ergebnisse werden auch, soweit sie den sicheren Einschluss und dessen Dauerhaftigkeit betreffen, zusammenfassend in den nachfolgenden Kapiteln gewürdigt.

Sowohl das Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG als auch die entwickelten Verschlusskonzepte bauen auf einem langfristig sicheren Verschluss der technisch unvermeidbaren Durchörterungen der geologischen Barriere durch die Verfüllung von Hohlräumen mit Salzgrusversatz auf. Der Salzgrusversatz erreicht nach heutigem Kenntnisstand seine geforderte Dichtwirkung, die einer Kompaktion von $< 2\%$ zugeordnet wird, je nach Feuchtegehalt und Temperaturbedingungen in Zeiträumen von wenigen Zehner bis einigen tausend Jahren. Daher werden in den Verschlusskonzepten sofort wirksame technische Verschlussbauwerke in den Schächten und den Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbereichen vorgesehen, die den Zutritt von Lösungen aus dem Deck- und Nebengebirge in die Einlagerungsbereiche so lange unterbinden, bis der Salzgrusversatz seine geforderte Wirksamkeit entfaltet hat.

Bei der Planung der technischen Verschlussbauwerke wurde ein Funktionszeitraum von 50.000 Jahren angesetzt, der deutlich länger ist, als der Zeitraum, der aus heutiger Sicht für das Erreichen der vollständigen Einschlusswirksamkeit des Salzgrusversatzes erforderlich ist. Dementsprechend würde ein redundantes und von den Eigenschaften

der Dichtmaterialien her diversitäres Verschlusssystem über einen Zeitraum von einigen 10.000 Jahren vorliegen.

In Abschnitt 7.2.3 der Sicherheitsanforderungen wird gefordert, dass die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe insbesondere im Hinblick auf ihre Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit über den angesetzten Funktionszeitraum zu untersuchen sind. In /MÜL 12b/ werden diese Forderungen dadurch umgesetzt, dass folgende Einzelnachweise geführt wurden:

Die Nachweise eines über den Wirkzeitraum ausreichenden hydraulischen Widerstandes und der Filterstabilität: Diese Nachweise, dass die auslegungskonforme Funktionstüchtigkeit im Sinne der geforderten Dichtwirkung überhaupt erreicht werden kann, werden in /MÜL 12b/ ausführlich und in Kapitel 5.2.2.2 zusammenfassend dargelegt und begründet, dass der Nachweis eines ausreichenden hydraulischen Widerstandes als positiv geführt angesehen wird. Ein umfassender Nachweis der Filterstabilität wurde im Vorhaben VSG nicht vollständig geführt, da der erforderliche Planungstiefgang bezüglich der Korngrößenverteilungen der Filtermaterialien noch nicht gegeben war. Dennoch ist davon auszugehen, dass zukünftig geeignete Korngrößenabstufungen gewählt werden können und auch dieser, ingenieurtechnisch vergleichsweise einfach zu führende Nachweis zukünftig positiv geführt werden kann.

Die Nachweise zur Tragfähigkeit und zur Rissbeschränkung: Diese Nachweise zeigen, dass im Nachweiszeitraum auftretende maßgebliche Beanspruchungszustände im Sinne der Belastbarkeit der konzipierten Baustoffe auch unter Berücksichtigung von Erdbeben schadlos durch die Verschlussbauwerke abgetragen werden können. Aus den in /MÜL 12b/ ausführlich und in Kapitel 5.2.2.2 zusammenfassend dargelegten Gründen werden diese Nachweise als positiv geführt angesehen.

Der Nachweis der Langzeitstabilität/Dauerhaftigkeit: Dieser Nachweis weist aus, dass über den Nachweiszeitraum eine Alterungsbeständigkeit der Dichtelemente zum Beispiel bei der chemischen Einwirkung von Lösungen gegeben ist. Aus den in /MÜL 12b/ ausführlich und in Kapitel 5.2.2.2 zusammenfassend dargelegten Gründen wird dieser Nachweis als positiv geführt angesehen.

Aus diesen Gründen wird festgestellt, dass ausgehend davon, dass der Nachweis der Filterstabilität des Bentonit-Dichtelementes positiv geführt werden kann, die langfristi-

ge Robustheit der in den Verschlusskonzepten im Vorhaben VSG projektierten Dichtelemente auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert werden konnte. Aus den in /MÜL 12b/ ausführlich und in den Kapiteln 5.1.4 und 5.2.2.2 zusammenfassend dargelegten Gründen wird weiterhin davon ausgegangen, dass ausgehend von den Vorgaben der Szenarienentwicklung sämtliche Lastfälle, die die Integrität der Verschlussbauwerke betreffen, bei der Auslegung und der Nachweisführung in /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/ berücksichtigt wurden.

Im Hinblick auf die weiteren Vorgaben des Abschnitts 7.2.3 /BMU 10a/ ist in Verbindung mit der Forderung des Abschnitts 7.2 /BMU 10a/ zur qualitätsgesicherten Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren folgendes festzustellen:

- Da die technischen Barrieren gemäß dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG definitiv bedeutsame langzeitsicherheitsrelevante Sicherheitsfunktionen übernehmen und damit besonderen Anforderungen unterliegen, muss deren Herstellung, Errichtung und Funktion grundsätzlich erprobt sein und bei ihrer Errichtung eine nach Stand von Wissenschaft und Technik durchgeführte Qualitätssicherung (s. Abschnitt 7.2 /BMU 10a/) erfolgen.
- Aus dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG heraus ist nicht erkennbar, dass diese Erprobung gemäß Abschnitt 7.2.3 der Sicherheitsanforderungen entfallen kann, weil die Robustheit dieser Bauwerke, d. h. ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen, anderweitig nachgewiesen werden kann bzw. dass Sicherheitsreserven in einem Umfang bestehen, die den Verzicht auf eine Erprobung erlauben. Insofern bleibt die Nachweisforderung bezüglich der Realisierbarkeit unter Praxisbedingungen bestehen.
- Die Anforderungen in Abschnitt 7.2.3 /BMU 10a/ richten sich im Grundsatz an einen Antragsteller, der im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens die Eignung der von ihm konzipierten Verschlussysteme unter Praxisbedingungen nachzuweisen hat. Diesen Anspruch kann das Vorhaben VSG, welches eine erste, standortbezogene prototypische Sicherheitsanalyse darstellt, naturgemäß nicht erfüllen. Insofern wird festgestellt, dass es sich bei den beschriebenen Verfüll- und Verschlussmaßnahmen um Planungen handelt, die eine Weiterentwicklung von umfangreichen vorlaufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten darstellen. Der Detaillierungsgrad der Planungen wird dabei für die Zwecke einer vorläufigen Sicherheitsanalyse generell als ausreichend angesehen. Zum Teil gehen die beschriebenen Konzepte auch über das konzeptionelle Stadium hinaus, weil beispielsweise für die Strecken-

und Schachtverschlüsse auf fortgeschrittene Planungen und zum Teil auf erprobte Komponenten von Verschlussbauwerken in der Asse sowie im konventionellen Salzbergbau zurückgegriffen werden kann /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/. Bei der Vorbemessung der Abdichtbauwerke wird in /MÜL 12a/ auch auf Qualitätssicherungsmaßnahmen in Anlehnung an die in /CEN 09/ und /CEN 10/ geforderten Qualitätsanforderungen eingegangen.

- Die Durchführung von In-situ-Versuchen mit prototypischen Verschlussbauwerken zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der technischen Machbarkeit unter realen Bedingungen wird in Anbetracht der Komplexität der Bauwerke und Prozesse für erforderlich gehalten. Außerdem ergibt sich nach /MÜL 12b/ im Detail noch zu verschiedenen Aspekten Forschungs- und Entwicklungsbedarf, der in Kapitel 7.2.2 spezifiziert wird. Insgesamt bleibt aber festzustellen, dass aus heutiger Sicht, wenngleich der Nachweis der technischen Umsetzbarkeit der Verschlussmaßnahmen noch aussteht, keine Gründe erkennbar sind, die maßgebliche Zweifel an der technischen Umsetzbarkeit und der Funktionstüchtigkeit der im Vorhaben VSG konzipierten Verschlussmaßnahmen, die schnellwirksamen technischen Barrieren betreffend, hervorrufen.
- Für den Salzgrusversatz als langfristig die Durchörterung der geologischen Barriere abdichtendes Medium steht im Gegensatz zur Funktionstauglichkeit der (schnellwirkenden) Verschlussbauwerke auch auf konzeptioneller Basis noch der Nachweis aus, dass dieser tatsächlich innerhalb der oben erwähnten Zeiträume eine im Sinne des Sicherheitskonzepts des Vorhabens VSG ausreichende Barrierenwirksamkeit erreicht. Diesem Umstand ist die in Kapitel 6.1 dargestellte grundlegende Annahme Nr. 4 geschuldet.

Ausschluss von Kritikalität gem. Abschnitt 7.2.4 /BMU 10a/

Gemäß den Vorgaben des Abschnitts 7.2.4 /BMU 10a/ ist nachzuweisen, dass sich selbst erhaltende nukleare Kettenreaktionen unter Endlagerbedingungen in jedem Fall, d. h. sowohl bei wahrscheinlichen als auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems, ausgeschlossen sind. Als Indikator wurde im Nachweiskonzept des Vorhabens VSG (vgl. Kap. 4.2.3) für den Kritikalitätsausschluss der Multiplikationsfaktor k_{eff} vorgegeben, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltungsprozess entstehen. Eine Kritikalität wird im Nachweiskonzept des Vorhabens VSG bei einem Multiplikationsfaktor $k_{\text{eff}} < 0,95$ ausgeschlossen /MÖN 12/. Im Vorhaben VSG wurden Untersuchungen zur

Kritikalität von Endlagerbehältern der Typen POLLUX[®] und BSK-3 sowie (auf generischer Basis) für Transport- und Zwischenlagerbehälter durchgeführt, wobei Brennelementtypen und Spaltstoffgehalte zugrunde gelegt wurden, die für deutsche Anlagen als repräsentativ angesehen werden. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgte in einem Memorandum /KIL 12/ sowie zusammenfassend in /BOL 12/ und Kap. 5.2.4. Aus Konservativitätsgründen wurde bei den Kritikalitätsrechnungen frischer Brennstoff unterstellt, was rechnerisch zu einem um bis zu 0,25 höheren Wert des Multiplikationsfaktors gegenüber der Berücksichtigung des vollen Abbrands führt. Im Hinblick auf mögliche Langzeiteffekte wurden in den Kritikalitätsrechnungen ausgewählte Degradationsszenarien wie Flutung des Behälterinnenraums mit Wasser bzw. Salzlösung, Verlust des eingebauten Neutronenabsorbers oder Auflösung des Brennelementkorbes modelliert. Aus den Kritikalitätsrechnungen ergab sich kein Szenarium der Rekritikalität, für das Konsequenzenanalysen hätten durchgeführt werden müssen.

Im Ergebnis der durchgeführten Berechnungen zur Rekritikalität ist die Bildung einer sich selbst erhaltenden Kettenreaktion in einem Endlager im Steinsalz, d. h. in einem chloridbasierten System auf Basis des Nuklidinventars eines einzelnen Endlagerbehälters der Typen BSK-3, POLLUX[®]-10 sowie bei der direkten Endlagerung von Transport- und Zwischenlagerbehältern des Typs CASTOR[®] mit bestrahlten LWR-Brennstoffen, auszuschließen. Bei Abfällen aus Forschungs- und Prototypreaktoren könnte je nach Behältertyp und Brennstoffart, v. a. CASTOR[®] V/19 und CASTOR[®] MTR2, bei Annahme einer geeigneten Verfüllung von Behälterhohlräumen der Nachweis der Unterkritikalität nach derzeitigem Stand der Forschung ggf. auch ohne Berücksichtigung des Chlorids auf Basis von frischem Brennstoff geführt werden. Für einige höher angereicherte Brennstoffe aus Forschungs- und Prototypreaktoren kann – je nach Brennstoffart und explizitem Behälterkonzept – die Notwendigkeit einer Umkonditionierung der Brennstoffe nicht ausgeschlossen werden, um Unterkritikalität zu erreichen. Dies gilt insbesondere für die besonders reaktiven Brennstoffe der Reaktoren FRM-II und KNK-II. Der entsprechende Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurde in /BOL 12/ ausgewiesen.

Anforderungen an die numerische Analyse des Langzeitverhaltens gem. Abschnitt 7.3 /BMU 10a/

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurden Systemanalysen durchgeführt, namentlich Integritätsanalysen zur geologischen Barriere /KOC 12/, Auslegungsrechnungen zu den Verschlussbauwerken /MÜL 12a/, Rechnungen zur thermo-mechanischen Ausle-

gung der Endlagerkonzepte und Analysen zum Ausschluss der Kritikalität /BOL 12/ sowie die radiologische Konsequenzenanalyse /LAR 13/. Die Ergebnisse dieser Analysen werden in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.4 zusammenfassend beschrieben. Bei diesen Systemanalysen wurden zu den Referenzszenarien umfangreiche deterministische Rechnungen auf der Basis möglichst realitätsnaher Annahmen und Parameterbandbreiten durchgeführt. Insbesondere durch die Ergebnisse der Integritätsanalysen zur geologischen Barriere /KOC 12/ und der radiologischen Konsequenzenanalyse konnte ein umfangreiches Systemverständnis gewonnen werden, auf das im Hinblick auf die Qualität, Dauerhaftigkeit und Robustheit des Einschlussvermögens der konzipierten Endlagersysteme zusammenfassend in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen wird.

Analysen, die explizit auf die Mobilisierung solcher Radionuklide, die nicht mit dem Abfall eingebracht wurden (natürliche Radionuklide), oder chemo-toxischer Verbindungen abzielen, wurden im Vorhaben VSG nicht vorgenommen, da sich die Aufgabenstellung des Vorhabens VSG allein auf die Freisetzung und den Transport der in den Abfällen enthaltenen Radionuklide beschränkte. Aufgrund der Ergebnisse der Konsequenzenanalyse, nach denen aufgrund des geringen Lösungsangebotes in Abfallnähe keine Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich stattfindet, ist es aufgrund des Fehlens eines durchgängigen Lösungspfades unwahrscheinlich, dass natürliche Radionuklide oder umweltrelevante nicht-radioaktive Schadstoffe in gelöster Form aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden können.

Rechnungen zur Ableitung von Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems und zur Optimierung der konzipierten Endlagersysteme fanden vor allem im Rahmen der thermischen Auslegung der Endlagerkonzepte sowie der Verschlussbauwerke hinsichtlich der optimalen Lage, Materialwahl und Abmessungen der Funktionselemente (Dicht- und Filterelemente sowie Widerlager) statt. Weiterhin konnten durch die Auswertung von What-if-Rechenfällen bei der radiologischen Konsequenzenanalyse Empfehlungen zur Optimierung der Robustheit des Streckenlagerungskonzepts im Hinblick auf den Einlagerungsort von Behältern mit verpressten Brennelement-Strukturteilen abgeleitet werden. Im Hinblick auf die eingeschränkten Möglichkeiten zur Optimierung im Rahmen des Vorhabens VSG wird auf die Anmerkungen zu Abschnitt 5.1 der Sicherheitsanforderung in Kapitel 6.2.1 verwiesen.

Im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse wurden umfangreiche Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen auf deterministischer Basis durchgeführt. Durch

die Untersuchung des Einflusses der Parameter- und Datenungleichheiten auf die Analyseergebnisse konnten die für den Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche sensitiven Parameter ermittelt werden, auf die im Zusammenhang mit der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage (s. Kap. 6.2.3.3) eingegangen wird.

Die für den Lösungstransport wesentlichen Parameter und Daten wurden in Bandbreiten variiert, die den wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der zu berücksichtigenden FEP entsprachen. Ihr Einfluss auf den Lösungstransport wurde ermittelt. Die Analyseergebnisse wiesen allesamt rechnerische Freisetzungen von Radionukliden aus, die praktisch gleich Null zu setzen sind (Kap. 6.2.3.3). Es wurden keine Parameterkombinationen erkannt, die ein grundlegend anderes Systemverhalten hätten erkennen lassen. Dies kann damit begründet werden, dass die den Lösungszutritt verhindernden Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse über den Zeitraum, der zum Volllaufen des Infrastrukturbereichs mit Lösung benötigt wird, voneinander entkoppelte Systeme darstellen. In dieser Zeit hat der Versatz aufgrund seiner Kompaktion eine ausreichende Dichtwirkung erreicht, so dass er die Dichtfunktion der Verschlüsse übernehmen kann. Ein gleichzeitiges Versagen der Verschlussysteme muss nicht unterstellt werden. Jedes Verschlussbauwerk (Schachtverschluss, Streckenverschluss) ist so bemessen, dass ein Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche während der Volllaufzeit des Infrastrukturbereichs nicht zu besorgen ist und die rechnerische Freisetzung von Radionukliden hieraus praktisch Null ist. Dabei wurden in den deterministischen Unsicherheitsanalysen die die Verschlussbauwerke charakterisierenden Parameter in ihren Bandbreiten variiert. Aus den Analyseergebnissen konnte aufgrund der entkoppelten Systeme Schacht- Streckenverschlüsse gefolgert werden, dass weitere probabilistische Unsicherheitsanalysen in der Bandbreite der vorgenommenen Parametervariationen für das Endlagermodell keine zusätzlichen Erkenntnisse liefern würden.

Für eine Freisetzung von gasförmigen Radionukliden aus den Abfällen in der frühen Nachverschlussphase konnte sowohl für das Referenzszenarium als auch für die Alternativszenarien der vereinfachte Nachweis nur dann geführt werden, wenn für die endgelagerten (verpressten) Strukturteile eine Einlagerung in technisch gasdichten Behältern unterstellt wird. Andernfalls wird die Bemessungsgröße RGI in der frühen Nachverschlussphase in allen Rechenfällen überschritten. Als sensitive Parameter und Prozesse, zu denen gleichzeitig signifikante Ungewissheiten bestehen, wurden identifiziert:

- die Restfeuchtemengen in den Abfallbehältern,
- der zeitliche Ablauf der Korrosionsprozesse sowie
- die Mobilisierungsmechanismen der instant release fraction (IRF) aus den Brennelement-Strukturteilen.

Aufgrund der Ungewissheiten zu diesen Aspekten wird die Durchführung von probabilistischen Unsicherheitsanalysen erst dann für zielführend gehalten, wenn sich die im Vorhaben VSG vorhandenen Unkenntnisse über die ablaufenden Prozesse durch zukünftige Forschungsergebnisse soweit reduzieren lassen, dass realitätsnahe Parameterbandbreiten vorliegen, da andernfalls die probabilistischen Rechenergebnisse den Charakter der Beliebigkeit aufweisen.

Modellungsgewissheiten wurde im Vorhaben VSG bei den Integritätsanalysen und der radiologischen Konsequenzenanalyse durch den Einsatz diversitärer Rechenprogramme und –modelle sowie durch Qualifizierungsmaßnahmen /KOC 13/ begegnet. Für die radiologische Konsequenzenanalyse wurde für den Lösungspfad ein der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage nach /BMU 10a/ zugrunde liegendes Expositionsmodell und für die Analyse der radiologischen Konsequenzen bei der Radionuklidfreisetzung über den Gaspfad ein zum Lösungstransport adäquates Verfahren entwickelt.

Anforderungen an die Qualität der Standortdaten gem. Abschnitt 7.7 /BMU 10a/

Aus den im Zusammenhang mit der Sicherheitsanforderung, Abschnitt 7.2, unter dem Aspekt b) genannten Gründen wird davon ausgegangen, dass Qualität und Umfang der Standortdaten, trotz der Tatsache, dass diese im Wesentlichen in den 1990er Jahren unter Nutzung von Erkundungsmethoden, die inzwischen weiterentwickelt wurden, für die Zwecke einer ersten, prototypischen Sicherheitsanalyse ausreichen. Von daher lagen für die Sicherheitsanalyse Standortdaten in ausreichendem Umfang und ausreichender Qualität vor, wobei im Hinblick auf die untertägige Teilerkundung auf die in Kapitel 6.1 aufgeführten grundlegenden Annahmen verwiesen wird. Weitergehende Forderungen des Abschnittes 7.7 /BMU 10a/ zielen auf Maßgaben, die im Rahmen von Genehmigungsverfahren umzusetzen sind ab, die angesichts der Aufgabenstellung des Vorhabens VSG hier nicht relevant sind.

Untersuchung nicht-radiologischer Umwelteinflüsse gem. Abschnitt 7.9 /BMU 10a/

Gemäß dieser Vorgabe ist zu untersuchen,

1. ob im Endlagersystem natürlich auftretende radioaktive, grundwasser- oder bodenrelevante Stoffe infolge der Maßnahme der Endlagerung, z. B. wegen veränderter geochemischer Bedingungen mobilisiert werden können, bzw.
2. inwieweit die hydrogeologische Situation im Deckgebirge aufgrund der Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle in sicherheitsrelevantem Umfang verändert werden kann.

Da sich die Aufgabenstellung des Vorhabens VSG allein auf die Freisetzung und den Transport der aus den Abfällen stammenden Radionuklide beschränkte, wurde der Aspekt a) nicht explizit untersucht. Aus den im Zusammenhang mit der Sicherheitsanforderung S 7.3 genannten Gründen ist es nach den im Rahmen der radiologischen Konsequenzenanalyse erzielten Ergebnissen unwahrscheinlich, dass natürliche Radionuklide oder umweltrelevante nicht-radioaktive Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in gelöster Form freigesetzt werden können.

Im Zuge der thermischen Auslegung der Endlagerkonzepte (Varianten B1 und C) wurden auch die Temperaturerhöhungen, die aus der Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle resultieren, für den Bereich des Salzspiegels bestimmt. Als Auswertepunkt für den Salzspiegel wurde der Punkt ausgewählt, der rechnerisch das höchste Temperaturniveau erreicht. Bei einer Ausgangstemperatur von ca. 24,6 °C errechnete sich im Fall der Streckenlagerung eine maximale Erwärmung am Salzspiegel von 9 K auf ca. 33,5 °C und im Fall der Bohrlochlagerung um 8 K auf ca. 32,5 °C (Abb. 6.1). Im Rahmen der Integritätsanalysen wurde für das Streckenlagerungskonzept (Variante B1) eine maximale Temperaturerhöhung am Salzspiegel von 6 K /KOC 12/ errechnet.

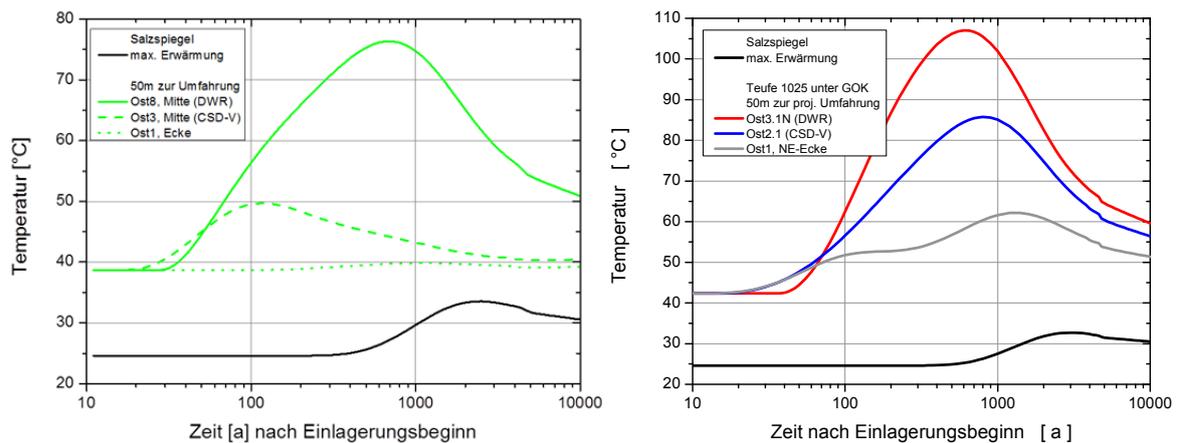


Abb. 6.1 Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Abstand von 50 m zur Umfahung und am Salzspiegel für das Streckenlagerungskonzept (links) und das Bohrlochlagerungskonzept (rechts), aus /BOL 12/

Infolge dieser Temperaturerhöhungen ist es aus hydraulischen Gründen nicht auszuschließen, dass sich oberhalb des Salzspiegels thermo-induzierte Konvektionsströmungen ausbilden. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Effekte auf den salzspiegelnahen Bereich beschränken; eine Beeinflussung des gesamten hydrogeologischen Deckgebirges ist aufgrund der begrenzten Temperaturerhöhungen jedoch unwahrscheinlich. Eine genaue Klärung der Auswirkungen kann jedoch nur mit Hilfe einer Grundwasserströmungsmodellierung für das Deckgebirge erfolgen. Da im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG dem Deckgebirge keine rückhaltenden oder konzentrationsmindernden Sicherheitsfunktionen zugeschrieben wurden, wurde keine Modellierung der hydrogeologischen Situation im Deckgebirge vorgenommen.

Bezüglich wasserrechtlicher Aspekte ist anzumerken, dass keine bundes- oder europaweiten allgemeingültigen Grenzkriterien für einen maximal zulässigen Wärmeeintrag in das Grundwasser existieren. Diese werden zum Beispiel im Fall der Zulassung von grundwassergespeisten Kühlanlagen auf kommunaler Ebene, d. h. durch die unteren Wasserbehörden, für den Einzelfall unter Berücksichtigung der lokalen hydrogeologischen Verhältnisse und der jeweiligen Grundwassernutzungssituation festgelegt. Aus den oben genannten Gründen kann auf der Basis der Ergebnisse des Vorhabens VSG keine Aussage zur Erfüllung der Vorgaben des Abschnitts 7.9 /BMU 10a/ gemacht werden. Generell wird eine Präzisierung der mit Abschnitt 7.9 verbundenen Forderungen von regulatorischer Seite, insbesondere was die maximal zulässige Erwärmung von Grundwasservorkommen anbetrifft, für erforderlich gehalten.

Fazit:

Aus den im vorangegangenen dargelegten Gründen wird davon ausgegangen, dass die Anforderungen an die langzeitsicherheitsgerichteten Nachweise, soweit diese den dauerhaften Einschluss der aus den Abfällen stammenden Radionuklide betreffen, auf konzeptioneller Basis umgesetzt wurden. Ergänzend ist folgendes anzumerken:

Nicht explizit untersucht wurde die Mobilisierung natürlicher Radionuklide und sonstiger Schadstoffe, da dieser Aspekt nicht im Fokus der Aufgabenstellung des Vorhabens VSG lag. Angesichts der Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse ist es jedoch unwahrscheinlich, dass diese Stoffe in gelöster Form aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden.

Die Einhaltung des radiologischen Bewertungskriteriums RGI kann nach heutigem Stand der Kenntnisse und der im Vorhaben VSG durchgeführten Modellierung im Fall der Freisetzung von Radionukliden aus Behältern für Brennelement-Strukturteile erst dann geführt werden, wenn

- eine technische Gasdichtigkeit der Behälter über einige hundert Jahre unterstellt werden kann und /oder
- aufgrund von zuverlässigen Daten ggf. in Verbindung mit entsprechenden Konditionierungsmaßnahmen deutlich geringere Restfeuchtegehalte in den Abfallbinden angesetzt werden können und/oder
- sich die bei der modellhaften Beschreibung der Mobilisierungsmechanismen der IRF in den Brennelement-Strukturteilen notwendigerweise angesetzten Konservativitäten durch zukünftige Forschungsergebnisse wirkungsvoll reduzieren lassen.

Es besteht kein Zweifel, dass der noch ausstehende Nachweis zur Filterstabilität der Bentonit-Dichtelemente in den Schachtverschlüssen zukünftig geführt werden kann.

Die zusammenfassenden Aussagen am Ende des Kapitels 6.2.1 zum Forschungs- und Entwicklungsbedarf bei den im Vorhaben VSG projektierten Verschlusskonzepten und zum langfristigen Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz gelten hier gleichermaßen, ebenso wie die Einschränkungen zur Durchführung von Optimierungsmaßnahmen im Vorhaben VSG.

Die Datenlage zu den geologischen Verhältnissen am Standort wird für die Zwecke einer prototypischen Sicherheitsanalyse generell als ausreichend angesehen, auch wenn sich bei einigen, vor Beginn des Moratoriums eingesetzten Erkundungsmethoden der Stand von Wissenschaft und Technik bis heute weiterentwickelt hat. Im Hinblick auf die Konsequenz der untertägigen Teilerkundung wird auf die Vorbehalte Nr. 1. – 3. in Kapitel 6.1 hingewiesen.

6.2.3 Anforderungen an Qualität, Dauerhaftigkeit und Robustheit des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Vorgaben der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, die den sicheren und nachsorgefreien Einschluss der Radionuklide betreffen, sind in Tab. 6.3 aufgelistet. In diesem Kapitel wird die konzeptionelle Erfüllung der in Tab. 6.3 genannten Forderungen diskutiert bzw. die Einhaltung vorgegebener Kriterien überprüft. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und zur Vermeidung von Wiederholungen erfolgt dies summarisch entlang des im Vorhaben VSG entwickelten Systems gestaffelter Barrieren im Hinblick auf die Aspekte Einschlussqualität und -dauerhaftigkeit sowie Robustheit. Als Robustheit werden nach /BMU 10a/ die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet.

Tab. 6.3 Vorgaben zum sicheren und nachsorgefreien Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, nach /BMU 10a/

Abschnitt /BMU 10a/ ¹⁾	Anforderung	Anmerkung
SP 4.1	Konzentration/Einschluss im einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Globalanforderung
SP 4.2	Geringfügigkeit der Radionuklid-Freisetzungen	Globalanforderung
SP 4.6	Nachsorgefreiheit	
S 6.1	Anforderungen an die Einschlusseigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	i.S. der Vorgaben SP 4.1 und SP.4.2 (Einschluss/Geringfügigkeit der Freisetzungen)
S 6.2	Bewertungskriterien wahrscheinliche Entwicklungen	Dosisorientiertes Bewertungskriterium
S 6.3	Bewertungskriterien weniger wahrscheinliche Entwicklungen	Dosisorientiertes Bewertungskriterium
S 6.4	unwahrscheinliche Entwicklungen	Optimierungsprüfung
S 7.2.1	Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	i.S. des Erhalts des Einschlussvermögens über den Nachweiszeitraum
S 7.2.2	Radiologische Langzeitaussage	ggf. vereinfachte radiologische Langzeitaussage
S 7.2.3	Nachweis der Robustheit geotechnischer Komponenten	i.S. des Einschlussvermögens und dessen Dauerhaftigkeit
S 7.2.4	Nachweis des Kritikalitätsausschlusses	i.S. des Erhalts des Einschlussvermögens über den Nachweiszeitraum
S 8.2	Minimierung der Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, gebirgsschonendes Auffahren	i.S. der Schonung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
S 8.3	Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Abstand zu Störungen	
S 8.5	Gliederung in Einlagerungsbereiche, zügige Beladung, Verfüllung und Verschluss	i.S. der Schonung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
S 8.7	Multibarrierensystem	i.S. des Einschlussvermögens

¹⁾ SP: Sicherheitsprinzipien (Abschn. 4 /BMU 10a/); S: Sicherheitsanforderung (Abschn. 5 ff. /BMU 10a/)

6.2.3.1 Einschlussqualität des Multibarrierensystems

a) Einschlusswirkung der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs:

Die Einschlussqualität der geologischen Barriere wird durch die Eigenschaften des Hauptsalzes (z2HS) im Kernbereich der Salzstruktur, die Einlagerungsbereiche mit einer Mächtigkeit von einigen Zehner Metern umgebend, charakterisiert. Nach den Ergebnissen der bisherigen Erkundung weist das Hauptsalz in der Umgebung der konzipierten Endlagerbergwerke folgende einschlusswirksame Merkmale auf:

- Aus den in /WEB 13/ dargestellten bisherigen Erkundungsergebnissen und geomechanischen Überlegungen, die im Ergebnis in Kapitel 5.1.3 zusammengefasst sind, wird das Auftreten von hydraulisch wirksamen Kluftvorkommen, Störungen oder Lösungseinschlüssen mit Volumina im Kubikmeterbereich als unwahrscheinlich angesehen. Dass einzelne Klüfte im Übergangsbereich des Hauptsalzes zu den Gesteinen der Leine-Serie wenige Meter in das Hauptsalz hineinreichen können, wurde bei der Bemessung des Sicherheitsabstandes berücksichtigt.
- Aufgrund der Abwesenheit von potenziellen Wasserwegsamkeiten sowie makroskopischen Lösungs- und Gasvorkommen und eines hohen Rekristallisationsgrads im Kernbereich der Salzstruktur kann von sehr geringen Permeabilitäten des Hauptsalzes in der Größenordnung von 10^{-21} m² für die geologische Barriere in der Umgebung der konzipierten Endlagerbergwerke ausgegangen werden, womit praktisch eine Dichtheit gegenüber Gasen und Lösungen gegeben ist.
- Das Hauptsalz weist mit Konvergenzraten von bis zu 7 mm/(m·a) günstige Kriech-eigenschaften auf, die zu einem schnellen Hohlraumverschluss führen.
- Die Volumina der vorwiegend im Bereich des Knäuelsalzes auftretenden, fein dispers verteilten Kohlenwasserstoffe sind zu gering, als dass nach dem im Vorhaben VSG gewonnenen Kenntnisstand von einer Beeinträchtigung der Barrierenwirkung des Hauptsalzes durch hydromechanische Prozesse ausgegangen werden müsste. Diese Aussage ist jedoch noch durch entsprechende Laborversuche zum geomechanischen und geochemischen Einfluss der Kohlenwasserstoffe endgültig zu belegen.

Bezüglich des Abstandes der Einlagerungsbereiche zu geologischen Störungen kann aus heutiger Sicht auch die Forderung in Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen als erfüllbar angesehen werden. Aufgrund der nicht abgeschlossenen untertägigen

Erkundung stehen diese Aussagen unter den in Kapitel 6.1 unter Nr. 1. – 3. aufgeführten Vorbehalten, insbesondere was die Übertragbarkeit der bisher im Erkundungsbereich EB1 erzielten Ergebnisse auf die gesamten für die Realisierung der konzipierten Endlagerkonzepte erforderlichen Hauptsalzvolumina angeht.

Da der geologischen Barriere aus heutiger Sicht eine im Sinne der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ hohe Einschlussqualität zugeschrieben werden kann und überdies durch die Integritätsanalysen auch der dauerhafte Erhalt dieser Eigenschaften belegt werden konnte (s. u.), konzentrierte sich die im Vorhaben VSG durchgeführte radiologische Konsequenzenanalyse auf die Einschlussqualität der technischen Verschlusssysteme.

b) Einschlussqualität des technischen Verschlusssystems (schnellwirkende Verschlussbauwerke, Infrastrukturbereich und Salzgrusversatz)

Die Ausgestaltung des im Vorhaben VSG konzipierten Verschlusssystems wird einschließlich der entsprechenden ingenieurtechnischen Nachweise für die schnellwirkenden Verschlussbauwerke ausführlich in /MÜL 12a/ und /MÜL 12b/ und zusammenfassend in Kapitel 5.1.4 bzw. Kapitel 5.2.2.2 beschrieben. Die Einschlusswirksamkeit dieses technischen Verschlusssystems gründet auf den vier unten genannten Komponenten, die hintereinander gestaffelt einen Zutritt externer Lösungen zu den Einlagerungsbereichen verhindern sollen. Ein weiteres Auslegungsziel war die Minimierung radiologischer Konsequenzen einer potenziellen Freisetzung gelöster Radionuklide aus den Einlagerungsbereichen über das Deckgebirge in die Biosphäre. Letztere Sicherheitsfunktion, die zum Beispiel durch die Konzeption der Langzeitdichtung im Schachtverschluss (vgl. Kap. 5.1.4.4) realisiert wurde, wurde aufgrund der Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse nicht beansprucht, da bei keinem Szenarium ein Auspressen von Lösungen über den Infrastrukturbereich von unten in die Schachtverschlüsse innerhalb deren Funktionszeitraums errechnet wurde.

Es bestehen folgende sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an die einzelnen Komponenten des technischen Verschlusssystems:

- Die Schacht- und Streckenverschlüsse haben sicherheitskonzeptionell die Aufgabe, als schnellwirksame Verschlusskomponenten den Zutritt von Deckgebirgs- und Nebengebirgslösungen so lange von Richtstrecken und Einlagerungsbereichen fernzuhalten, bis eine ausreichende Dichtwirkung des Salzgrusversatzes unterstellt werden kann (vgl. Kap. 4.1.1).

- Der mit Schotter verfüllte Infrastrukturbereich dient in Unterstützung der sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an die Verschlussysteme als druckbrechendes Speicherglied, das den Lösungszutritt über die Streckenabdichtungen verzögert. Hierdurch wird im Sinne einer zusätzlichen Robustheitssteigerung des Verschlussystems ein Zeitgewinn realisiert, der auch im Fall des nicht auslegungskonformen hydraulischen Verhaltens des Schachtverschlussystems sicherstellen soll, dass Lösungszutritte so lange von den Einlagerungsbereichen ferngehalten werden, bis eine ausreichende Dichtwirkung des Salzgrusversatzes unterstellt werden kann.
- Der Salzgrusversatz soll nach weitgehender Kompaktion eine Dichtwirkung annehmen, die im Verbund mit der geologischen Barriere den dauerhaften Einschluss der Radionuklide bewirkt. Er ersetzt langfristig damit die schnellwirkenden technischen Abdichtbauwerke.

Der Beitrag der technischen Verschlussysteme zur Einschlusswirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs lässt sich zusammenfassend auf der Basis der Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse folgendermaßen charakterisieren:

- Erst nach der vollständigen Auffüllung des Porenraums des Infrastrukturbereiches mit Lösungen aus dem Deckgebirge steht durch die durchgehende hydraulische Anbindung an das Deckgebirge an den Streckenverschlüssen ein hydrostatischer Fluiddruck an. Erst dann könnten entsprechende Lösungsmengen über die Streckenverschlüsse in die Richtstrecken transportieren werden. Der früheste Zeitpunkt einer solchen hydraulischen Anbindung an das Deckgebirge wird im Alternativszenarium Schachtverschlussversagen (Erhöhung der Permeabilität der Dichtelemente beider Schächte integral auf $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$) gemäß den in /LAR 13/ dokumentierten Rechenergebnissen mit 1100 Jahren errechnet. Auch bei Annahme des unwahrscheinlichen Szenariums, bei der ein instantanes Versagen der Dichtelemente in beiden Schächten mit einer angesichts ihrer technischen Auslegung unrealistisch erhöhten Permeabilität von $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ in einem What-if-Rechenfall unterstellt wird, beträgt die Auffüllzeit für den Infrastrukturbereich 170 Jahre und führt bei schneller Kompaktion zu keinem erhöhten Lösungszutritt aus dem Infrastrukturbereich zu den wärmeentwickelnden Abfällen.
- Der angefeuchtete Salzgrusversatz in den an die Streckenverschlüsse angrenzenden Richtstrecken benötigt selbst unter der ungünstigen Annahme einer „langsa-

men“ Kompaktionsgeschwindigkeit und unter Vernachlässigung des kompaktionsbegünstigenden Wärmeeintrages (Rechenfall PV-R1 zum Referenzszenarium und PV-A1 zum Alternativszenarium Schachtverschlussversagen) maximal 610 Jahre, um bis zu einer Restporosität von 1 % zu kompaktieren. Da nach heutigem Kenntnisstand /POP 12/ bei dieser geringen Porosität keine zusammenhängenden Porenräume mehr zu unterstellen sind, findet kein lösungstragender Radionuklidtransport mehr statt. Somit werden auch keine Radionuklide über den Lösungspfad freigesetzt.

- Im Fall des Referenzszenariums, welches die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems und die wahrscheinlichen Parameterausprägungen charakterisiert (Rechenfall R1), stellt sich das robuste Zusammenspiel zwischen technischen Verschlussbauwerken und Salzgrusversatz noch deutlicher dar. So kann das Schachtverschlussystem bei Annahme einer auslegungskonformen Funktion einen Zulauf von Lösung über die Streckenverschlüsse bis zum Ende des Funktionszeitraums von 50.000 Jahren nahezu vollständig unterbinden. Da danach keine Anforderungen mehr an den Schachtverschluss gestellt werden, wurde in den Modellrechnungen ab diesem Zeitpunkt durch eine Permeabilitätserhöhung der Funktionselemente jeweils um den Faktor 1.000 ein Schachtverschlussversagen unterstellt. Im Ergebnis bedarf es hiernach weiterer 1.000 Jahre, bis der Infrastrukturbereich vollständig lösungserfüllt ist und der hydraulische Druckaufbau an den Streckenverschlüssen beginnt.
- Zu diesem Zeitpunkt (d. h. nach der Funktionszeit der Verschlüsse) hat nach den Rechenergebnissen der Salzgrusversatz in den versetzten Strecken bereits seine Dichtwirkung angenommen. In den Querschlägen und den Einlagerungsstrecken des Ostflügels mit wärmeentwickelnden Abfällen (Kompaktionsansatz für die Salzgruseigenschaften „trocken, heiß“) wird eine Restporosität von 1 % bereits nach ca. 100 Jahren erreicht. Im künstlich angefeuchteten Versatz der Richtstrecken Nord und Süd, die direkt an wärmeentwickelnde Einlagerungsstrecken (Kompaktionsansatz „feucht, warm“) angrenzen, wird diese Restporosität nach ca. 160 Jahren, in den Richtstrecken, die keiner oder nur sehr geringer Wärmezufuhr ausgesetzt sind (Kompaktionsansatz „feucht, kalt“,) nach ca. 250 Jahren erreicht. Im Bereich der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle (Kompaktionsansatz „trocken, kalt“), ist der Salzgrusversatz nach ca. 615 Jahren bis zur Restporosität kompaktiert.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die in Abschnitt 8.7 in /BMU 10a/ gestellten Anforderungen festgestellt werden (unter dem Vorbehalt, dass sich die in Kapitel 6.1 ge-

nannte vierte grundlegende Annahme zum Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes zukünftig als zutreffend erweist und dass die Nachweise für die Verschlussbauwerke komplett geführt werden können), dass

- das Einschlussvermögen der konzipierten Endlagersysteme auf verschiedenen gestaffelten (diversitären) Barrieren beruht, die unterschiedliche Sicherheitsfunktionen aufweisen. Diese sind einerseits der Einschluss der Radionuklide durch hohen hydraulischen Widerstand der Dichtelemente in den Verschlussbauwerken, des Steinsalzes der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und (nach weitgehendem Abschluss der Kompaktion) des Salzgrusversatzes und andererseits die Lösungszutrittsverzögerung durch den Infrastrukturbereich,
- aufgrund der Salzgruskompaktion eine ausreichende Dichtwirkung des Versatzes immer im Funktionszeitraum der Verschlussbauwerke erreicht wird. Diese Wirkung ist bei allen untersuchten Szenarien gegeben, wobei die Überschneidung der Wirkzeiträume mehr oder weniger ausgeprägt ist. Die zeitlichen Überlappungen im Zusammenwirken der Verschlusskomponenten führen dazu, dass diese zeitweise in Bezug auf die Einschlusswirkung redundant und bezüglich ihrer Materialien diversitär wirken;
- das Barrierensystem so robust konzipiert ist, dass es seine Funktionstüchtigkeit auch dann beibehält, wenn einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten (Schachtverschlussversagen, Streckenverschlussversagen);
- das Barrierensystem passiv und wartungsfrei konzipiert ist, wodurch in Übereinstimmung mit dem in Abschnitt 4.6 in /BMU 10a/ festgelegten Sicherheitsprinzip nach Verschluss des Endlagers keine Eingriffe oder Maßnahmen zur Gewährleistung des Einschlussvermögens des Barrierensystems erforderlich sind.

Das oben skizzierte Systemverhalten wurde in den Rechnungen auf der Grundlage der Einlagerungsvariante AB1 (Streckenlagerung) ermittelt. Es kann aber hinsichtlich seiner Einschlusswirkung durch Analogieschlüsse auch auf die anderen Einlagerungsvarianten (AB2: Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern sowie AC (Bohrlochlagerung) übertragen werden. Hintergrund hierfür ist, dass die geometrische Anordnung des Systems Schachtverschlüsse ▶ Infrastrukturbereich ▶ Streckenverschlüsse ▶ angrenzende Salzgrusversetzte Richtstrecken für alle drei Einlagerungsvarianten identisch konzipiert wurde.

6.2.3.2 Erhalt der Einschlusswirksamkeit des Multibarrierensystems (Dauerhaftigkeit)

Die einzelnen Komponenten des konzipierten Barrierensystems unterliegen in ihren jeweiligen Wirkzeiträumen einer Reihe von Einwirkungen, die sowohl aus natürlichen Ereignissen und Prozessen resultieren, die auch ohne die Existenz eines Endlagers am Standort ablaufen würden, als auch solchen, die mit der Einlagerung der radioaktiven Abfälle ursächlich verbunden sind.

1. Natürliche Prozesse:

Es ist davon auszugehen, dass zukünftig natürliche Prozesse und Ereignisse auf das Endlagersystem einwirken, die im Grundsatz das Potenzial haben, den einschlusswirksamen Gebirgsbereich in seiner Einschlusswirksamkeit zu beeinträchtigen. Hierzu gehören zum einen folgende natürliche Vorgänge, die nicht primär klimainduziert sind:

- **Hebung/Senkung:** Für den Standort Gorleben wurden für den Zeitraum nach dem Oligozän mittlere Senkungsraten von 0,01 mm/a ermittelt /MRU 11/ (s. a. Anhang A.4). Dies entspricht einer Gesamtabenkung von 10 m im gesamten Nachweiszeitraum. Aufgrund der Subsidenz des norddeutschen Raumes ist eine langfristige erosive Freilegung des Einlagerungshorizonts auszuschließen. Umgekehrt sind die Senkungsraten so gering, dass eine Ablagerung mächtiger Sedimentschichten, die aufgrund der Auflast zu einer Reaktivierung salztektonischer Prozesse führen könnte, ebenfalls auszuschließen ist.
- **Neotektonische Vorgänge:** Aufgrund der plattentektonischen Lage Norddeutschlands ist nach /MRU 11/ für den Nachweiszeitraum nicht mit einer Änderung des heutigen tektonischen Spannungsbildes und hieraus ggf. resultierenden endogenen Prozessen wie z. B. Magmatismus, Grabenbildung oder Gesteinsmetamorphose zu rechnen.
- **Erdbeben:** Nach der seismischen Prognose wurde für den Standort Gorleben ein Bemessungserdbeben mit einer Intensität von 7,3 (MSK) zugrunde gelegt, welches als Basis für die Auslegung der Verschlussbauwerke, insbesondere für die Prognose der Setzung von Filterschichten und Schottersäulen der Schachtverschlussbauwerke, diente /MÜL 12a/, /MÜL 12b/. Die Auswirkung des Bemessungserdbebens wurde ebenfalls bei den Integritätsanalysen zur geologischen Barriere untersucht. Im Ergebnis der hydromechanischen Berechnungen zeigte sich, dass selbst dann,

wenn der Eintrittszeitpunkt des Erdbebens mit dem Zeitpunkt der maximalen Dilatanzbeanspruchung der Salzstruktur infolge der Zerfallswärme (30 Jahre nach Endlagerverschluss) zusammenfällt, die zusätzlichen dilatanten Bereiche nur bis maximal 30 m Tiefe unterhalb des Salzspiegels reichen. Eine seismische Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in einer Tiefe von über 800 m ist dagegen nicht zu erwarten.

- **Diapirismus und Halokinese:** Im Rahmen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose wurden – obwohl zukünftig mit einer weiteren Abschwächung des Diapirismus zu rechnen ist – die für den Zeitraum seit Miozän ermittelten durchschnittlichen Aufstiegsraten von 0,07 mm/a (für eine Tiefe von 800 – 900 m) bzw. 0,02 mm/a (salzspiegelnah) in /MRU 11/ angesetzt. Dies bedeutet, dass innerhalb des Nachweiszeitraums eine Anhebung des Einlagerungshorizonts von maximal 70 m erfolgen könnte. Aufgrund der Tiefenlage der Einlagerungsbereiche kann eine Erosion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen werden.
- **Subrosion:** In /MRU 11/ werden zukünftige Ablaugungsraten von 0,05 bis 0,1 mm/a angesetzt. Hierbei wurden kaltzeitliche Einwirkungen und Auswirkungen der Tiefenlage des Salzspiegels mit berücksichtigt. Bezogen auf den gesamten Nachweiszeitraum bedeutet dies, dass maximal 100 m Salzgestein unterhalb des heutigen Salzspiegels abgelaugt werden können. Eine Beeinträchtigung des über 800 m tief gelegenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Subrosion ist damit auszuschließen. Gleiches gilt für das im Vorhaben VSG betrachtete Alternativszenarium A1i9, bei dem eine Verdopplung der Subrosionstiefe auf insgesamt 200 m unterstellt wurde (Abb. 6.2).
- **Erosion:** Aufgrund der tektonischen Ruhe, des weitgehend ausgeglichenen Reliefs sowie der langfristigen Subsidenz der norddeutschen Tiefebene sind zukünftig keine nennenswerten nicht-glazigenen Erosionsraten zu erwarten. Eine Freilegung oder sonstige Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch flächenhafte oder lineare (fluviatile) Erosion ist daher nicht zu erwarten.
- **Korrosiver Angriff von Lösungen und mechanische Einwirkungen auf die Schachtabdichtbauwerke:** Das Schachtverschlussystem wurde durch die Materialwahl sowie durch die Abmessungen und Anordnung der Dichtelemente aus den in Kapitel 5.1.4.4 genannten Gründen robust gegenüber einem korrosiven Angriff durch Lösungen ausgelegt. Dabei wurden sämtliche Lösungszusammensetzungen berücksichtigt, die aus hydrochemischer Sicht mit den Verschlussbauwerken in

Kontakt kommen können. Entsprechendes gilt für die mechanischen Einwirkungen, die während des Funktionszeitraums zu erwarten sind (Kap. 5.2.2.2). Daher ist ein integrales Versagen aller Dichtelemente und damit des gesamten Schachtverschlussystems innerhalb des Funktionszeitraumes als unwahrscheinlich anzusehen. Dennoch wurde dieser Fall als Alternativszenarium bei den Modellrechnungen innerhalb der radiologischen Konsequenzenanalyse untersucht.

Zum anderen haben weitere Ereignisse und Prozesse ihre Ursachen in den zu unterscheidenden zukünftigen klimatischen Entwicklungen am Standort. Im Vorhaben VSG wurden neben Permafrostbedingungen mehrmalige kaltzeitliche Inlandeisüberfahrungen mit Eisauflast unterschiedlicher Mächtigkeit und glazialer Rinnenbildung unterstellt.

- **Permafrost:** Langfristige Einwirkungen tiefer Temperaturen, die Permafrostbedingungen entsprechen, führen nach den Ergebnissen der Integritätsanalysen zu thermischen Kontraktionen, die Verformungen der Salzstruktur in Form von Vertikalverschiebungen um ca. 2 m induzieren. Diese werden langfristig wieder abgebaut. Zugbeanspruchungen im Bereich des Salzspiegels sind dagegen nicht nachweisbar, weder Fluiddruck- noch Dilatanzkriterium werden verletzt. Eine Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kann ausgeschlossen werden.
- **Inlandvereisung:** Sowohl im Fall der Gletscherrandlage des Standortes als auch bei seiner vollständigen Bedeckung durch einen 700 bis 1500 m mächtigen Inlandeisgletscher nimmt nach den Ergebnissen der Integritätsanalysen die Druckbeanspruchung unterhalb des Gletschers aufgrund der Auflast signifikant zu, was zu einer vertikalen Stauchung der Salzstruktur und horizontalen Dehnungen jeweils im Meterbereich führt. Zugbeanspruchungen im Bereich des Salzspiegels, die zur Verletzung der Integritätskriterien führen, wurden nicht errechnet. Erst nach Rückzug des Gletschers treten in der nachfolgenden Warmzeit infolge der mechanischen Entlastung flächenhafte dilatante Bereiche auf, die allerdings auf den Saumbereich des Salzspiegels beschränkt sind.
- **Kryogene Klüfte:** Als weitere potenzielle Störungen wurde im Rahmen der Integritätsanalysen die Bildung tiefwirkender „kryogener“ Kälterisse untersucht. Die Simulation einer schnellen Abkühlung der Erdoberfläche um 14,5 °C innerhalb von 100 Jahren zeigte, dass sich aufgrund der thermischen Abschirmwirkung des Deckgebirges die Temperaturänderungen nicht bis in die Salzstruktur durchpausen /KOC 12/. Es wurden dabei keine thermomechanischen Zustände errechnet, wel-

che die umstrittene Genese kälteinduzierter (kryogener) Risse in Salzstöcken durch kaltzeitliche Einflüsse erklären könnten (vgl. hierzu auch /HAM 12/).

- **Glaziale Rinnenbildung:** Auf der Grundlage der Befunde in /KEL 09/ und der Ergebnisse der Szenarienentwicklung /BEU 12b/ wurde bei den Integritätsanalysen davon ausgegangen, dass infolge der Bildung von Schmelzwassererosionsrinnen sämtliche Lockergesteine oberhalb des Salzstocks (im Mittel bis in 350 m Tiefe) ausgeräumt werden. Weiterhin wurde unterstellt, dass durch die Rinnenbildung ein Einschnitt in den darunter liegenden Salzstock bis zu 50 m (Referenzszenarium) bzw. 100 m (Alternativszenarium) unterhalb des Salzspiegels erfolgt. In Kombination mit der selektiven Subrosion leichtlöslicher Salzminerale bis in 100 m Tiefe entstünden Wegsamkeiten bis in eine Tiefe von 150 bzw. 200 m unterhalb des Salzspiegels. Wird zusätzlich die Hebung durch den natürlichen Diapirismus von 70 m (s. o.) berücksichtigt, so verbleibt eine Restmächtigkeit des Salzstockbereichs oberhalb des Einlagerungshorizontes von 300 m (Referenzszenarium) bzw. 250 m (Alternativszenarium). Das gleiche gilt, wenn alternativ eine flächenhafte Subrosion bis in eine Tiefe von 200 m unterhalb des Salzspiegels unterstellt wird (Abb. 6.2). In keinem dieser Fälle würde dabei die die Einlagerungsbereiche mit einigen Zehner Metern Mächtigkeit umgebende geologische Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beeinträchtigt.

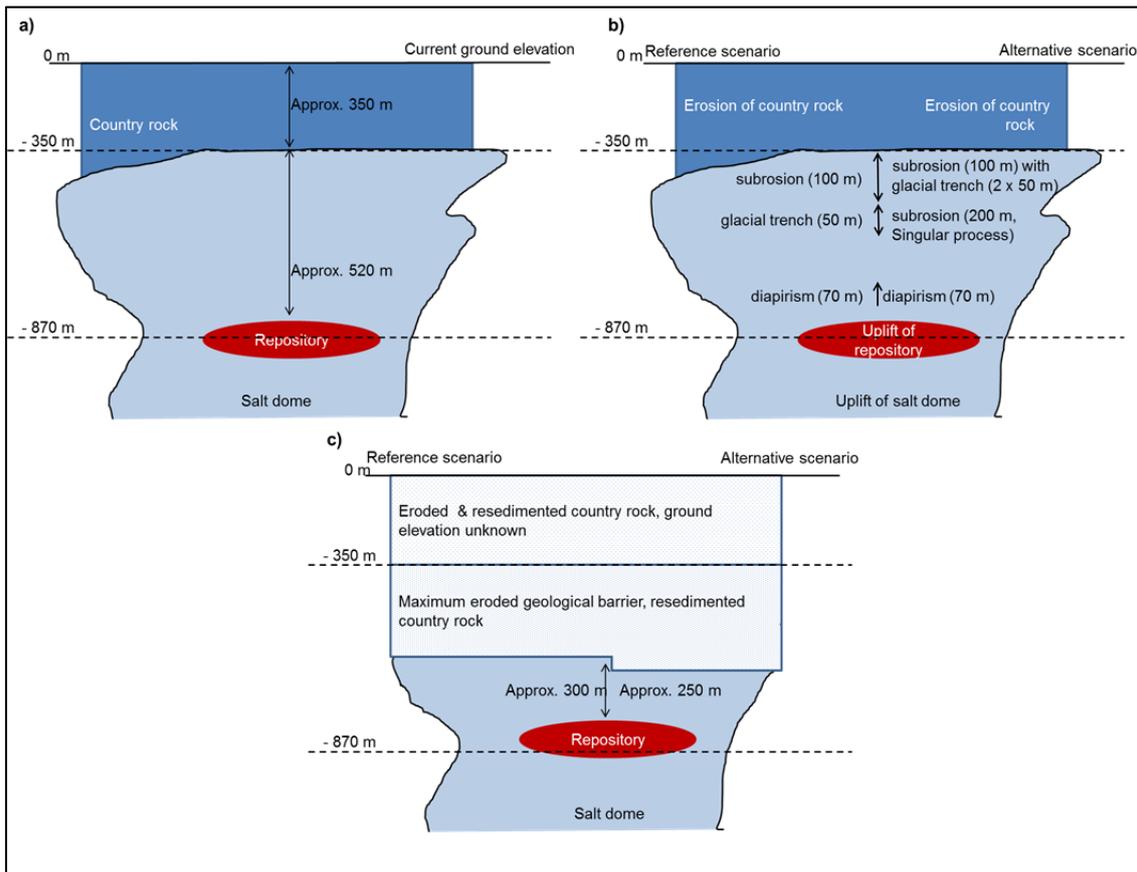


Abb. 6.2 Skizze zur Tiefeneinwirkung von glazialer Rinnenbildung, Subrosion und Diapirismus, aus /KOC 12/

Nicht maßstabsgetreu; a) Ausgangszustand des Standorts; b) Mächtigkeitsverringering durch die Prozesse Rinnenbildung, Subrosion, Diapirismus für Referenzszenarium (links) und Alternativszenarien (rechts); c) möglicher Endzustand des Standorts für Referenzszenarium (links) und Alternativszenarien (rechts)

- **Warmzeitliche Transgressionen:** Für Warmzeiten wurde eine Überflutung des Standortes mit einer Meereshöhe von mehreren Zehner Metern angenommen, wobei ein vollständiges Abschmelzen der Polkappen unterstellt wurde. Angesichts der flachmarinen Verhältnisse und der geringen Subsidenz des norddeutschen Tieflandes ist dabei eine Bildung mächtiger mariner Sedimentstapel, die auflastbedingt in der Lage wären, halotektonische Bewegungen zu induzieren, nicht vorstellbar. Weiterhin käme es im Zuge der Meeresüberflutung zu einer Aufsalsung der oberflächennahen Grundwässer und damit zur Verlangsamung der Subrosion /MRU 11/. Fließvorgänge im Deckgebirge kämen aufgrund des fehlenden hydraulischen Potentials weitgehend zum Erliegen. Eine Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wäre aufgrund seiner Teufenlage auch in diesem Fall auszuschließen.

Klimatische Ereignisse und Prozesse, resultierend aus den Maxima von Kaltzeiten, sind frühestens in etwa 50.000 Jahren zu erwarten /MRU 11/. Sie sind damit zeitlich vollständig entkoppelt von den auf Temperatureinflüssen und Konvergenz beruhenden endlagerinduzierten Prozessen, deren Auftreten auf einige 1.000 Jahre nach Endlagerverschluss beschränkt ist. Sich überlagernde Phänomene, wie z. B. die thermische Beanspruchung durch die Wärmeentwicklung im Innern der Salzstruktur in Kombination mit einer kaltzeitbedingten Abkühlung am Salzstocktop, sind daher nicht zu betrachten. Kaltzeitliche Einflüsse auf die Abdichtbauwerke (z. B. auf die oberen Bereiche der Schachtabdichtungen) brauchten im Vorhaben VSG ebenfalls nicht betrachtet zu werden, da ihre Funktionsdauer auf 50.000 Jahre begrenzt ist und damit vor dem frühesten prognostizierten Eintrittszeitpunkt von Kaltzeitmaxima liegt.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass einer zukünftigen potenziellen Beeinträchtigung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch natürliche Ereignisse und Prozesse planerisch Rechnung getragen wurde. Gegen kurzfristig wirksame Ereignisse wie Erdbeben wurden die Verschlussbauwerke ausgelegt und der Einfluss auf die Salzstruktur berechnet. Entsprechendes gilt für die Auslegung der Verschlussbauwerke gegen mechanische Einwirkungen und korrosiven Angriff von Lösungen. Den Auswirkungen durch Subrosion, Erosion, Diapirismus sowie Klimaveränderungen wurde in Übereinstimmung mit der Forderung aus Abschnitt 8.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ durch eine ausreichende Teufenlage der Einlagerungsbereiche begegnet. Insofern wird davon ausgegangen, dass durch die getroffenen konzeptionellen Maßnahmen eine Beeinträchtigung der Einschlusswirksamkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wirkungsvoll verhindert werden kann und die konzipierten Endlagersysteme somit unempfindlich gegenüber Einflüssen durch natürliche Prozesse und Ereignisse sind. Diese Aussagen gelten für alle Endlagerkonzepte, da das Niveau der Einlagerungssohlen und damit auch das Niveau der Oberkante des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs identisch sind.

2. Endlagerinduzierte Prozesse:

Das geologische System am Standort Gorleben (ohne Endlager) wird aus den oben genannten Gründen insgesamt als ein langzeitstabiles und gegenüber zukünftigen natürlichen Prozessen und Ereignissen robustes System eingeschätzt. Dieses erfährt jedoch durch die Auffahrung eines Bergwerkes bzw. die Einlagerung radioaktiver Abfälle einen anthropogenen Eingriff und damit eine Störung des natürlichen Systems. Auffahrungen von Hohlräumen, Wärmeeintrag und korrosionsbedingter Gasdruckaufbau

im Salzstock führen zur Veränderung der natürlichen Spannungszustände im Gebirge, die allerdings gemessen am Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahren nur in einem kurzen Zeitraum von wenigen 1.000 Jahren wirksam sind. Die wesentlichen Ergebnisse der Integritätsanalysen zu den drei oben genannten endlagerinduzierten Prozessen sind nach /KOC 12/:

Auffahrungen von Hohlräumen: Mechanische Schädigungen treten bei der Auffahrung untertägiger Hohlräume infolge der veränderten Spannungszustände im Gebirge auf. Diese sind auf einen konturnahen Saum in unmittelbarer Hohlraumumgebung beschränkt. In diesem Bereich werden rechnerisch das Dilatanz- und das Minimalspannungskriterium verletzt. Nach den Ergebnissen der geomechanischen Rechnungen beträgt die Mächtigkeit der Auflockerungszonen maximal 3 m. Das Vorliegen einer wenige Meter mächtigen Auflockerungszone wurde bei der Bemessung des Sicherheitsabstandes (vgl. Kap. 5.1.2.3) bereits berücksichtigt. Da sich die konturnahe Auflockerungszone nach dem konvergenzbedingten Aufkriechen des Salzgebirges auf den Salzgrusversatz infolge der wachsenden Stützwirkung des Versatzes zunehmend zurückbilden wird, handelt es sich hierbei um eine vorübergehende, d. h. reversible, mechanische Schädigung. Daher ist die Auflockerungszone auch nach /BMU 10a/ von der Prüfung der Dilatanzfestigkeit (Abschnitt 7.2.1) ausgenommen. Der maximal erforderliche Zeitraum zur Verheilung der Auflockerungszone beträgt je nach Umgebungsbedingungen (Temperatur, Feuchtigkeit) nach derzeitigem Kenntnisstand einige 100 Jahre und wird damit innerhalb des Funktionszeitraums der Verschlussbauwerke abgeschlossen sein.

Wärmeeintrag durch radioaktiven Zerfall: Zusammenfassend haben die im Rahmen der Integritätsanalysen zur geologischen Barriere (vgl. Kap. 5.2.2.1) durchgeführten thermomechanischen Berechnungen der Auswirkungen der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle ergeben, dass

- das Dilatanzkriterium bis in 40 m Teufe unterhalb des Salzspiegels sowie lokal am Salzspiegel und dort nur im Saumbereich verletzt ist. Dies gilt sowohl für die Variante der Strecken- als auch für die Variante der Bohrlochlagerung.
- das Minimalspannungs- bzw. Fluidruckkriterium für die Variante der Streckenlagerung vom Salzspiegel aus und an den (in situ nicht beobachteten, jedoch exemplarisch modellierten) Schichtgrenzen des Streifen-, Knäuel- und Kristallbrockensalzes entlang bis in 90 m bzw. 150 m Teufe (je nach Berechnungsprogramm) verletzt wird. Für die Variante der Bohrlochlagerung erhöht sich der Bereich der Verletzung

des Minimalspannungskriteriums auf 120 m bzw. 210 m Teufe (je nach Berechnungsprogramm). Damit reicht die Verletzung des Minimalspannungskriteriums für die Variante der Bohrlochlagerung ca. 30 bis 60 m tiefer in den Salzstock als im Fall der Streckenlagerung. Zusätzlich ist das Dilatanzkriterium am Salzspiegel ausgeprägter verletzt.

- das Minimalspannungskriterium lokal am zerblockten Anhydrit verletzt ist.

Auf der Grundlage der Ergebnisse thermomechanischer Auslegungsrechnungen (vgl. Kap. 5.1.2.3) konnten die Beladung der Behälter und der Einlagerungsstrecken bzw. -bohrlöcher sowie die Strecken- bzw. Bohrlochabstände so gewählt werden, dass

- die auslegungsbestimmende Maximaltemperatur von 200 °C an den Grenzflächen des Salzes zu den Behältern an jeder Stelle der konzipierten Endlagerbergwerke eingehalten wird,
- die Schmelztemperatur von Carnallit deutlich unterschritten wird,
- die errechneten Temperaturerhöhungen an den Schacht- und Streckenverschlüssen deutlich unter dem gemäß ihrer Auslegung maximal zulässigen Temperaturanstieg von 35° K liegen.

Daraus ergibt sich (unabhängig von einer wahrscheinlichen Verheilung der Auflocke-
rungszone), dass oberhalb des konzipierten Einlagerungshorizonts ein großer Bereich besteht, in dem keine thermomechanische Schädigung erfolgt. Seine Ausdehnung beträgt in vertikaler Richtung ca. 370 m (Streckenlagerung) bzw. 310 m (Bohrlochlage-
rung). Eine nachhaltige temperaturinduzierte Beeinträchtigung der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Verschlussbauwerke ist damit nicht zu erwarten.

Korrosionsbedingter Gasdruckaufbau: Die Integritätsanalysen zur Simulation der Fluidodynamik im Grubengebäudes ergaben, dass in fünf Rechenfällen der Gasdruck den lithostatischen Druck für die Einlagerungsvariante AB1 und in einem Fall für die Einlagerungsvariante B1 überschreitet, so dass nennenswerte Mengen gasförmiger Fluide ins Gebirge infiltrieren könnten. In diesem Zusammenhang kann durch eine Begrenzung des Gasdruckaufbaus durch die Minimierung der Restwassergehalte in den Abfallgebänden, insbesondere derjenigen der vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle, und/oder durch die Gewährleistung der Gasdichtheit der Behälter über einen Zeitraum von 500 Jahren eine Steigerung der Robustheit der Einschlusswirksamkeit

der konzipierten Endlagersysteme erzielt werden. Allerdings zeigen die Berechnungen, dass die Druckanstiegsrate gering ist, so dass aus heutiger Sicht kein sog. „Frac“ zu erwarten ist. Es besteht dennoch F&E-Bedarf bei der Modellierung der Fluidinfiltration, deren Reichweite vor allem von der Speicherfähigkeit des im Salzgebirge vorhandenen Porenraums abhängt (Kap. 7.2.2.6).

Rekritikalität: Nach den Ergebnissen der Berechnungen kann die Rekritikalität von abgebranntem Kernbrennstoff in einem Endlager im Steinsalz für die Endlagerbehälter der Typen BSK-3, POLLUX[®]-10 und CASTOR[®] sowie für die meisten Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren ausgeschlossen werden. Der Nachweis nach Ausschluss von Kritikalität gemäß Abschnitt 7.2.4 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ kann daher für diese Behälter auf konzeptioneller Basis geführt werden. Eine sich selbst erhaltende Kettenreaktion, die zur Schädigung der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Verschlussbauwerke führt, kann demnach ausgeschlossen werden. Für einige höher angereicherte Brennstoffe aus Forschungs- und Prototypreaktoren (insb. FRM-II und KNK-II) kann – je nach Brennstoffart und explizitem Behälterkonzept – die Notwendigkeit einer Umkonditionierung der Brennstoffe nach derzeitigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden. Der entsprechende Forschungs- und Entwicklungsbedarf wurde in /BOL 12/ ausgewiesen.

Es ist festzustellen, dass auch den Auswirkungen anthropogen induzierter Störungen bei der Endlagerauslegung planerisch durch Maßnahmen begegnet werden kann, die zu einer Begrenzung von thermisch induzierten Spannungen führen. Alle geführten Nachweise ergaben für die untersuchten natürlichen und anthropogen induzierten Prozesse bzw. Ereignisse räumlich begrenzte Konsequenzen. Für die geologische Barriere in der Umgebung der konzipierten Endlagerbergwerke wurden dilatante Bereiche nur im Bereich der wenige Meter mächtigen Auflockerungszonen um die Auffahrungen ausgewiesen. Die Hohlräume werden mit Salzgrusversatz verfüllt und die Einlagerungsbereiche verschlossen, so dass sich in vergleichbar kurzer Zeit ein Stützdruck aufbaut, wieder eine homogene Spannungsverteilung einstellt und die Auflockerungszone zurückbildet. Weitere Integritätsverletzungen traten erst in einer minimalen Entfernung von mehr als 300 m (Referenzfall) bzw. 250 m (Alternativszenarien) oberhalb der konzipierten Einlagerungssohle auf. Es kommt nicht zu einer Entstehung einer durchgehenden hydraulischen Wegsamkeit im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Für die geologische Barriere konnte somit eine dauerhaft intakte Barrierenmächtigkeit ausgewiesen werden, die gegenüber der erforderlichen Mächtigkeit des

einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von wenigen Zehner Metern eine hohe Sicherheitsreserve und damit eine deutliche Robustheit aufweist.

Bezogen auf die Einzelforderungen im Zusammenhang mit der Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemäß /BMU 10a/ (Abschnitt 7.2.1) ist aus den oben angeführten Gründen festzustellen, dass:

- die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen werden kann, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können,
- ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser³⁸ nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt,
- die zu erwartenden Beanspruchungen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten und
- die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt und durch die Temperaturentwicklung die Barrierenwirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst wird.

Dies bedeutet, dass auf der Basis des heutigen Kenntnisstandes und unter der grundlegenden Annahme Nr. 2 (Kap. 6.1) davon ausgegangen werden kann, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre erhalten bleibt. Über die Forderung in Abschnitt 7.2.1 /BMU 10a/ hinaus konnte dies nicht nur für die wahrscheinlichen Entwicklungen sondern auch für die weniger wahrscheinlichen Entwicklungen (Alternativszenarien) gezeigt werden.

Die geotechnischen Verschlussysteme wurden räumlich so angeordnet und technisch so ausgelegt, dass die durch die Wärmeentwicklung ausgelösten Prozesse die Ver-

³⁸ Bei dieser primär auf die Endlagerung in Tonsteinsystemen abzielenden Forderung wird im vorliegenden Fall die im Salzgrusversatz enthaltene Feuchtigkeit als „Porenwasser“ interpretiert.

schlussbauwerke nicht gefährden. Die diesbezüglichen thermo-mechanischen Nachweise wurden geführt.

Bezogen auf die Einzelforderungen im Zusammenhang mit dem Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems gemäß /BMU 10a/ (Abschnitt 7.2.3) ist aus den oben angeführten Gründen festzustellen, dass:

- durch die Rechnungen zur Auslegung der Verschlussbauwerke bzw. die Integritätsanalysen gezeigt werden konnte, dass Integrität und Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie der Verfüllung (Salzgrusversatz) erhalten bleiben (/MÜL 12a und /MÜL 12b/ bzw. 2D-Nahfeldmodellierung des IfG /KOC 12/),
- bei der Auslegung der Verschlussbauwerke sämtliche Lastfälle betrachtet wurden, die aus heutiger Sicht im Funktionszeitraum von 50.000 Jahren zu mechanischen Beanspruchungszuständen oder einer chemischen Beeinträchtigung (Alterungsbeständigkeit) der Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke führen könnten, berücksichtigt wurden,
- durch die in Kapitel 5.2.2.2 beschriebenen ingenieurtechnischen Nachweise eine hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit der in den Funktionselementen der Abdichtbauwerke enthaltenen Baustoffe für den Funktionszeitraum belegt wurde und
- das Verschlusskonzept in Übereinstimmung mit dem Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG so ausgelegt ist, dass sofort wirksame Barrieren (Schacht- und Streckenverschlüsse) den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barriere (Salzgrusversatz) noch nicht gegeben ist.

Allerdings weisen die Integritätsanalysen auch aus, dass die Robustheit des konzipierten Endlagersystems durch die zusätzliche Einlagerung vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle (unter den Annahmen, die im Vorhaben VSG hierzu getroffen wurden, wie etwa der unterstellte hohe Restfeuchtegehalt der Abfälle) vermindert wird. Der Grund hierfür liegt insbesondere im Gasdruckaufbau durch Korrosionsprozesse, die im Ergebnis der Systemanalysen zu vergleichsweise komplexen Druckausgleichsströmungen zwischen beiden Endlagerflügeln sowie bei der Unterstellung extrem pessimistischer Parameterkombinationen zu einer Überschreitung des lithostatischen Dru-

ckes führten. Auch wenn sich aus den Analysen im Vorhaben VSG keine definitiven sicherheitstechnischen Gründe für den Ausschluss der zusätzlichen Einlagerung von vernachlässigbar wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen ergaben, kann die Robustheit durch Minimierung der Restwassergehalte in den Abfallgebinden, technisch gasdichter Behälter für die Brennelement-Strukturteile im Falle einer Einlagerung im Ostfeld und eine noch stärkere Separierung beider Abfallarten gesteigert werden kann (vgl. Empfehlungen in Kapitel 7.2).

3. Bergbauinduzierte Einflüsse (Auffahrungs-, Einlagerungs- und Rückholungsmaßnahmen):

- Durch die planerische Umsetzung der Forderungen gem. Abschnitt 8.2 in /BMU 10a/ (Minimierung der Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/gebirgsschonendes Auffahren) und Abschnitt 8.5 (Gliederung in Einlagerungsbereiche, zügige Beladung, Verfüllung und Verschluss) wird aus den in Kapitel 5.1.2.3 und 6.2.1 angeführten Gründen davon ausgegangen, dass bergbaubedingte mechanische Beanspruchungen der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs soweit vermieden bzw. reduziert werden können, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht durch bergbauliche Maßnahmen geschädigt wird.
- Für die im Vorhaben VSG entwickelten Rückholungskonzepte (Kap. 5.1.2.2) gilt dies nicht uneingeschränkt: Bei ihrer Entwicklung wurde von der Prämisse ausgegangen, dass sämtliche (wärmeentwickelnden) Abfälle insgesamt zurückzuholen sind, und folglich bergbauliche Aufwältigungsmaßnahmen ohne Rücksicht auf den Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften der geologischen Barriere durchgeführt werden können. Für den Fall, dass lediglich einzelne Abfallgebinde zurückzuholen sind, wäre für die restlichen Abfälle der Integritätserhalt der geologischen Barriere dagegen sicherzustellen, was signifikante Modifikationen an den entwickelten Rückholungskonzepten erfordern würde. Da die konkreten Motivationen zur Rückholung von Abfällen in Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ nicht genannt werden, stehen die im Vorhaben VSG entwickelten Rückholungskonzepte hierzu nicht im Widerspruch. Vielmehr bedarf es konkreterer regulatorischer Festlegungen, in welchen Fällen Abfälle während der Betriebsphase eines Endlagers zurückgeholt werden müssen (s. Empfehlung in Kapitel 7.1.2).

6.2.3.3 Radiologische Langzeitaussage

1. Radiologische Konsequenzen

Bei der radiologischen Konsequenzenanalyse wurde die Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf der Grundlage des vereinfachten Verfahrens (Abschnitt 7.2.2 /BMU 10a/) unter Verwendung des radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI, vgl. Kap. 4.2.4.1) durchgeführt. Dabei wurde die Freisetzung von Radionukliden am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. an den schachtseitigen Stirnflächen der Streckenabdichtungen, untersucht. Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage ist zulässig, wenn gezeigt werden kann, dass die im Abschnitt 7.2.2 der Sicherheitsanforderungen in /BMU 10a/ ausgeführten dosisbezogenen Bewertungskriterien erfüllt sind.

Die nachfolgend dargelegten Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse gelten vorbehaltlich zweier getroffener Annahmen (Prämissen):

1. Für die Freisetzung gelöster Radionuklide auf Basis des vereinfachten Nachweisverfahrens gilt die in Kapitel 6.1 aufgeführte grundlegende Annahme Nr. 4 zum Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes.
2. Für gasförmig freigesetzte Radionuklide gelten – vorbehaltlich der Modell-, Prozess- und Datenungewissheiten – die Aussagen unter der Voraussetzung, dass an die POLLUX-Behälter für wärmeentwickelnde Abfälle die Anforderung der Gasdichtheit über einen Zeitraum von 500 Jahren gestellt werden kann.

Für gelöste Radionuklide konnte im Ergebnis der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/ gezeigt werden, dass unter den in Kapitel 6.1 genannten grundlegenden Annahmen der Nachweis gemäß der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage (Abschnitt 7.2.2 der Sicherheitsanforderungen) geführt werden kann und damit die Kriterien der Abschnitte 6.1 bis 6.3 eingehalten werden können. Sowohl für die Rechenfälle des Referenzszenariums als auch für diejenigen der Alternativszenarien mit einer in /POP 12/ begründeten Endporosität von 1 % finden keine Freisetzungen über die Streckenverschlüsse statt, da keine Lösungen aus dem Infrastrukturbereich zu den Abfällen treten und sich damit keine durchgehenden Lösungspfade ausbilden können. Die in den Rechnungen berücksichtigten Lösungsmengen in den Abfällen und im Versatz reichen nicht aus, die Behälter zu korrodieren und Radionuklide in Lösung zu bringen. Bei Annahme einer Restporosität von 2 % und diffusivem Transport ergaben die Rech-

nungen zur Freisetzung gelöster Radionuklide am Aufpunkt der Streckenverschlüsse (Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) RGI-Werte, die praktisch gleich Null zu setzen sind (vgl. auch Abb. 5.28). Auch die entsprechend den vorliegenden Ungewissheiten durchgeführten Parametervariationen, beispielsweise der Fall eines unterstellten Versagens der Dichtelemente eines Schachtverschlussbauwerks, ändern im Ergebnis diese Grundaussage nicht. Der Grund für dieses robuste Einschlussverhalten liegt in der in Kapitel 6.2.3.1 erläuterten Wirkung der technischen Verschlusskomponenten.

Zusammenfassend wird davon ausgegangen, dass das im Vorhaben VSG konzipierte, gestaffelte Barrierensystem Einschussqualitäten aufweist, die bezüglich der Freisetzung gelöster Radionuklide im Einklang mit den Forderungen der in den Abschnitten 4.1 und 4.2 in /BMU 10a/ genannten Sicherheitsprinzipien und den Vorgaben in den Abschnitten 6.1 und 8.7 stehen.

Für die Freisetzung gasförmiger Radionuklide in der frühen Nachverschlussphase kann der vereinfachte radiologische Nachweis nach /BMU 10a/ unter den bei der radiologischen Konsequenzenanalyse getroffenen Annahmen zur Überwindung von Ungewissheiten (Modell-, Prozess- und Datenungleichheiten) rechnerisch nur dann geführt werden, wenn auch für die endgelagerten Brennelement-Strukturteile eine Einlagerung in Behältern unterstellt werden kann, die über mindestens 500 Jahre gasdicht sind. Im Falle der ursprünglich vorgesehenen Planung, die Strukturteil-Behälter ohne diese Anforderung nahe dem Streckenverschluss Süd einzulagern, wird die Bemessungsgröße RGI in der frühen Nachverschlussphase dagegen in allen Rechenfällen überschritten.

Werden die Aufpunkte für die Bestimmung des RGI für volatile Radionuklide dagegen über den Infrastrukturbereich hinaus (außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) im Bereich der unteren Schachtabdichtung positioniert, ergeben sich für alle untersuchten Alternativszenarien RGI-Werte, die deutlich unterhalb von 1 liegen (i. Regelfall $< 1 \cdot 10^{-20}$) /LAR 13/. Hintergrund ist, dass die Gasdiffusion dem Zustrom von Lösungen durch den Schacht in den Infrastrukturbereich entgegengerichtet ist und die resultierenden Aktivitätsflüsse daher extrem gering sind. Dies weist darauf hin, dass der radiologische Standardnachweis gemäß Abschnitt 7.2.2 (1. Absatz) der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/, bei dem auch Sicherheitsfunktionen von Kompartimenten des Endlagersystems, die außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs liegen, einbezogen werden können, rechnerisch geführt werden könnte. Gemäß dem Nachweiskonzept des Vorhabens VSG wird die vereinfachte radiologische Lang-

zeitaussage herangezogen. Der oben angeführte umfassende Nachweisansatz wurde nicht weiter verfolgt.

Die Untersuchung des Einflusses der Parameter- und Datenungewissheiten auf die Analyseergebnisse ergab einen großen Einfluss folgender Parameter und Prozesse auf den Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche:

- hydraulischer Druck an den schachtseitigen Stirnflächen der Streckenverschlüsse,
- Permeabilität und Porosität der Streckenverschlüsse,
- zeitliche Entwicklung der Porosität/Permeabilität des Salzgrusversatzes in den Einlagerungsbereichen, insbesondere in den Richtstrecken unter Einfluss von Feuchte und Temperatur,
- erreichbare Restporosität des kompaktierten Salzgrusversatzes sowie
- hydraulische Eigenschaften des Salzgrusversatzes nach Erreichen einer geringen Porosität im Bereich von 1 %.

2. Untersuchungen zur Systemrobustheit (What-If-Betrachtungen)

Durch What-if-Untersuchungen wurden unwahrscheinliche Entwicklungen analysiert, die durch die Wahl unwahrscheinlicher FEP oder unwahrscheinlicher Ausprägungen von FEP beschrieben werden, die außerhalb für möglich erachteter Bandbreiten liegen. Nach /BMU 10a/ wird das Auftreten unwahrscheinlicher Entwicklungen am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet. Für die technischen und geotechnischen Komponenten beschreiben sie Zustände und Entwicklungen, wie etwa das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Verschlusskomponenten, die praktisch ausgeschlossen werden können. Diese Betrachtungen dienen zum einen zum Verständnis des Endlagersystemverhaltens und zum anderen zur Prüfung der Robustheit der Sicherheitsaussage, welche auf Basis der wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklung des Systems getroffen wird.

Auch unter Berücksichtigung von unwahrscheinlichen Parameterkonstellationen in den What-if-Analysen (z. B. bei unterstellter Advektion und langsamer Kompaktion, hohen molekularen Diffusionskonstanten, gleichzeitigem Versagen mehrerer Abdichtbauwerke etc.) ergaben die Analysen zum Lösungstransport für die Einlagerungsvariante B1 nur geringfügige Freisetzungen. Selbst das äußerst unwahrscheinliche sofortige Versagen aller Dichtelemente in beiden Schächten, resultierend in einer extrem erhöhten

Permeabilität von jeweils $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$, führte zu keinem erhöhten Lösungszutritt zu den Abfällen. Diese Ergebnisse zeigen die Robustheit des Systems gegenüber Parameteränderungen auf. Gleichzeitig erweisen sich die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse als unempfindlich und damit robust (i. S. der Robustheitsdefinition in /BMU 10a/) gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen, die wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen oder Ausprägungen betreffend.

Aus den Ergebnissen der What-if-Analysen konnten in Übereinstimmung mit der Maßgabe in Abschnitt 6.4 der Sicherheitsanforderungen Optimierungsvorschläge für das Endlagerdesign abgeleitet werden. Hierzu gehört die Verlagerung der Behälter für die Brennelement-Strukturteile in ein von den Streckenschlüssen weiter entferntes Einlagerungsfeld bzw. die Steigerung der Behälterintegrität hinsichtlich einer Gasdichtigkeit (s. Empfehlungen in Kapitel 7.2.1).

Die Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen zur Freisetzung der gasförmigen Radionuklide sind differenzierter. Vor dem Hintergrund, dass für zahlreiche Parameter und Prozesse nur Daten und Abschätzungen mit einer großen Ungewissheit vorliegen, wurde in den Analysen zum Gaspfad auf eine Definition von What-if-Rechenfällen verzichtet. Die Ungewissheiten sowohl in der Annahme bzw. Vereinfachung von Prozessabläufen in den Modellen als auch in der Abschätzung der verwendeter Zweiphasenfluss-Parameter in den Rechnungen sind schwer zu quantifizieren. Teilweise werden sie schon durch die Parameterbandbreiten, die für die Rechenfälle des Referenzszenariums und der Alternativszenarien verwendet wurden, abgedeckt. Generell führen die bei den Zweiphasenflussrechnungen verwendeten Modellannahmen jedoch zu einer rechnerischen Überschätzung der aus dem Endlager strömenden Gasmenge und zu einer erhöhten Radionuklidfreisetzung über den Gaspfad. Die vorliegenden Einlagerungskonzepte erweisen sich (verglichen mit dem Lösungspfad) generell als weniger robust. Dies gilt z. B. für den schachtnahen Einlagerungsort und die Eigenschaften der Behälter für die Brennelement-Strukturteile. (vgl. Optimierungsvorschläge in Kapitel 7.2.1). Weitere Gründe liegen in dem nicht ausreichenden Kenntnisstand zu den zeitlichen Abläufen der Korrosionsprozesse. Andererseits führten die Ungewissheiten hinsichtlich der Mobilisierung der IRF aus den Brennelement-Strukturteilen und des Übergangs der IRF in die Gasphase zu Modellannahmen, die eine erhebliche Überschätzung der Freisetzung darstellen. Insgesamt ist anzumerken, dass zu dem Aspekt der Freisetzung gasförmiger Radionuklide noch deutlicher F&E-Bedarf besteht (vgl. Kap. 7.2.2.6).

Fazit:

In Gesamtwürdigung der im Vorhaben VSG erzielten Ergebnisse lassen sich folgende Kernaussagen ableiten:

Bezogen auf die Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen können unter den in Kapitel 6.1 angeführten Vorbehalten sowohl die projizierten Endlagersysteme als auch die hiermit verbundenen Sicherheitsaussagen als robust angesehen werden. Für das Freisetzungsverhalten gasförmiger Radionuklide gilt dies vorbehaltlich der Modell-, Prozess- und Datenungewissheiten nur, wenn Behälter unterstellt werden, die über etwa 500 Jahre gasdicht sind.

Aus der zusätzlichen Einlagerung von radioaktiven Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung mit Gasentwicklung und sehr komplexer Zusammensetzung resultiert im Ergebnis der im Vorhaben VSG durchgeführten Systemanalysen ein signifikanter Zuwachs der Komplexität von im Endlagersystem ablaufenden Prozessen und der hiermit verbundenen Ungewissheiten. Eine Steigerung der Robustheit der projizierten Endlagersysteme kann durch eine Minimierung der Restfeuchtegehalte in den Behältern für radioaktiven Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung und eine stärkere Separierung der Einlagerungsbereiche wärmeentwickelnder und vernachlässigbar wärmeentwickelnder Abfälle erreicht werden.

Aus den Ergebnissen des Vorhabens VSG lässt sich ableiten, dass die im Vorhaben entwickelten Endlagerkonzepte im Verbund mit der geologischen Gesamtsituation am Standort Gorleben oder eines ähnlich gearteten Salzstandortes – unter der Voraussetzung, dass sich die im Vorhaben VSG getroffenen grundlegenden Annahmen in Zukunft als zutreffend erweisen – geeignet sind, die langzeitsicherheitsbezogenen Sicherheitsanforderungen des BMU an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle zu erfüllen. Für die Freisetzung gasförmiger Radionuklide gilt dies vorbehaltlich der Modell-, Prozess- und Datenungewissheiten mit der bereits beschriebenen Einschränkung der Gasdichtheit der Behälter.

Die im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte werden einschließlich der Rückholungskonzepte als realisierbar angesehen. Einige der in den Sicherheitsanforderungen des BMU geforderten Nachweise können jedoch erst nach einer weiteren Konkretisierung der technischen Planungen geführt werden.

7 Reflexion und Empfehlungen

7.1 Reflexion

7.1.1 Erkenntnisse aus dem Projektablauf (methodisch)

Im Rahmen des Vorhabens VSG wurde zum ersten Mal in Deutschland eine umfassende, vorläufige Sicherheitsanalyse für ein Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle auf Basis der Kenntnisse an einem konkreten Standort durchgeführt. Dabei wurden auch die Grundlagen für zukünftige Sicherheitsanalysen zu einem konkreten Standort entwickelt. Die vorliegende Sicherheitsanalyse ist somit als konzeptionelle Basis für weitere Sicherheitsanalysen zu Salzstandorten zu werten. Im Zuge der Bearbeitung des Vorhabens konnten wichtige Erkenntnisse für weitere Sicherheitsanalysen für Endlager in Steinsalzformationen, aber auch für Sicherheitsanalysen in anderen Wirtsgesteinen gewonnen werden. Die wesentlichen Erkenntnisse aus dem methodischen Vorgehen im Vorhaben VSG sind im Folgenden zusammengefasst:

Das Vorhaben VSG zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die seit Mitte der 1990er Jahre in Deutschland erarbeiteten Einzelergebnisse der Endlagerforschung im Hinblick auf den langzeitigen Einschluss radioaktiver Abfälle in Salzstöcken und die bisherigen Erkundungsergebnisse zum Standort Gorleben im Hinblick auf die durchzuführende Langzeitsicherheitsanalyse zusammengeführt wurden.

Die Beteiligung vieler Wissenschaftseinrichtungen, die über Jahrzehnte langes Knowhow zu allen endlagerrelevanten Aspekten verfügen, und deren direkte interdisziplinäre Zusammenarbeit unter wissenschaftlicher Führung eines Steering Committee hat sich bewährt. Im Sinne einer internen Qualitätsprüfung war der Einbezug von Wissenschaftseinrichtungen (z. B. Universitäten), die nicht in aktuelle Endlagerprojekte involviert sind und die daher prädestiniert waren, Methodik und Datenlage im Vorhaben VSG kritisch zu hinterfragen, von Vorteil.

Das Vorhaben VSG war als erste derart umfassende Sicherheitsanalyse mit einer Laufzeit von 32 Monaten angesichts der gesteckten Ziele knapp bemessen. Für eine Reihe von Aufgaben, die im Grundsatz sequenziell, d. h. aufeinander aufbauend, hätten bearbeitet werden müssen, ergab sich aus Zeitgründen die Notwendigkeit paralleler Bearbeitung in Arbeitsgruppen, was teilweise zu Reibungsverlusten und Nacharbei-

ten führte. In nachfolgenden Sicherheitsanalysen sollte der Zeitraum zur konsekutiven Bearbeitung von Aufgaben ausreichend bemessen sein. Die Erfahrung aus dem Vorhaben VSG zeigen, dass, um Fehlentwicklungen im Vorhaben zu vermeiden, insbesondere der enge fachliche Austausch der Bearbeiter des FEP-Katalogs, der Szenarientwicklung und der Integritäts- und radiologischen Konsequenzenanalysen von Beginn des Vorhabens an erfolgen muss.

Aus den gleichen Gründen konnte ein zentrales Datenmanagement im Vorhaben VSG nicht in der ursprünglich beabsichtigten Weise implementiert werden. Zwar wurde ein eigens auf die Bedürfnisse des Vorhabens zugeschnittenes Datenbanksystem entwickelt. Aufgrund der mit dem starken Zeitdruck verbundenen parallelen Bearbeitung der verschiedenen Arbeitspakete erwies sich das zentrale Datenmanagement unter Praxisbedingungen jedoch als nicht realisierbar. Infolge dessen musste die Datenkonsistenz im Rahmen des fachlichen Berichts-Review-Prozesses (vgl. Kap. 3.7) sichergestellt werden.

Die Entwicklung eines standort- und anlagenspezifischen Sicherheits- und Nachweis-konzeptes ist für eine Sicherheitsanalyse von zentraler Bedeutung, da in ihnen festgelegt wird, wie die Sicherheit erreicht und der Nachweis über die erreichte langfristige Sicherheit geführt werden soll. Das Sicherheitskonzept stellt die Verbindung zwischen den regulatorischen Anforderungen und den planerischen Möglichkeiten her.

Für das im Vorhaben VSG entwickelte Endlagersystem konnten Endlagerteilsysteme, Prozesse und Parameter, die im Hinblick auf ihre Sicherheitsrelevanz für ein derart komplexes Endlagersystem besonders sensitiv sind, identifiziert werden. Auf dieser Basis erfolgte eine systematische und möglichst vollständige Identifizierung noch offener F&E-Felder. Dabei hat es sich als sehr wichtig erwiesen, eine Sicherheitsanalyse vollständig und für ein konkretes Endlagersystem (Standort und Endlagerkonzept) durchzuführen. Die Erfahrung zeigt, dass dies nicht durch rein generische Sicherheitsanalysen möglich ist.

Aufgrund fortschreitenden Kenntniserwerbs durch Forschung und Entwicklung sowie Erkundung oder aufgrund veränderter regulatorischer Bedingungen sollten Sicherheitsanalysen mit konkretem Standortbezug regelmäßig weiterentwickelt werden. Im internationalen Rahmen sind Zeiträume von ca. 3 bis 7 Jahren für solche Iterationen üblich.

In den Feldern FEP-Katalog und Szenarientwicklung wurde im Vorhaben VSG ein methodisches Vorgehen entwickelt, das sich bewährt hat, aber in zukünftigen Arbeiten weiterentwickelt werden sollte. Dies betrifft zum Beispiel die Festlegung von FEP und ihren Ausprägungen, die eine Grundlage der Szenarientwicklung und der numerischen Modellierung ist. Für diese Festlegung ist z. T. Wissen erforderlich, das erst aufgrund von Modellrechnungen entstehen kann (z. B. bezüglich der Integrität des Wirtsgesteins und der technischen Barrieren). Insofern besteht die Notwendigkeit einer Iteration der Schritte FEP-Festlegung – Szenarientwicklung – Modellierung. Mit den Ergebnissen im Vorhaben VSG wurde der Startpunkt einer solchen Iteration geschaffen. Des Weiteren bedarf der Ansatz, bei der Kombination mehrerer weniger wahrscheinlicher FEP und/oder Ausprägungen die betreffenden Szenarien als unwahrscheinlich einzustufen, einer besonderen Beachtung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die im Vorhaben VSG eingesetzte Methodik geeignet ist, die technische Sicherheit für ein Endlagersystem in Salzstöcken nach den einschlägigen Sicherheitsanforderungen des BMU zu bewerten und den Nachweis zu führen, dass der sichere Einschluss sowie dessen Dauerhaftigkeit (Integrität der Barrieren) für ein Endlagersystem auf der Basis des Standes von Wissenschaft und Technik gewährleistet werden kann. Das innerhalb des Vorhabens VSG entwickelte Sicherheitskonzept und die hieraus abgeleitete Nachweisführung, welche auf den sicheren Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich abzielen, haben sich bewährt. Es wurde ein Sicherheitskonzept entwickelt, das auf der Methode des vereinfachten radiologischen Nachweises für den sicheren Einschluss in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich basiert, wobei das Deckgebirge Schutzfunktionen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich übernimmt.

7.1.2 Erfahrungen in der praktischen Anwendung der Sicherheitsanforderungen des BMU

Wie bereits zu Beginn des Kapitels 2 erwähnt, bestand die regulatorische Grundlage für das Vorhaben VSG in den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/. Im Folgenden wird vorausgesetzt, dass die einschlägigen Stellen der Sicherheitsanforderungen auch für die Sicherheitsanalysen im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens zugrunde gelegt werden. In der praktischen Anwendung der Sicherheitsanforderungen in einem konkreten Vorhaben mit Bezug auf Erkenntnisse an einem realen Standort wurden im Vorhaben VSG Erfahrungen gesammelt.

Der im Folgenden dargelegte Erfahrungsrückfluss soll dabei für den Regelgeber bei den weiteren Entwicklungen des Regelwerks eine Hilfestellung sein:

- Die Erfahrungen im Vorhaben VSG haben gezeigt, dass für die Festlegung der Lage und der Umgrenzungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Rahmen einer Langzeitsicherheitsanalyse ein iterativer Prozess erforderlich ist, der nicht bereits am Anfang einer Sicherheitsanalyse abgeschlossen werden kann. Eine Anfangsannahme (initial guess) konnte jedoch auf Grundlage der Vorkenntnisse zu den Standortverhältnissen getroffen werden. Nach einer Vorbemessung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, die auf einem Sicherheitsabstand von 50 m zu Salzgesteinen außerhalb des Hauptsalzes (z2HS) beruhte, erfolgte die endgültige Ausweisung der Lage erst auf Basis der Ergebnisse der Integritätsanalysen und der radiologischen Konsequenzenanalyse. Nur auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass die entsprechenden Qualitätsanforderungen an das dauerhafte und sichere Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auch nachweislich gegeben sind. Es sollte am Ende des Abschnitts 5.1 sowie zu Beginn des Abschnitts 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen angemerkt werden, dass zwar eine Vorbemessung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf der Basis einer vorläufigen Planung der Behälter, Einlagerungstechnologie und -geometrie erfolgen kann, die endgültige Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs jedoch erst auf der Grundlage der Ergebnisse der in Kapitel 7 der Sicherheitsanforderungen spezifizierten Nachweise vorgenommen werden sollte.
- In den Sicherheitsanforderungen werden für die radiologische Langzeitaussage nach dem vereinfachten Verfahren radiologische Kriterien für ein Kollektiv von 10 Personen vorgegeben. Diese Kriterien beziehen sich auf in Wasser gelöste Radionuklide. Es ist jedoch nicht ausgeführt, wie das Kollektiv (z. B. Altersgruppen) sowie der für das Kollektiv zu unterstellende Wasserverbrauch anzunehmen ist. Im Vorhaben VSG wurde in Ermangelung einer Rechenvorschrift von 10 Erwachsenen mit exakt den gleichen Verzehrgewohnheiten ausgegangen. Hierzu sollte dem Anwender beispielsweise durch eine konkretisierende Leitlinie eine Rechenvorschrift mit Expositionsmodellen vorgegeben werden.
- Es wurde deutlich, dass die Sicherheitsanforderungen des BMU stark auf die Freisetzung, den Transport und die radiologische Konsequenz lösungstragender Radionuklide abheben. Aus den Ergebnissen der radiologischen Konsequenzenanalyse wird jedoch deutlich, dass die Freisetzung und der Transport gasförmiger Radionuklide mindestens ebenfalls sicherheitsrelevant sind. Die Sicherheitsanfor-

derungen sollten hinsichtlich der Rückhaltung und Freisetzung gasförmiger Radionuklide sowie deren radiologischer Bewertung ergänzt werden. Auch hier sollte dem Anwender z. B. durch eine Leitlinie eine Rechenvorschrift mit Expositionsmo-
dellen vorgegeben werden.

- Bei dem in den Sicherheitsanforderungen vorgegebenen Umgang mit unwahrscheinlichen Entwicklungen wird der Anwender vor dem Hintergrund, dass sich die Identifizierung unwahrscheinlicher Entwicklungen einer systematischen Behandlung entzieht, mit der Frage konfrontiert, wie diese zu identifizieren sind. Der Einbezug unwahrscheinlicher Entwicklungen bei der Optimierung, so wie in den Sicherheitsanforderungen dargelegt, sollte präzisiert werden.
- In den Sicherheitsanforderungen wird die Einteilung der Szenarien in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche vorgegeben, wobei ihre Zuordnung über ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten im Nachweiszeitraum vorzunehmen ist. Eine konkrete Handlungsanweisung, wie die Zuordnung in der Szenarientwicklung zu erfolgen hat, wird nicht gegeben. Im Vorhaben VSG wurden die FEP und ihre Ausprägungen den Wahrscheinlichkeitsklassen (wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich, nicht weiter zu betrachten) zugeordnet. Bei der Entwicklung der Szenarien wurde per Konvention festgelegt, dass alle Kombinationen von weniger wahrscheinlichen FEP oder Ausprägungen mit anderen weniger wahrscheinlichen FEP oder Ausprägungen als unwahrscheinlich interpretiert werden, wobei alle FEP als unabhängig voneinander angenommen sind. Diese Vorgehensweise erlaubt eine klare Zuordnung von Szenarien zu den in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ definierten Wahrscheinlichkeitsklassen. In dieser Methodik werden für die Ausprägungen der FEP keine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen benötigt. Die aus der Szenarientwicklung ermittelten Szenarien werden für die Konsequenzenanalyse in Rechenfälle überführt. Dabei wird eine Vielzahl von Rechenfällen betrachtet, in welchen in Übereinstimmung mit der Szenarientwicklung jeweils ein Parameter variiert wird. Diese Vorgehensweise steht in einem gewissen Widerspruch zu den Ungewissheitsanalysen und Sensitivitätsanalysen auf probabilistischer Grundlage, in denen die Parameter in ihrer gesamten Ausprägungsbandbreite ausgespielt und kombiniert werden. Wie mittels probabilistischer Analysen der VSG-Ansatz erfasst werden kann, ist zurzeit nicht geklärt und bedarf weiterer Forschung. Es sollte in einer Leitlinie Klarheit über den Umgang mit der Wahrscheinlichkeitsklassifizierung für Szenarien geschaffen werden, insbesondere im Hinblick auf probabilistische

Systemanalysen zur Behandlung der in den Sicherheitsanforderungen geforderten Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen.

- Die Sicherheitsanforderungen des BMU geben vor, dass der Antragsteller praxistaugliche Konzepte vorlegt, aus denen hervorgeht, dass die Rückholung der eingelagerten Abfallgebinde für wärmeentwickelnde Abfälle betriebstechnisch machbar ist. Allerdings wird nicht festgelegt, unter welchen Randbedingungen die Rückholung aus regulatorischer Sicht als erforderlich angesehen wird. Von diesen regulatorischen Randbedingungen hängt die betriebliche Ausgestaltung der jeweiligen Rückholungskonzepte maßgeblich ab. Die Frage, ob die Forderung nach Rückholbarkeit einzelne Abfallbehälter betrifft, z. B. deswegen, weil sich herausgestellt hat, dass ihr Inhalt falsch deklariert wurde, oder ob es darum geht, im Sinne einer Reversibilität die Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle in einem Endlagerbergwerk im Steinsalz in Gänze rückgängig zu machen, hat einen starken Einfluss auf die Rückholungskonzepte von Abfallgebinden während der Betriebsphase. Da der materielle Gültigkeitsbereich der Sicherheitsanforderungen des BMU sich auf wärmeentwickelnde Abfälle beschränkt, wurden die Rückholungskonzepte im Vorhaben VSG nur für diese Abfallgruppe entwickelt. Dabei wurde als Prämisse davon ausgegangen, dass die Rückholung aller wärmeentwickelnden Abfälle im Sinne einer vollständigen Umkehr der Einlagerungsmaßnahme erfolgen soll. Insofern wurden im Vorhaben VSG Konzepte für die Aufwältigung der Einlagerungsbereiche ohne Rücksicht auf den Integritätserhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs geplant. Unter der Annahme, dass die Gesamtheit der wärmeentwickelnden Abfälle ohne Rücksicht auf die Integrität der geologischen Barriere in der Umgebung der Endlagerbergwerke im Ostflügel zurückgeholt werden müssen, stellt sich die Frage, ob bzw. wie unter diesen Randbedingungen der langfristig sichere Einschluss der verbleibenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle im Westflügel realisiert werden kann. Dieser Sachverhalt würde sich völlig anders darstellen, wenn lediglich einzelne Abfallbehälter oder -chargen aus bereits versetzten Einlagerungstrecken oder -bohrlöchern unter Schonung der geologischen Barriere in der Umgebung der Einlagerungsbereiche zurückzuholen wären. Für diesen Fall wären entsprechende Rückholungskonzepte zukünftig noch zu entwickeln, bei denen die mechanische Schonung der Integrität der geologischen Barriere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und der Abdichtbauwerke zu gewährleisten ist. Ein weiterer offener Punkt bezüglich der Kriterien für die Rückholung betrifft unerwartete Entwicklungen des Endlagersystems, z. B. bei einem starken Lösungszutritt oder einer Havarie, wenn das Endlager nicht mehr wie vorgesehen betrieben werden

kann. Wenn ein solches Ereignis eintritt, gelten die bereits genannten Randbedingungen für die Rückholung nicht mehr und eine Rückholung ist evtl. in der im Vorhaben VSG konzipierten Form nicht mehr möglich und es wären ggf. andere Rückholungskonzepte zu entwickeln. Für die Entwicklung von Konzepten zur Rückholung von Abfallgebinden während der Betriebsphase eines Endlagers gemäß Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen des BMU ist es daher entscheidend, dass regulatorisch Kriterien vorgegeben werden, aus denen klar hervorgeht, in welchen Fällen Abfälle zurückgeholt werden müssen.

- Generell wird eine Konkretisierung der mit Abschnitt 7.9 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ verbundenen Forderungen zum Umgang mit nicht-radiologischen Umwelteinflüssen für erforderlich gehalten. Dies betrifft insbesondere die Vorgabe eines Grenzkriteriums für die maximal zulässige Erwärmung von Grundwasservorkommen infolge der Abfallwärme.

7.1.3 Erkenntnisse aus dem Vorhaben VSG für ein Standortauswahlverfahren

In Erweiterung der ursprünglichen Aufgabenstellung des Vorhabens VSG sollte im vorliegenden Synthesebericht auch dargelegt werden, welche methodischen Ansätze der vorläufigen Sicherheitsanalyse zweckmäßig für einen Vergleich von Endlagerstandorten eingesetzt werden können und welche technischen, konzeptionellen Überlegungen der VSG übertragbar auf Endlagerkonzepte in anderen geologischen Gesamtsituationen sind. Hierauf wird im Nachfolgenden eingegangen.

7.1.3.1 Ablauf eines gestuften Standortauswahlverfahrens

Die Vorgehensweise bei einem zukünftigen Verfahren zur Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in Deutschland ist zurzeit nicht festgelegt. Das Standortauswahlgesetz sieht vor, dass bei einem auf die Sicherheit ausgerichteten gestuften Standortauswahlverfahren Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen sind, deren Umfang und Detaillierungsgrad von Stufe zu Stufe zunehmen und dabei auch denjenigen im Vorhaben VSG vergleichbar sind.

Die Autoren dieses Berichts gehen davon aus, dass zukünftig ein gestuftes Auswahlverfahren durchgeführt wird, welches mindestens die nachfolgend aufgeführten Schrit-

te umfasst. Diese Elemente weist beispielsweise auch das in der Schweiz im Rahmen des Sachplanverfahrens Geologisches Tiefenlager angewandte stufenweise Vorgehen /BFE 08/ auf.

1. Ermittlung wichtiger Randbedingungen für das Standortsuchverfahren:

Der jeweilige Mindestflächenbedarf des Endlagers in den verschiedenen betrachteten Wirtsgesteinen stellt z.B. eine wichtige Kenngröße im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens dar. Durch den Ausstieg aus der Kernenergienutzung zur Stromerzeugung in Deutschland bis spätestens zum Jahre 2022 sind die Mengen an wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen verlässlich abschätzbar. Die Arbeiten im Vorhaben VSG können dazu als Ausgangspunkt verwendet werden. Auf Basis technisch möglicher Einlagerungskonzepte kann dann für unterschiedliche Wirtsgesteine der potenzielle Flächenbedarf für ein Endlager abgeleitet werden.

2. Vorauswahl von geologischen Standortregionen:

Im Wesentlichen durch Auswertung der Literatur werden unter Berücksichtigung der Randbedingungen anhand von vorher festgelegten Kriterien Regionen mit günstiger geologischer Gesamtsituation festgelegt. In dieser Stufe sind erste generische Sicherheitsbetrachtungen durchzuführen, deren Umfang deutlich geringer sein wird als beim Vorhaben VSG.

3. Einengung der Standortregionen und Benennung potenzieller Standorte:

In dieser Stufe werden die geologisch geeigneten Regionen weiter eingeeengt, wobei quantitative Anforderungen und Zielvorgaben an die geologische Barriere berücksichtigt werden. Endlagerkonzepte werden nach einer provisorischen Auslegung der technischen Barrieren entwickelt und potenzielle Standorte vorgeschlagen, wobei ggf. auch zusätzliche Kriterien, wie z.B. raumplanerischer und sozialökonomischer Art, einfließen. In dieser Stufe sind Sicherheitsanalysen erforderlich, jedoch nicht im Umfang des Vorhabens VSG.

4. Iterative Ermittlung von geeigneten Standorten:

Pro Standortgebiet wird mindestens ein potenzieller Standort ausgewählt. Für diese werden quantitative Sicherheitsanalysen etwa vom Umfang der Analysen im Vorhaben VSG durchgeführt und die Ergebnisse für die Standorte verglichen. Dabei wird das Rückhaltevermögen im jeweiligen Endlagersystem für die eingelagerten Radionuklide in der Nachverschlussphase aufgezeigt und auf den Beitrag der geologischen Barriere zur Langzeitsicherheit hingewiesen. Für den sicherheitstechnischen Vergleich von potenziellen Standorten wird ein Vorgehen entwickelt,

das einerseits die quantitativen Ergebnisse der vorläufigen Sicherheitsanalysen berücksichtigt und andererseits den qualitativen Aspekten der Sicherheitsbetrachtung Rechnung trägt. Im Rahmen dieser Betrachtungen können potenzielle Standorte als ungeeignet identifiziert und aus dem Verfahren ausgeschlossen oder weniger geeignete Standorte zurückgestellt werden. Am Ende des Vergleichs werden die Standorte identifiziert, die ein hohes Potenzial aufweisen, die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ erfüllen zu können, und die in der nächsten Stufe vertieft miteinander verglichen werden sollen.

5. Standortwahl:

Als letzter Schritt werden die verbliebenen potenziellen Standorte vertieft untersucht und die erforderlichen standortspezifischen geologischen Kenntnisse falls nötig mittels geowissenschaftlicher Untersuchungen vervollständigt. Auf dieser Basis werden für jeden Standort vertiefte Sicherheitsanalysen durchgeführt. Ziel der Sicherheitsanalysen in dieser Stufe ist die Klärung, ob ein Sicherheitsnachweis gemäß den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ erbracht werden kann. Am Ende dieser Stufe soll unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Sicherheitsanalysen sowie möglicher weiterer Kriterien anhand eines zuvor definierten Vergleichsverfahrens der Standort identifiziert werden.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Stufen 2 und 3, bei der noch keine umfassenden Sicherheitsanalysen wie im Vorhaben VSG erforderlich sind, sowie auf die vorläufigen Sicherheitsanalysen in den Stufen 4 und 5, bei denen ein sicherheitstechnischer Vergleich von möglichen Standorten unter Einbeziehung quantitativer Ergebnisse von Sicherheitsanalysen erfolgt und für die ggf. Daten aus dem Vorhaben VSG verwendet werden können.

7.1.3.2 Randbedingungen für einen sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten

Im Vorhaben VSG wurde eine vorläufige Sicherheitsanalyse für einen Standort im Salzgestein durchgeführt. Für andere Wirtsgesteine gibt es in Deutschland keine Analysen in vergleichbarem Tiefgang. Für einen sicherheitstechnischen Vergleich von Standorten sind immer standortspezifische Kenntnisse erforderlich. Außerdem muss der Kenntnisstand für die Standorte umfangreich genug sein, um einen Vergleich der Standorte „auf Augenhöhe“ zuzulassen und um zu vermeiden, dass ungenügende

Kenntnisse an einem Standort zu ungünstigeren oder günstigeren Aussagen gegenüber einem anderen Standort führen.

Für jeden sicherheitstechnischen Vergleich von Endlagerstandorten müssen unter Berücksichtigung der endzulagernden Abfallmengen auf die jeweilige geologische Situation zugeschnittene Endlagerkonzepte vorliegen. Da ein Endlagerkonzept die Sicherheit eines Endlagers maßgeblich beeinflusst, muss daher die Realisierbarkeit aller Konzepte bewertet werden.

Es wird davon ausgegangen, dass zukünftige Sicherheitsbewertungen, die im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens durchgeführt werden, die wesentlichen Elemente für einen Sicherheitsnachweis für ein Endlager gemäß den Empfehlungen, die von der Nuclear Energy Agency (NEA) der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zur Vorgehensweise bei einem Sicherheitsnachweis für ein Endlager für radioaktive Abfälle formuliert worden sind /NEA 13/, umfassen. Ziele, Tiefgang und Umfang dieser Bewertungen werden sich dabei nach den oben genannten Stufen im Verfahren richten müssen. Außerdem wird im Weiteren davon ausgegangen, dass im Rahmen des Standortauswahlverfahrens vorrangig Endlagersysteme mit Salzgestein und Tongestein in einen Vergleich einbezogen werden.

Auf dieser Basis wird im Folgenden bewertet, welche Erkenntnisse aus dem Vorhaben VSG sich auf ein Standortauswahlverfahren übertragen lassen, unabhängig von der betrachteten Endlagerformation.

7.1.3.3 Anwendbarkeit der methodischen Ansätze aus dem Vorhaben VSG

Die Vorgehensweise im Vorhaben VSG wurde in enger Anlehnung an die Gegebenheiten am Standort Gorleben entwickelt (s. Abb. 3.1). Wegen der Ausrichtungen des Vorhabens an den Anforderungen eines Safety Case gemäß NEA-Empfehlungen /NEA 04/ und der Erwartung, dass zukünftige sicherheitstechnische Vergleiche im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens ähnliche Elemente berücksichtigen werden, wird im Folgenden detailliert auf die einzelnen Ebenen eingegangen:

- Grundlagen,
- Endlagerplanung und Endlagerauslegung,
- Systemanalyse,

- Synthese und Empfehlungen.

Dabei erfolgt die Bewertung nur für die Zwecke eines gestuften Auswahlprozesses. Auf mögliche weiterführende Anforderungen im Rahmen eines anschließenden Genehmigungsverfahrens wird hier nicht eingegangen, denn für Analysen bis zur Genehmigungsreife fehlen noch Informationen.

Die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ und darauf aufbauend das Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG basieren auf der Sicherheitsfunktion des sicheren Einschusses der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Der sichere Einschluss wird von der geologischen Barriere im Zusammenwirken mit den technischen Barrieren (Schachtverschluss, usw.) gewährleistet. Daher ist die Integrität der geologischen und der technischen Barrieren von Bedeutung und ihre unterschiedliche Ausprägung muss bei einem Standortvergleich bewertet werden.

Grundlagen:

Die Kenntnisse zum Standort müssen in einem Standortauswahlverfahren stufengerecht vorliegen und einen sicherheitstechnischen Vergleich der verschiedenen betrachteten Standorte zulassen. Deshalb werden diese Kenntnisse in der Regel im Zuge eines Standortauswahlverfahrens durch Erkundungsmaßnahmen vertieft werden müssen. Dies kann auch untertägige Erkundungen einschließen. Über die notwendige Tiefe der geowissenschaftlichen Erkundung von potenziellen Standortregionen in Stufe 3 kann aus den Ergebnissen des Vorhabens VSG keine Aussage getroffen werden. Eine detaillierte geowissenschaftliche Standortbeschreibung und darauf aufbauend eine geowissenschaftliche Langzeitprognose sind jedoch für jeden potenziellen Endlagerstandort im Rahmen eines vorläufigen und eines abschließenden Standortvergleichs (Stufen 4 und 5) erforderlich. Die im Vorhaben VSG zum Standort Gorleben vorgelegten Dokumentationen können dafür als Maßstab angesehen werden.

Die Abfallspezifikationen und das Abfallmengengerüst werden für die Planung von Endlagerkonzepten benötigt. Mit den Ergebnissen aus dem Vorhaben VSG liegen sie in einer Form vor, die direkt als Basis für zukünftige Analysen im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens für die Stufen 4 und 5 verwendet werden können.

Das im Vorhaben VSG entwickelte Sicherheits- und Nachweiskonzept stellt eine Möglichkeit dar, die diesbezüglichen Vorgaben in den Sicherheitsanforderungen des BMU

/BMU10a/ zu erfüllen. Es ist auf die geologische Situation am Standort Gorleben ausgerichtet. Das Sicherheits- und Nachweiskonzept kann aber in wesentlichen Zügen auf andere Standorte in Salzstöcken sowie, möglicherweise mit einigen Abstrichen, auf Standorte mit Salzgestein in flacher Lagerung übertragen werden. Für Standorte in Tonformationen müsste das Sicherheits- und Nachweiskonzept inhaltlich stark überarbeitet werden, um die Spezifika des Wirtsgesteins angemessen zu berücksichtigen. Das bedeutet auch, dass bei einem Vergleich von Standorten diesen konzeptionellen Unterschieden Rechnung getragen werden muss.

Die im Sicherheitskonzept für das Vorhaben VSG verwendete Methodik zur Ableitung von konkreten Zielsetzungen und strategischen, planerischen Maßnahmen kann unabhängig vom Wirtsgestein für jeden Standort angewandt werden. Das Sicherheits- und Nachweiskonzept ist bereits für die Stufe 3 des Auswahlprozesses zu erstellen, da es Rahmenbedingungen für die Erkundung setzt, wird aber in vollem Umfang erst in den Stufen 4 und 5 zur Anwendung kommen. Im Folgenden wird auf einige Details eingegangen:

- Die im Sicherheitskonzept des Vorhabens VSG angeführten **Zielsetzungen** (Z1 bis Z14; siehe /MÖN 12/ und Kap. 4.1.2) sind auf alle Standorte in Salzstöcken und in Salzgestein mit flacher Lagerung anwendbar. Für andere Wirtsgesteine sind die Zielsetzungen Z1 und Z2 (Zutritt von geringen oder sehr geringen Lösungsmengen), Z4 (gute Charakterisierbarkeit des Salzgesteins) und Z11 (Vermeidung der Zersetzung von kristallwasserhaltigen Mineralen) anzupassen, wobei die Zielsetzungen Z1 und Z2 entfallen, weil ein Lösungszutritt zu den eingelagerten radioaktiven Abfällen in anderen Formationen als Salzgestein naturgemäß nicht zu verhindern ist.
- Die aus den Zielsetzungen abgeleiteten **Maßnahmen** sind generell auf andere Standorte in Salzstöcken und in Salzgestein mit flacher Lagerung anwendbar, müssen aber ggf. erweitert und angepasst werden. Für andere Wirtsgesteine sind zumindest die Maßnahmen, die in Zusammenhang mit den Zielsetzungen Z1, Z2 und Z4 stehen (s. oben), entsprechend zu ändern. Für die übrigen Maßnahmen gilt bezüglich der anderen Formationen – ohne Anspruch auf Vollständigkeit: Die Maßnahme M1 (kleines aufgefahreneres Volumen und gebirgsschonende Verfahren) kann unverändert auf alle Formationen angewendet werden. Für die Maßnahme M2 (gut charakterisierbarer Bereich des Salzgesteins mit homogenen Strukturen bezogen auf die Einschlusseigenschaften), muss eine entsprechende Definition für andere Wirtsgesteine gefunden werden. Die Maßnahme M3 entfällt (Einlagerungs-

bereiche im Staßfurt-Hauptsalz). Die Maßnahme M4 (Einhalten eines Sicherheitsabstands zu potenziell wasserführenden Schichten) entfällt eventuell, kann aber ggf. durch eine ähnliche Maßnahme für andere Wirtsgesteine ersetzt werden. Die Maßnahme M5 (Errichtung von Verschlussbauwerken) muss für andere Wirtsgesteine umformuliert werden, bleibt aber inhaltlich erhalten. Die Maßnahme M6 (Einbringen von Salzgrusversatz) muss ersetzt werden durch eine analoge Maßnahme für anderes Versatzmaterial. Die Maßnahme M7 (Einbringen von angefeuchtetem Salzgrus in Richtstrecken) kann entfallen oder muss ggf. ersetzt werden durch eine Angabe eines anderen Versatzmaterials. Die Maßnahmen 8-11 können auch auf andere Wirtsformationen angewendet werden. Die Maßnahme M12 (Forderung nach Abstand zu lösungsführenden Schichten) muss geeignet modifiziert werden, z. B. durch Forderung eines Abstands zu Klüften. Die Maßnahme M13 (ausreichende Teufenlage des Einlagerungshorizonts) kann sinngemäß auf alle Formationen angewendet werden. Die Maßnahme M14 (Einlagerung in Salzstöcken, bei denen der Salzaufstieg praktisch abgeschlossen ist) entfällt. Die Maßnahme M15 (Begrenzung der Temperatur auf 200 °C) muss durch ein entsprechendes Temperaturkriterium für andere Formationen ersetzt werden. Im Falle von Tongestein wäre z. B. eine Maximaltemperatur von ca. 100 °C einzuhalten. Die Maßnahme M16 (Vermeidung von Gas-Fracs) muss entsprechend für andere Formationen umformuliert werden. Die Maßnahme M17 (Vermeidung von Kritikalität) kann unverändert auf alle Formationen angewendet werden.

- Die in den Sicherheitsanalysen zu erbringenden **Nachweise** (Integritätsanalyse und sicherer Einschluss) sind im Wesentlichen durch die Sicherheitsanforderungen des BMU vorgegeben. Die Nachweise und die Vorgehensweise zur Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs lassen sich auf alle Wirtsformationen anwenden. Hierbei ist anzumerken, dass sich die Forderung, den Integritätserhalt anhand des Dilatanz- und Fluidruckkriteriums nachzuweisen, in /BMU 10a/ nur auf Salinar- und Tongesteine bezieht.

Endlagerplanung und Endlagerauslegung:

Endlagerplanung und -auslegung sind wesentliche Elemente der Stufen 3 und 4 des einleitend angegebenen Einengungsprozesses; Grundkonzepte sind aber auch für die Stufen 1 und 2 erforderlich. Die im Vorhaben VSG verwendeten Endlagerkonzepte wurden in einem iterativen Prozess auf Basis des Sicherheitskonzepts für einen konkreten Standort entwickelt. Sie basieren auf einer Einlagerung der Abfallgebände in

horizontalen Strecken (Streckenlagerung), 300 m langen vertikalen Bohrlöchern (Bohrlochlagerung) sowie einer Variante mit kurzen horizontalen Bohrlöchern, siehe Kapitel 5.1.2).

Diese Endlagerkonzepte sind nach standortspezifischen Anpassungen der geometrischen Konturen auf andere Standorte in Salzstöcken übertragbar. Auf Standorte im Salinar mit flacher Lagerung und auch Tonsteinformationen sind nur die Streckenlagerung sowie die Einlagerung in kurzen vertikalen oder horizontalen Bohrlöchern prinzipiell übertragbar. In jedem Fall müssen auf die jeweilige geologische Situation angepasste Konzepte erarbeitet werden.

Ein wichtiger Aspekt der im Vorhaben VSG entwickelten Endlagerkonzepte ist der Porenspeicher im Infrastrukturbereich, der über lange Zeit erhalten bleibt und eventuell über den verschlossenen Schacht zutretende Lösungen aufnehmen kann, bevor sie in die Einlagerungsbereiche gelangen können. Wegen der praktischen hydraulischen Undurchlässigkeit des Wirtsgesteins ist ein Lösungszutritt fast ausschließlich über den Schachtbereich möglich und es ist daher für Konzepte in Salzformationen möglich, den Ort für diesen Porenspeicher zu planen. Wegen der Bedeutung dieses Porenspeichers ist zu prüfen, ob dieses Konzept für andere Salzstandorte oder andere Wirtsgesteine sicherheitstechnische Vorteile bieten kann.

Ein weiterer sicherheitsrelevanter Aspekt ist die weitgehende hydraulische Trennung von Erkundungs- und Einlagerungssohlen. Diese Trennung sollte auch bei zukünftigen Endlagerkonzepten verfolgt werden – auch für andere Wirtformationen als Salz.

Der methodische Ansatz zur Entwicklung von Endlagerkonzepten auf Basis des Sicherheitskonzeptes lässt sich auf beliebige Standorte und Endlagersysteme übertragen. Für die Zwecke eines Standortauswahlverfahrens ist von Bedeutung, dass die Endlagerkonzepte in ihren Grundzügen keine Elemente aufweisen dürfen, die erhebliche Zweifel an ihrer technischen Umsetzbarkeit und im Hinblick auf die betriebliche Sicherheit entstehen lassen. Der Ansatzpunkt und der Tiefgang der Prüfungen dieser Aspekte im Rahmen des Vorhabens VSG kann für diesen Zweck als Orientierung dienen.

Systemanalyse:

Die Systemanalyse setzte im Vorhaben VSG mit der Erstellung eines FEP-Katalogs und der Entwicklung von Szenarien an. Der FEP-Katalog kann prinzipiell für jeden anderen Standort in einem Salzstock verwendet werden. Je nach Standort sind aber ggf. Anpassungen des FEP-Katalogs bezüglich standortbezogener Parameter, wie z. B. der Stärke von zu berücksichtigenden Erdbeben, der Mächtigkeit von Eisüberfahrungen bei Kälteperioden, der Transgression und Regression sowie Ergänzungen geologischer Prozesse erforderlich.

Insbesondere wenn Standorte in unterschiedlichen Wirtformationen miteinander verglichen werden, müssen frühzeitig entsprechende Informationen für alle Wirtgesteine zusammengefasst vorliegen. Diese können bei frühen Stufen (insbesondere in Stufe 2) im Einengungsprozess möglicher Standorte noch in generischer Form vorliegen. Bei einem abschließenden Vergleich von Standorten (Stufe 4) müssen dagegen standortspezifische FEP-Kataloge Grundlage der Systemanalyse sein.

Bei der Szenarientwicklung wurde im Vorhaben VSG eine neue Methodik verwendet, die eine Zuweisung von Wahrscheinlichkeitsklassen für die verschiedenen Szenarien, wie von den Sicherheitsanforderungen /BMU 10a/ gefordert, erlaubt. Es wurde ein Referenzszenarium entwickelt, das die Gesamtheit möglichst vieler als wahrscheinlich einzustufender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems umfasst. Nach einer fest vorgegebenen Methode wurden davon ausgehend Alternativszenarien entwickelt, die in mindestens einem Aspekt eine weniger wahrscheinliche Entwicklungsmöglichkeit enthalten. Die Methodik ist auf andere Endlagerstandorte und Endlagersysteme übertragbar.

Die Vorgehensweise bezüglich Integritätsanalysen und Konsequenzenanalysen ist im Vorhaben VSG durch die Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ im Wesentlichen vorgegeben. Sie basiert einerseits auf der Untersuchung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und andererseits der Konsequenzen am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Dies hat sich bewährt und kann für andere Standorte, auch in anderen Formationen, angewendet werden. Inwiefern die berechneten Ergebnisse für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich an Standorten in verschiedenen geologischen Formationen verglichen werden können, ist jedoch noch zu klären. Integritätsanalysen können in begrenztem Umfang bereits in der Stufe 2 des

Einengungsprozesses eingesetzt werden, die Konsequenzenanalysen sind jedoch nur in den Stufen 3 bis 5 anwendbar.

Bei den numerischen Analysen für unterschiedliche Wirtsgesteine sind gegebenenfalls unterschiedliche Werkzeuge (Computercodes usw.) und Modellansätze einzusetzen, um den unterschiedlichen Charakteristika gerecht zu werden. Dies betrifft alle Stufen des Auswahlprozesses, in denen quantitative Ergebnisse in Entscheidungen einfließen, z. B. bei der Untersuchung der Integrität der geologischen Barriere. Derartige Ergebnisse, die mit den im Vorhaben VSG eingesetzten Werkzeugen ermittelt wurden, sind bei einem Standortvergleich auch für andere Standorte und Wirtformationen zu ermitteln.

Menschliche Aktivitäten, die in der Zukunft zu einem unbeabsichtigten Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen können (Human Intrusion), wurden im Vorhaben VSG untersucht. Auf Basis von systematisch abgeleiteten Human-Intrusion-Szenarien wurden Ansätze für eine mögliche Optimierung der Endlagerkonzepte identifiziert. In ähnlicher Form lässt sich die gewählte Vorgehensweise auf andere Standorte übertragen; sie ist von der Methodik her in jeder Stufe des Einengungsprozesses anwendbar. Für Standorte im Steinsalz sind die Ergebnisse der Untersuchungen zu Human Intrusion-Szenarien zu großen Teil auch inhaltlich übertragbar. Von den gewählten Grundszenarien wären allenfalls die Szenarien des Auffahrens eines neuen Bergwerks und des Abteufens einer Bohrung mit geringen Modifikationen auf Tonsteinstandorte adaptierbar. Das Szenarium Kavernensolung ist, da eindeutig salzspezifisch, nicht auf andere Wirtsgesteinsformationen übertragbar. Weiterhin ist im Fall von Tonsteinstandorten zu überprüfen, welche weiteren Szenarien zu einer Beeinträchtigung des Barrierensystems führen können. Zurzeit ist allerdings noch ungeklärt, in welchem Umfang der Aspekt Human Intrusion im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens überhaupt zu berücksichtigen ist.

Synthese:

Die im Vorhaben VSG gewählte Form der Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse in Form eines Syntheseberichtes sowie in abgeleiteten Empfehlungen kann auf andere Standorte übertragen werden. In den Stufen 4 und 5 stellt sie eine gute Basis für Vergleiche dar, wobei sich der Tiefgang dieser Berichte an der Zielsetzung der jeweiligen Stufe des Verfahrens orientieren wird. In Erweiterung dieser Vorgehensweise wird die zusätzliche Erstellung eines reinen Ergebnisberichts mit einer

kompakten, übersichtlichen Darstellung aller Ergebnisse für einen Vergleich von Standorten als nützlich erachtet.

7.1.3.4 Umgang mit Ungewissheiten

Im Sicherheits- und Nachweiskonzept des Vorhabens VSG wird gemäß den Auflagen der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ auf den Umgang mit Ungewissheiten detailliert eingegangen. Die Ungewissheiten betreffen die vorliegenden Standortdaten, die modellhafte Vorstellung des Endlagersystems, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems aber auch die Beschreibung einzelner Prozesse und das Zusammenwirken von Prozessen. Sie werden in der Regel in Szenariungewissheiten (Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems), Daten- und Parameterungewissheiten sowie Modellungewissheiten eingeteilt.

Die Ungewissheiten über die Eigenschaften des Standortes und die dort ablaufenden Prozesse lassen sich durch weitere Erkundungen verringern, aber niemals ganz beseitigen. Die im Vorhaben verwendeten Methoden zum Umgang mit den verschiedenartigen Ungewissheiten sind international etabliert, wie z. B. die Betrachtung verschiedener Szenarien und die Bewertung der Auswirkungen von verschiedenen Parameterwerten auf die errechneten Ergebnisse. Mit diesen Methoden ist eine Aussage zum Vertrauensgrad in die Modellergebnisse möglich. Im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens bestehen je nach Erkundungsstand und geologischer Beschaffenheit eines Standorts stets unterschiedlich große Ungewissheiten, mit denen stufengerecht umgegangen werden muss. Die Herausforderung liegt in einer vergleichenden Bewertung von Ergebnissen für zwei verschiedene Standorte auf Basis von quantitativen Modellergebnissen, die ihrerseits jeweils Ungewissheiten aufweisen. Die hierdurch bei einem Vergleich von Standorten möglicherweise verursachte Problematik lässt sich anhand der Ergebnisse des Vorhabens VSG nicht klären. Dazu sind noch geeignete Bewertungsmethoden zu entwickeln.

Durch vertiefte Erkundungen von Standorten in den Stufen 4 und 5 werden die Ergebnisse bei einer Standortauswahl besser vergleichbar sein. Wichtig ist, dass auf jeder Stufe des Einengungsprozesses die Datenlage zu den Standorten einen sicherheitstechnischen Vergleich auf Augenhöhe zulässt.

Die prinzipielle Vorgehensweise im Vorhaben VSG zum Umgang mit den bestehenden, z. T. inhärenten Ungewissheiten ist auf Sicherheitsbetrachtungen für andere Standorte in unterschiedlichen geologischen Situationen anwendbar. Dies schließt auch standortspezifisch die Verwendung von plausiblen, fachlich begründeten Annahmen ein, insbesondere wenn die Ungewissheiten aus zeitlichen Gründen auf der aktuellen Stufe nicht durch zusätzliche Erkundungsarbeiten bzw. durch ein gezieltes F&E Programm reduziert oder beseitigt werden können.

Zu Modellungsgewissheiten wurde im Rahmen des Vorhabens VSG keine systematische Untersuchung durchgeführt. Hier besteht noch F&E-Bedarf. Es ist nicht ausreichend, alle Modellungsgewissheiten auf Parameterungewissheiten abzubilden, wie dies in der Vergangenheit vereinzelt versucht wurde. Zum Aspekt der Modellungsgewissheiten lässt sich daher keine Aussage über die Anwendung bei der Standortauswahl treffen.

7.1.3.5 Sensitive Parameter und Prozesse

Im Folgenden werden einige als wichtige Einflussgrößen identifizierte Parameter und Prozesse im Zusammenhang mit der Standortauswahl diskutiert.

- Die Mächtigkeit des Wirtsgesteins und des Deckgebirges und seine Eigenschaften sind wesentlich für die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere. Wegen der Länge des zu betrachtenden Zeitraums für die Sicherheitsanalysen (eine Million Jahre) können geologische Prozesse (Kaltzeiten, Subrosion, Diapirismus, usw.) dazu führen, dass die Oberkante des Wirtsgesteins in größere Tiefen verlagert wird und schließlich den einschlusswirksamen Gebirgsbereich erreicht oder dass Wegsamkeiten zwischen Einlagerungshorizont und Deckgebirge entstehen, so dass die geologische Barriere ihre Schutzfunktion verliert. Daraus leiten sich standortspezifische Anforderungen an die Mächtigkeit des Wirtsgesteins und damit auch an die Teufenlage der Einlagerungsbereiche und des sie umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ab. Die Mächtigkeit des Wirtsgesteins muss daher an jedem potenziellen Standort im Zusammenwirken mit den zu erwartenden geologischen Prozessen bewertet werden.
- Die integrale Permeabilität von Verschlussbauwerken ist im Vorhaben VSG die wesentliche Einflussgröße bei der Bestimmung des Zuflusses von Lösungen in das Grubengebäude. Es müssen daher für alle Standorte geeignete Einbauorte für diese Verschlussbauwerke identifiziert werden, um günstige Werte für die integrale

Permeabilität zu gewährleisten. Dies gilt insbesondere für die Abdichtung von Zugangsschächten.

- Bei Salzstandorten ist zu berücksichtigen, dass der Feuchtegehalt von Salzgrusversatz Einfluss auf dessen Kompaktion durch Gebirgskonvergenz hat. Bei hohem Feuchtegehalt kompaktiert der Versatz schneller als im trockenen Zustand und erreicht schneller eine Dichtwirkung, die in der Größenordnung wie diejenige des umgebenden Gesteins ist. Ein hoher Feuchtegehalt führt aber auch dazu, dass sich Lösungen im Porenraum des Grubengebäudes sammeln und diesen komplett ausfüllen können. Dadurch entstehen potenzielle Transportmöglichkeiten für Radionuklide aus den eingelagerten Abfällen. Im Rahmen der Standortauswahl sollte das Konzept bezüglich des Feuchtegehalts von Salzgrusversatz optimiert werden. Siehe auch die folgenden Anmerkungen zur Gasbildung.
- Die Gasentwicklung im Grubengebäude ist an die Verfügbarkeit von Wasser gekoppelt. Eine hohe Gasproduktion und große Gasmengen können zu einer schnellen und starken Ausbreitung von Radionukliden in der Gasphase (Gaspfad) führen. Daher ist empfehlenswert, die Menge des Wassers im Grubengebäude stark zu beschränken, beispielsweise durch Trocknung von Abfällen, Trocknung von Versatz vor dem Einbringen usw. Aufgrund der praktischen Dichtheit der Salzgesteine gilt dies insbesondere für Salzstandorte, in abgeschwächter Form jedoch auch für solche in Tonsteinformationen.

7.1.3.6 Anforderungen und Kriterien für die Standortauswahl

Aus den Ergebnissen des Vorhabens VSG lassen sich nur Anforderungen und Kriterien für einen Endlagerstandort im Salzgestein ableiten. Dies sind:

- Das Endlagerbergwerk muss in ausreichender Tiefe eingerichtet werden können, damit die überdeckenden Salzsichten ausreichend mächtig sind, um die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum auch unter Berücksichtigung der mächtigkeitsmindernden geologischen und klimatischen Prozesse zu gewährleisten.
- Es muss am Standort einen ausreichend großen Salzgesteinsbereich mit weitgehend homogenen und günstigen Eigenschaften (z. B. geringer Feuchtegehalt, hohe Kriechfähigkeit etc.) geben, in dem der gesamte Einlagerungsbereich untergebracht werden kann.

- Der homogene Salzbereich in der Endlagertiefe muss eine genügende Ausdehnung in alle Richtungen haben, damit die Sicherheitsabstände zu möglicherweise lösungsführenden Gesteinsschichten eingehalten werden können.
- Bei der Erkundung von potenziellen Standorten ist darauf zu achten, dass der geplante Einlagerungshorizont und der diesen umgebende einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht durch Erkundungsbohrungen beschädigt werden. Dazu müssen die Bohrungen einen der Ausdehnung des jeweils projektierten einschlusswirksamen Gebirgsbereichs entsprechenden Sicherheitsabstand zu geplanten Einlagerungsbereichen haben.
- Schächte sollten in solchen Bereichen im Salzgestein abgeteuft werden, die sich durch Verschlüsse effektiv abdichten lassen.

7.1.3.7 Fazit

Das im Vorhaben VSG gewählte methodische Vorgehen ist geeignet, auf andere Standorte übertragen zu werden. Für Endlager in Salzstöcken (und weitestgehend auch für flach gelagerte Salzstrukturen mit Ausnahme des Konzeptes für die Bohrlochlagerung) ist die direkte Übertragung der Methodik auch inhaltlich möglich. Unterschiede ergeben sich je nach Erkundungsstand im Umfang der Ungewissheiten und damit zu treffenden Prämissen und Annahmen zu den Standortverhältnissen sowie den Prämissen hinsichtlich der standortspezifischen Endlagerkonzepte.

Eine sicherheitliche Bewertung eines Standortes ist nur auf der Grundlage eines konkreten Einlagerungs- und Verschlusskonzeptes möglich. Daher setzt ein Standortvergleich konkrete Einlagerungs- und Verschlusskonzepte voraus. Bisher sind in Deutschland Endlagerkonzepte in einer Planungstiefe, wie sie für die Beurteilung von Endlagersystemen im Rahmen eines Standortauswahlverfahrens benötigt werden, nur für Salzstöcke vorhanden.

Für die Integritätsanalysen und die Auslegung der Verschlussysteme hat es sich im Vorhaben VSG als vorteilhaft erwiesen, dass für den Standort Ergebnisse von geotechnischen Messungen vorlagen, die unterbrechungsfrei seit dem Auffahren des Bergwerks erhoben worden sind. Es wird empfohlen, dass diese Vorgehensweise auch bei allen Standorten, die im Rahmen der zukünftigen Standortauswahl untertägig erkundet werden, verfolgt wird.

7.2 Empfehlungen

7.2.1 Weitere Konzeptoptimierung

Aus den Ergebnissen der Systemanalysen, d. h. der Integritätsanalysen /KOC 12/ und der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/, wurden Vorschläge zur Optimierung der Endlagerkonzepte abgeleitet. Diese im Nachfolgenden beschriebenen Modifikationen betreffen die Behälter- und Auffahrungskonzepte und dienen dazu, die Systemrobustheit im Hinblick auf den Einschluss von Radionukliden im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu steigern.

7.2.1.1 Restfeuchte in den Abfallgebinden

Aufgrund der hohen Metallmassen in den Einlagerungsbereichen ist die zur Verfügung stehende Feuchtigkeitsmenge der limitierende Faktor für die Korrosion und die damit verbundene Gasbildung. Wenn, wie bei den im Vorhaben VSG entwickelten Verschlusskonzepten, der Zutritt von externen Deck- und Nebengebirgslösungen zu den Abfällen weitgehend verhindert werden kann, so resultieren die zur Korrosion zur Verfügung stehende Wassermassen neben den Lösungsmengen, die aus der thermochemischen Sulfatreduktion der Kohlenwasserstoffvorkommen im Hauptsalz stammen, in erster Linie aus der geringen Lösungsmenge, die mit der Restfeuchte des „trockenen“ Salzgrusversatzes eingebracht wird, und der initial in den Behältern enthaltenen Restfeuchte.

Weiterhin haben sich nach den Ergebnissen der radiologischen Konsequenzenanalyse insbesondere die Restwassergehalte der verpressten Brennelement-Strukturteile, die auf überschlägigen Abschätzungen beruhen, für die frühe Nachbetriebsphase als äußerst sensitiv für die Mobilisierung gasförmiger Radionuklide aus der instant release fraction herausgestellt (Kap. 5.2.3).

Aus diesen Gründen wird empfohlen, die Restfeuchten in den Abfallgebinden zukünftig

- möglichst genau zu bestimmen und behälter-, zumindest jedoch chargenweise zuverlässig zu deklarieren und

- diese nötigenfalls durch geeignete Konditionierungsmaßnahmen weiter zu reduzieren. Dies kann zum Beispiel durch Trocknung oder bei einem Teil der Mischabfälle ggf. durch Veraschung geschehen.

Hierdurch würde auch eine weitere Optimierung im Sinne der mit den sicherheitskonzeptionellen Maßnahmen 8 und 16 (vgl. Kap. 4.1.2 und 5.1.1.2) verbundenen Forderung nach einer Minimierung der Restfeuchte erfolgen.

7.2.1.2 Gasdichtheit der Endlagerbehälter

Zur Minimierung der Freisetzung von gasförmigen Radionukliden aus der instant release fraction (IRF) wird empfohlen, zusätzlich zu den Brennelement-Behältern die Anforderung der Gasdichtigkeit über einen Zeitraum von 500 Jahren auch an die Behälter für Brennelement-Strukturteile zu stellen. Bei der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/ wurde als Annahme für alle (intakten) POLLUX[®]-Behälter eine Gasdichtigkeit über 500 Jahre als Prämisse unterstellt. Aufgrund der Wandstärke dieser Behälter und der nur sehr geringen für Korrosionsprozesse zur Verfügung stehenden Lösungsmengen, kann aus heutiger Sicht die Anforderung als erfüllbar angesehen werden. Die technische Umsetzbarkeit dieser Anforderung ist für zukünftige Genehmigungsverfahren jedoch noch nachzuweisen.

Wie bereits in Kapitel 5.2.3 und 6.2.3 angemerkt, konnte bei den dort getroffenen Annahmen für eine Freisetzung von gasförmigen Radionukliden für die frühe Nachverschlussphase der vereinfachte radiologische Nachweis nur dann geführt werden, wenn auch für die Behälter mit Brennelement-Strukturteilen eine Gasdichtheit unterstellt wird. Im Falle der bei der Endlagerplanung /BOL 12/ vorgesehenen Lagerung der Strukturteile in Gussbehältern (Typ II, Mosaik-Behälter) musste, da bei diesen keine Anforderung für die Nachverschlussphase bestehen, bei der radiologischen Konsequenzenanalyse eine quasi instantane Freisetzung gasförmiger Radionuklide aus der IRF unterstellt werden, was zu hohen errechneten RGI-Werten führte. Aus diesem Grund wird auch für die Brennelement-Strukturteile eine Einlagerung in gasdichten POLLUX[®]-Behältern empfohlen.

7.2.1.3 Schachtnahes Endlagerdesign

Entfall der nördlichen Richtstrecke:

Bei den Integritätsanalysen zur geologischen Barriere /KOC 12/ wurde festgestellt, dass in der frühen Nachverschlussphase aufgrund unterschiedlicher Gasdrücke Druckausgleichsströmungen zwischen Ost- und Westflügel über den Streckenverschluss der nördlichen Richtstrecke stattfinden (vgl. Kap. 5.1.2.3 und 5.2.3). Im Sinne einer robustheitssteigernden Optimierung zukünftiger Endlagerkonzepte wird empfohlen, auf eine direkte Verbindung zwischen den Einlagerungsbereichen für die wärmeentwickelnden und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfälle zu verzichten. Im konkreten Fall bedeutet dies den Entfall der nördlichen Richtstrecke, angedeutet in Abb. 7.1.

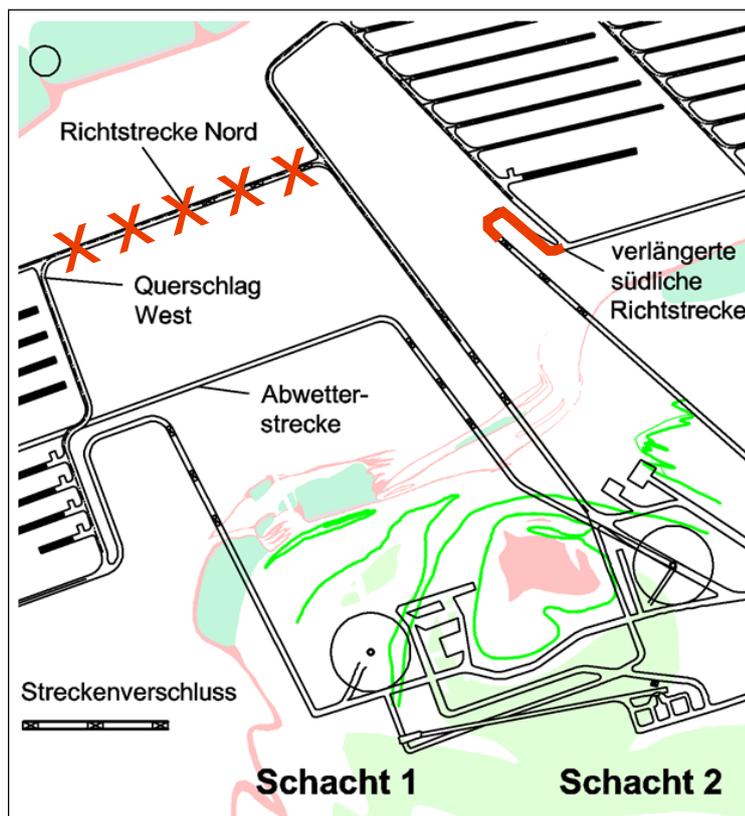


Abb. 7.1 Endlagerkonzeptoptimierung: Entfall der nördlichen Richtstrecke und Verlängerung der südlichen Richtstrecke

Vergrößerung der Distanz zwischen dem Streckenverschluss in der südlichen Richtstrecke und dem Einlagerungsort der Brennelement-Strukturteile:

Bei der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/ ergab sich im Ergebnis dreier Rechenfälle (PV-R3, PV-A4 und WI-A5), bei denen eine verbleibende Restporosität von 2 % bei Annahme advektiven Transportes und langsamer Salzgruskompaktion unterstellt wurde, dass eine Lösungsaufsättigung der schachtnahen Einlagerungsfelder im Ostflügel stattfindet. Zwar ist das Maximum der Aktivitätsströme in allen drei Rechenfällen annähernd gleich und mit weniger als $1 \cdot 10^{-5}$ Bq/a (1 Zerfall in 100.000 Jahren) äußerst niedrig und damit nur als Rechengröße zu betrachten. Dennoch wird, da der Hauptbeitrag durch die Radionuklide aus der für die Einlagerung von Strukturteilen vorgesehenen Strecke Ost 12.7 geliefert wird, im Sinne einer weiteren Robustheitssteigerung des entwickelten Streckenlagerungskonzeptes empfohlen, die Distanz zwischen der Einlagerungsstrecke für die Brennelement-Strukturteile und dem nächsten Streckenverschluss zu vergrößern.

Dies kann nach /BOL 12/ durch zwei verhältnismäßig einfach zu realisierende Endlager-Designmodifikationen erreicht werden:

- Verlängerung des Weges zwischen dem Streckenverschluss zum Schacht und der Einlagerungskammer (Abb. 7.1) oder
- Integration der Einlagerungskammer in die Mitte des Feldes 12 (z. B. Strecke 4), um eine deutliche Beschleunigung der Konvergenz aufgrund des thermischen Einflusses durch die in den Nachbarstrecken eingelagerten POLLUX[®]-Behälter mit bestrahlten Brennelementen zu erreichen (Abb. 7.2).

Welche der beiden Optimierungsmöglichkeiten zukünftig zu bevorzugen ist, kann abschließend erst nach einer Bewertung der jeweiligen langzeitlichen Auswirkungen entschieden werden.

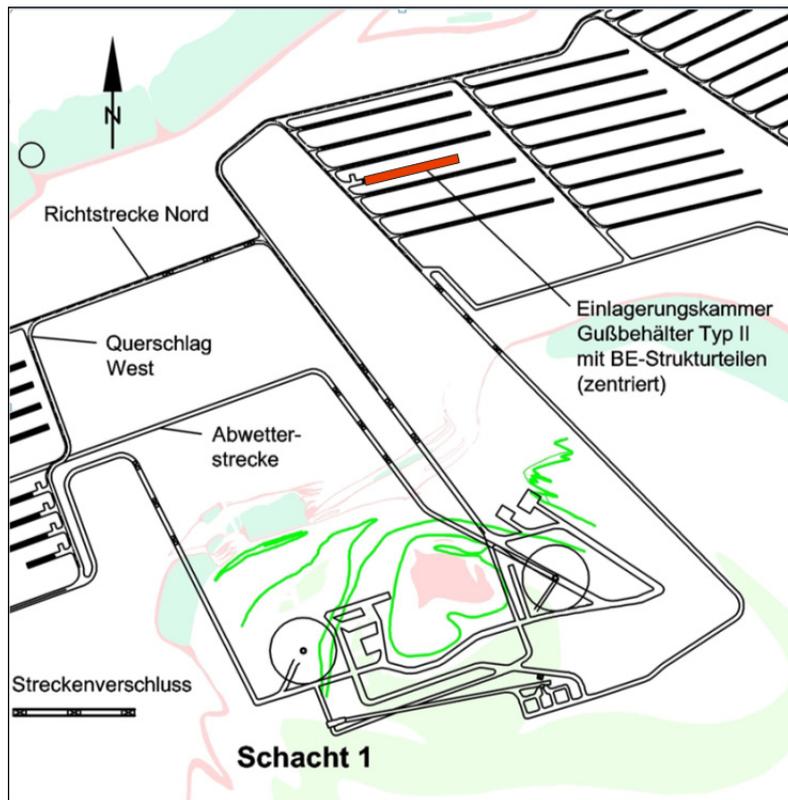


Abb. 7.2 Endlagerkonzeptoptimierung: Zentrale Lage der Einlagerungskammer für die Brennelement-Strukturteile in Feld Ost 12

7.2.2 Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Im Nachfolgenden wird der im Vorhaben VSG ermittelte wesentliche Forschungs- und Entwicklungsbedarf zusammengestellt, der auch bereits im Zusammenhang mit den Ausführungen in Kapitel 5 thematisiert wurde. Es handelt sich um Forschungs- und Entwicklungsbedarf zu den Themenfeldern:

- Kohlenwasserstoffvorkommen im Hauptsalz
- Behälter- und Rückholungskonzepte
- Einlagerungsbetrieb
- Verschlussbauwerke
- Hydraulische und mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz
- Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse

Bezüglich weiteren F&E-Bedarfs, der in den verschiedenen Arbeitspaketen der VSG systematisch identifiziert wurde, sei auf die einzelnen Arbeitspaket-Abschlussberichte und den zusammenfassenden Bericht /THO 13/ verwiesen.

7.2.2.1 Kohlenwasserstoffvorkommen im Hauptsalz

Die im Vorhaben VSG durchgeführten Untersuchungen zur Sicherheitsrelevanz der Kohlenwasserstoffvorkommen im Hauptsalz (z2HS) ergaben, dass aus geomechanischen, hydromechanischen oder geochemischen Prozessen, die bei Anwesenheit von Kohlenwasserstoffen vor allem infolge thermochemischer Sulfatreduktion ablaufen, aus heutiger Sicht keine nachteilige Beeinflussung der Integrität der geologischen Barriere zu erwarten ist. Die Gründe hierfür werden ausführlich in /BRA 12/ und zusammenfassend in Kapitel 5.1.3 dargelegt. Diese Einschätzungen zur Sicherheitsrelevanz, die mangels entsprechender experimenteller Befunde häufig auf Analogieschlüssen beruhen, die aus den Eigenschaften nicht-kohlenwasserstoffhaltiger Lösungsvorkommen abgeleitet wurden, sollten durch zukünftige F&E-Arbeiten abgesichert werden. Nach /BRA 13/ sollten dabei folgende Forschungsschwerpunkte berücksichtigt werden:

Mineralogische Aspekte:

- Entwicklung von strukturgeologischen Modellen zu Genese, Transport und Mobilität von Kohlenwasserstoffen in Salzstöcken
- Mikrostrukturuntersuchungen zur Verteilung und Mobilität von Fluiden im Intergranularraum von Kernproben (z. B. mittels Kryo-SEM oder orts-auflösender Spurenanalytik)
- Porendruckbestimmungen an Fluideinschlüssen
- Weiterentwicklung geophysikalischer Messverfahren zur zerstörungsfreien Detektion und Quantifizierung von Kohlenwasserstoffen im Salzgebirge

Geochemische Aspekte:

- qualitative und quantitative Abschätzung der Stoffumsätze und deren Kinetik → Potential für geomechanische Wechselwirkungen (z. B. thermische Expansion/Fluidruckanstieg)

- temperaturabhängige thermodynamische Gleichgewichtsmodellierung der thermochemischen Sulfatreduktion (TSR)
- Bestimmung von Aktivierungsenergien der TSR
- Bestimmung der Reichweite möglicher Stoffumwandlungs- oder Zersetzungsreaktionen (z. B. TSR) im Salzgestein unter Temperatureinfluss (auch mit Wasserstoff)
- Untersuchung der komplexierenden Wirkungen der Degradationsprodukte der Kohlenwasserstoffe sowohl organischer als auch anorganischer Art auf Radionuklide → Quellterm
- Korrosion von Abfallbehältern und Veränderung des geochemischen Milieus in Gegenwart von Kohlenwasserstoffen (Wasserfreisetzung/Gasbildung)
- Modellentwicklung zur quantitativen Bewertung von Stoffumsätzen auf geochemischer Basis (Wasserfreisetzung/Gasbildung)

Geomechanische Aspekte:

- Experimentelle Untersuchungen
 - zu Auswirkungen der Kohlenwasserstoffgehalte auf die mechanischen Eigenschaften der Salzgesteine (Kriechverfestigung bzw. Entfestigung sowie Porendruckeffekte) → Verbesserung Langzeitprognose
 - zur Reichweite der Reaktionen im Salzgestein unter Temperatureinfluss → Stofftransportprozesse/Rissbildungsprozesse
- Modellrechnungen in verschiedenen Skalen (Mikro-/Feldmaßstab) zur Bewertung der Konsequenzen möglicher Volumenveränderungen bei einer thermochemischen oder mikrobiellen Sulfatreduktion sowie lokaler Porendruckeffekte im Hinblick auf die Spannungsverhältnisse im Salzstock
- Weiterentwicklung vorhandener geomechanischer Modellierungstools für Integritätsanalysen unter Berücksichtigung von THMC-Prozessen sowie der geologischen Diskontinuitäten

7.2.2.2 Behälter- und Rückholungskonzepte

Für die zu berücksichtigende Art und Menge von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen wurden in der Konzeption Endlagerbehälter ausgewählt, die geeignet erscheinen, die an sie gestellten Anforderungen zu erfüllen. Für keinen dieser Behälter gibt es bisher genehmigungsreife Planungen oder bereits erteilte Zulassungen. Insofern wird es als notwendig angesehen, die Behälter bis zur Genehmigungsreife weiterzuentwickeln. Aufgrund der erstmalig im Vorhaben VSG untersuchten Rückholbarkeit der Behälter im Zeitraum der Betriebsphase ergibt sich darüber hinaus folgender spezieller Entwicklungsbedarf:

- **Eignung der im Vorhaben VSG vorgesehenen Behälter im Hinblick auf ihre Rückholbarkeit:** Sowohl in der Konzeption der Abfallbehälter als auch in zukünftigen Demonstrationsversuchen ist zu zeigen, dass die Behälter für wärmeentwickelnde Abfälle so dimensioniert sind, dass sie im Falle der Rückholung die auftretenden Zugkräfte unter Praxisbedingungen schadlos überstehen. Weiterhin ist die Bergbarkeit von Behältern über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Endlagerverschluss im Sinne der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10a/ noch im Rahmen von Genehmigungsverfahren bzw. bei Zulassung der Behälter nachzuweisen. Dabei sind lokale Effekte, wie z. B. Lochfraß-, Korngrenzen- oder Spannungsrisskorrosion, die unter Endlagerbedingungen auftreten können, im Hinblick auf die Aerosolfreisetzung ebenso wie eine mögliche Versprödung der Behälter durch Wasserstoff zu untersuchen. Weiterhin ist die mechanische Stabilität der Behälter und Bohrlochverrohrung über 500 Jahre nach Endlagerverschluss gegenüber dem auflaufenden Gebirgsdruck und der mechanischen Belastung der Behälter während der Bergung nachzuweisen. Gegebenenfalls resultiert hieraus weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf z. B. zur Entwicklung korrosionsarmer Behältermaterialien oder korrosionshemmender Beschichtungen.
- **Weiterentwicklung des Konzeptes zur Rückholung von Kokillen aus tiefen verrohrten Bohrlöchern:** Im Vorhaben VSG wurde ein prototypisches Konzept zur Rückholung von Abfällen aus verrohrten Bohrlöchern (Variante C) entwickelt. Insbesondere die Machbarkeit der Handhabungsvorgänge zum Freilegen und Lösen der Kokille (Absaugen, Rütteln etc.) aus der Verrohrung unter Praxisbedingungen ist noch zu demonstrieren und muss weiterentwickelt und optimiert werden. Dabei geht es auch um die Optimierung der Eigenschaften des Versatzstoffes zur Verfüllung des Ringspaltes zwischen Kokillenaußenwand und Innenwand der Verrohrung. An die Eigenschaften dieses Materials werden prinzipiell zweierlei Anforder-

rungen gestellt: Einerseits ist über den Zeitraum der Betriebsphase zu gewährleisten, dass der Versatz, der in den Ringspalt eingefüllt wird, geeignet ist eine ausreichende thermische Anbindung der Kokillen an die Verrohrung und das anschließende Gebirge zu gewährleisten. Andererseits besteht die Anforderung einer dauerhaften Rieselfähigkeit, welche wichtig ist, um im Falle der Rückholung, die Kokille aus der Bohrlochverrohrung, ggf. unter Einsatz eines Rüttlers zu lösen. Im Vorhaben VSG wurde als initialer Konzeptansatz der Einsatz von Quarzsand vorgesehen. Im Rahmen zukünftiger Forschungsprojekte ist zu überprüfen, ob diese Materialwahl bezüglich der oben genannten Anforderungen weiter optimiert werden kann.

- **Generelle Praxistauglichkeit des Rückholungsbetriebes:** F&E-Bedarf besteht sowohl für die Rückholungsoption bei der Streckenlagerung als auch bei der Bohrlochlagerung vor allem in betrieblicher Hinsicht. Beide Konzepte sind vertieft zu planen und die Realisierbarkeit nachzuweisen. Für die Konzepte besteht Untersuchungsbedarf u. a. im Hinblick auf die untertägigen Arbeitsbedingungen. Die wiederaufzufahrenden Strecken und insbesondere die Rückholungsstrecken liegen in Gebirgsbereichen, die aufgrund der eingelagerten wärmeentwickelnden Abfälle ggf. auf bis zu 200 °C aufgeheizt sind. Hierdurch ergeben sich besondere und grenzwertige Randbedingungen für die Durchführung von bergbaulichen Arbeiten zur Rückholung der Abfallgebände. Über die Wetterströme muss eine Abkühlung mit sehr hohen Temperaturgradienten erreicht werden, so dass bergbauliche Arbeiten entsprechend den Anforderungen des bergbaulichen Regelwerks, z. B. der Klima-Bergverordnung /KBV 83/, erfolgen können. Im Vorhaben VSG wurden Grundkonzepte zur Bewetterung der konzipierten Bergwerke für den Fall der Rückholung entwickelt. Die Umsetzbarkeit und Praxistauglichkeit dieser Anforderungen ist zukünftig jedoch noch zu demonstrieren. Entsprechendes gilt für das Management zurückgeholter Abfallgebände sowie des ggf. kontaminierten Haufwerks unter Strahlenschutzgesichtspunkten und die Entwicklung eines Notfallplans für den Fall, dass bei der Rückholung eine Beschädigung an Abfallgebänden auftritt. Darüber hinaus sind zukünftig Konzepte zu erstellen, wie die rückgeholten Behälter über Tage zwischengelagert und den Anforderungen an die Zwischenlagerung entsprechend in Transport- und Lagerbehälter verpackt werden können. Hierzu ist eine geeignete Konditionierungsanlage vorzuhalten, in der die Abfälle in Transport- und Lagerbehälter umgepackt werden. Für diese Konditionierung ist weiterhin eine ausreichende Anzahl an Transport- und Lagerbehältern vorzusehen. Eine Ausnahme bildet die betrachtete Einlagerungsvariante B2, bei der bereits Transport- und Lagerbehälter

eingelagert werden. Hier kann die Konditionierung im Wesentlichen entfallen. Für die Transport- und Lagerbehälter mit den rückgeholten Abfällen ist weiterhin die Möglichkeit der Lagerung zu berücksichtigen. Für den Zeitpunkt der Rückholung ist demnach hinreichende Lagerkapazität sicherzustellen. Zusammenfassend ist vorzusehen:

- übertägige Konditionierungseinrichtung zur Prüfung der Transport- und Lagerfähigkeit der Abfallbehälter mit der Möglichkeit der Umladung,
- die Lagermöglichkeiten für die rückgeholten Behälter ggf. durch Vorhaltung der zentralen bzw. dezentralen Zwischenlager,
- Vorhaltung von Behältern zur Aufnahme der Brennstäbe/ Brennelemente/ Kokillen bei Defekten der rückgeholten Behälter.

7.2.2.3 Einlagerungsbetrieb

- **Transport- und Einlagerungstechnik Streckenlagerung:** Die prinzipielle technische Machbarkeit von Transport- und Einlagerungstechniken für Endlagerbehälter für wärmeentwickelnde Abfälle konnte für die Variante B1 (Streckenlagerung von POLLUX[®]-Behältern und Variante C (Brennstabkokillen) im Rahmen von Demonstrationsversuchen in übertägigen Anlagen gezeigt werden /BOL 11/. Die Zulässigkeit der Übertragung aller dabei erzielten Ergebnisse auf die untertägigen Bedingungen in einem Endlagerbergwerk unter Beachtung aller sinngemäß anzuwendender Anforderungen aus dem kerntechnischen Regelwerk ist jedoch zu zeigen und wäre durch gezielte Demonstrationsprogramme zu überprüfen.
- **Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern:** Für den Transport und die direkte Einlagerung von Transport- und Lagerbehältern bestehen nur konzeptionelle Planungen. Es existiert weltweit keine Schachtförderanlage, die in der Lage ist, ca. 160 Mg schwere Lasten nach unter Tage zu fördern. Ebenso ist der Transport im Bergwerk sowie die Einlagerung unter Bergbaubedingungen zunächst übertägig und in der Folge untertägig zu demonstrieren. Entsprechendes gilt für die Demonstration der Rückholbarkeit von Transport- und Lagerbehältern während der Betriebsphase eines Endlagers. Insgesamt muss die Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit eines solchen Einlagerungskonzeptes unter Berücksichtigung der

Rückholbarkeit und Bergbarkeit im Rahmen zukünftiger Planungen und Demonstrationsprojekten nachgewiesen werden.

- **Einlagerung in tiefen Bohrlöchern:** Mit der Endlagerung von rückholbaren Kokillen in bis zu 300 m tiefen Bohrlöchern wird aus technischer Sicht Neuland beschritten. Um die Machbarkeit und Genehmigungsfähigkeit nachzuweisen, wird es als erforderlich angesehen, konkrete Anforderungen z. B. an die Präzision der Bohrlochausführung aus betrieblichen Sicherheitsanalysen abzuleiten und ihre Umsetzbarkeit unter realen Bedingungen einschließlich der Berücksichtigung der Rückholbarkeit der Kokillen (vgl. Kap. 7.2.2.2) zu erproben bzw. zu demonstrieren.

7.2.2.4 Verschlussbauwerke

Für Strecken- und Schachtverschlüsse kann auf fortgeschrittene Planungen und zum Teil auf erprobte Komponenten von Verschlussbauwerken im Bergwerk Asse II sowie im konventionellen Salzbergbau zurückgegriffen werden. Entsprechende Ausführungen zum Stand der Erfahrungen im Bau von technischen Verschlussbauwerken sind den Abschlussberichten /MÜL 12a/, /MÜL 12b/ zu entnehmen. Die Durchführung von In-situ-Versuchen mit prototypischen Verschlussbauwerken zum Nachweis der Funktionstüchtigkeit und der technischen Machbarkeit unter realen Bedingungen wird in Anbetracht der Komplexität der Bauwerke und Prozesse dennoch für erforderlich gehalten. Darüber hinaus ergibt sich im Detail noch zu folgenden Aspekten Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- **Kontaktzonen von Dicht- und Widerlagerelementen:** Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen weisen häufig andere mechanische, hydraulische und chemische Eigenschaften auf als die Baustoffe selbst. Insbesondere für die hydraulischen Eigenschaften liegen derzeit sehr wenige Werte vor, die in der Regel auf in situ-Messungen basieren. Das geochemische Verhalten von Kontaktzonen, in denen es über längere Zeiträume zu lokalisierten Materialveränderungen durch Korrosion der Baustoffe kommen kann, ist versuchstechnisch nicht untersucht. Hinsichtlich eines möglicherweise lokalisierten Korrosionsfortschrittes existieren keine experimentellen Ergebnisse. Im Vorhaben VSG wurde daher auf Expertenschätzungen bzw. Berechnungsergebnisse zurückgegriffen. Der hydraulische Einfluss von Kontaktzonen wird zwar zurzeit als gering eingeschätzt /MÜL 12b/, er wäre aber im Rahmen späterer Genehmigungsverfahren zu belegen. Hierzu sollte ein systematisches, experimentell realisierbares Versuchskonzept zur reproduzierba-

ren Ermittlung solcher Eigenschaften erarbeitet und umgesetzt werden. Entsprechend den Ergebnissen wären auch heutzutage verwendete Modellkonzepte zu überprüfen und ggf. anzupassen. Teile dieser Aspekte sollen in den aktuell laufenden Vorhaben LAVA /HER 12/, LASA /CZA 12/ und ELSA /KUD 13/ behandelt werden.

- **Geochemische Wechselwirkungen zwischen Betonausbau und dem Bentonit-Dichtelement:** Zementphasen aus dem wasserdichten Ausbau aus Normalbeton im lösungsführenden Deckgebirge können die Eigenschaften von Bentonit, insbesondere sein Quellverhalten beeinträchtigen und ggf. zur Erhöhung der Permeabilität führen. Diese Wechselwirkung zwischen Zementphasen und Bentonit wird international im Rahmen vieler Endlagerprojekte intensiv untersucht, sie wurde jedoch bislang in Bezug auf die genauen Verhältnisse in den Schächten Gorleben 1 und 2 noch nicht systematisch aufgearbeitet. In /MÜL 12b/ wird der Einfluss dieser Prozesse auf die Quellfähigkeit des Bentonits als gering eingeschätzt, was jedoch durch standortspezifische Untersuchungen zukünftig noch zu belegen ist.
- **Einfluss der Temperatur auf das Lösungspotential:** Durch Temperaturänderungen ausgelöste chemische Einwirkungen wurden nicht explizit untersucht. Dies betrifft sowohl die Barrierenbaustoffe als auch die zutretende Salzlösung, insbesondere wenn sie, wie im Fall der Bemessungssituation „Versagen des Schachtverschlusses“, in größerer Menge erwärmte Bereiche erreicht. Für die Baustoffe Salz- und Sorelbeton, die schon in der Erhärtungsphase Temperaturen ausgesetzt sind, die über den ermittelten Temperaturen an den Lokationen der Streckenverschlüsse infolge der Wärmeproduktion der eingelagerten Abfälle liegen, ist dieser Fall abgedeckt. Das erhöhte Lösungspotential erwärmter Salzlösungen bedarf jedoch zusätzlicher Betrachtungen (s. FEP *Auflösung und Ausfällung* /WOL 12b/). Hierzu wird in /MÜL 12a/ Forschungs- und Entwicklungsbedarf ausgewiesen.

7.2.2.5 Hydraulische und mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz

Die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften des Salzgrusversatzes bestimmen den langfristigen Einschluss der Radionuklide und weisen daher eine hohe Sicherheitsrelevanz auf. Trotz bislang umfangreicher Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet und dadurch gewonnenem Prozessverständnis zeigt sich, dass für das fortgeschrittene Kompaktionsstadium des Versatzes bei kleinen Porositäten von wenigen

Prozent die mechanischen und hydraulischen Eigenschaften derzeit nicht ausreichend quantifiziert sind:

- **Zeitdauer der Salzgruskompaktion:** Der Zeitbedarf der Kompaktion bis zu einer vernachlässigbaren Restporosität ist derzeit nur unzureichend bestimmt. Vorhandene Daten sind oft nicht miteinander kompatibel, da diese mit unterschiedlichen Methoden und unter unterschiedlichen Gesichtspunkten oder Fragestellungen erhoben wurden. Für die Charakterisierung des Salzgruskompaktionsverhaltens ist dabei wesentlich, die Abhängigkeit von den jeweiligen Feuchtegehalten (0,02 % bis gesättigt) und den im Endlagerbereich herrschenden Temperaturen (40 bis 200 °C) unter realen Gebirgsdruckbedingungen zu berücksichtigen.
- **Hydraulische Eigenschaften von Salzgrusversatz im fortgeschrittenen Kompaktionsstadium:** Aus den Ergebnissen der Integritätsanalysen und der radiologischen Konsequenzenanalyse lässt sich ableiten, dass aufgrund der Abdichtung der Einlagerungsbereiche gegenüber externen Lösungen vor allem die über die Versatzfeuchte bzw. die Restfeuchte in den Abfallgebinden „künstlich“ eingebrachten geringen Wassermengen relevant sind (im Bereich von 1 Gew.-% und kleiner). Es liegen derzeit zu wenige Informationen und Versuche vor, aus denen die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrusversatz im fortgeschrittenen Kompaktionsstadium bei sehr geringem Lösungsangebot ausreichend genau quantifiziert werden können, um einen belastbaren Sicherheitsnachweis führen zu können. Nicht abschließend geklärt ist beispielsweise, ob die mit dem Versatz eingebrachte geringe Feuchte im Zuge der Konvergenz im Intergranularraum eingeschlossen wird oder ob sie ausgepresst bzw. anderweitig mobilisiert werden kann. F&E-Bedarf besteht weiterhin bei der Quantifizierung effektiver Diffusivitäten bei kleinen Porositäten. Die Frage der Mobilität der eingebrachten Feuchtemengen ist insbesondere mit Blick auf ihre Verfügbarkeit für Korrosionsprozesse oder Prozesse, die die Radionuklidfreisetzung aus der instant release fraction steuern, von hoher Sicherheitsrelevanz. Der Kenntnisstand zum Versatzverhalten bei geringen Porositäten und bei geringer vorhandener Feuchte (z. B. der im Versatz vorhandenen Wetterfeuchte oder gezielten Anfeuchtung) sollte daher vor allem hinsichtlich seiner Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung unter mechanischer Belastung entsprechend fortentwickelt werden.
- Entsprechendes gilt für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit bei verschiedenen Feuchtegehalten (trocken bis gesättigt) und unterschiedlichen Porositäten.

- **Zweiphasenflussparameter:** Es liegen derzeit nur wenige Informationen und Versuche vor, die eine zuverlässige Quantifizierung von Zweiphasenflussparametern erlauben. Die Sättigungsabhängigkeit der Permeabilitäten und Kapillardrücke sind für Salzgrus weitgehend unbekannt, jedoch von großer Bedeutung für die hydraulische Entwicklung und den Radionuklidtransport im Endlager. Von den Zweiphasenflusseigenschaften hängen u. a. auch die Gaseindringdrücke ab, bei denen es noch unklar ist, ob es sich um scharfe Druckschwellenwerte handelt oder nicht. Die Abhängigkeit der Kapillardruckkurven von der sich unter Endlagerbedingungen verändernden Porosität ist nahezu unbekannt. Insbesondere bei kleinen Porositäten stellt sich die Frage, mit welchen Diffusionskoeffizienten, absoluten und relativen Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können, oder ob grundsätzlich ein von der klassischen Theorie des Zweiphasenflusses abweichendes Modell zu wählen ist. Insofern wird eine systematische Ermittlung von Zweiphasenflussparametern zum Salzgrusversatz für erforderlich gehalten, wie auch bei der Analyse des Gaspfades in /LAR 13/ empfohlen wurde. Für einige Parameter ist jedoch derzeit noch unklar, ob sie experimentell zugänglich sind.
- **Versatztechnik für angefeuchteten Salzgrus:** Zu technischen Verfahren zum Einbringen von trockenem Salzgrusversatz in untertägige Hohlräume wurden bereits in situ-Versuche durchgeführt /BOL 12/. Zum Einbringen von angefeuchtetem Versatz in untertägige Hohlräume liegen aus dem konventionellen Bergbau (z. B. für Versatzmaßnahmen im Werra-Gebiet mit Feuchtigkeitsgehalten bis zu 3 %) bereits praktische Erfahrungen vor, die für die Einbringungstechnik in Richtstrecken noch weiter entwickelt werden müssen. Dafür sind zum einen technische Verfahren zu entwickeln, die eine homogene, jedoch geringe Durchfeuchtung des Versatzmaterials gewährleisten. Zum anderen sind technische Einbringverfahren für angefeuchteten Salzgrusversatz zu entwickeln und zu erproben (ggf. zu optimieren).

Auf einige der oben genannten Aspekte soll im aktuellen Vorhaben REPOPERM II eingegangen werden.

7.2.2.6 Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse

- **Hydraulische und geomechanische Bedeutung salinärer Schichtflächen und Diskontinuitäten:** Die vorliegenden Analysen zeigen, dass beispielsweise Bedarf besteht, salinare Schichtflächen und Diskontinuitäten bzgl. ihrer Relevanz als potenzielle hydraulische und mechanische Schwächezonen gesteinsmechanisch besser zu charakterisieren. Diese Schichtgrenzen können bevorzugt als potenzielle Wegsamkeiten für Fluide infrage kommen. Die Beurteilung des mechanischen und hydraulischen Verhaltens hat einerseits grundsätzlichen Charakter, d. h. der Prozess als solcher muss besser verstanden werden, andererseits sind für eine standortbezogene Sicherheitsanalyse lokationsspezifische experimentelle Untersuchungen von Bedeutung.
- **Modellierung druckgetriebener Infiltration von Fluiden:** Es besteht F&E-Bedarf für den Integritätsnachweis der geologischen Barriere, speziell bei der Weiterentwicklung geomechanischer Berechnungsmethoden zur Bewertung druckgetriebener Infiltration von Fluiden in das umgebende Salzgestein unter Berücksichtigung gekoppelter THM-Prozesse. Die im Rahmen der VSG durchgeführten Berechnungen zur Integrität der geologischen Barriere basieren, mit Ausnahme der Berechnung mit Erdbebenanregung, ausschließlich auf thermomechanischen Berechnungen ohne hydraulische Kopplung. Auf die geologische Barriere eines Endlagers wirken von außen hydraulische Belastungen durch das Grundwasser und von innen durch Gasdrücke. Die gekoppelten fluidmechanischen Prozesse sind in zukünftige Sicherheitsanalysen einzubeziehen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Infiltration bzw. Perkolation von Fluiden im Steinsalzgebirge ganz entscheidend von der diskontinuumsmechanischen Struktur im mikro- und makroskopischen Maßstab abhängt.
- **Radionuklidquellterme:** Es besteht F&E-Bedarf zur Weiterentwicklung der Beschreibung der Quellterme für die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen, bei Anwesenheit sehr geringer Feuchtemengen in den Behältern bzw. im Versatz. In der radiologischen Konsequenzenanalyse /LAR 13/ wird die Freisetzung von volatilen Radionukliden aus den Abfällen in die Gasphase, insbesondere aus der IRF, modelltechnisch durch konservative Annahmen beschrieben. Dies führt in den Analysen vor allem in der frühen Nachverschlussphase zu einer erhöhten Freisetzung des ^{14}C aus den Behältern und andererseits zu einer Überschätzung des aus dem Endlager strömenden Gases. Es besteht insbesondere F&E-Bedarf hinsicht-

lich der Korrosion von Strukturteilen und der temperaturabhängigen Freisetzung von Radionukliden (Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen in der Gas- und Lösungsphase) bzw. der Wechselwirkungen mit Nebenbestandteilen.

- Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf, die Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse betreffend, ist in den entsprechenden Berichten /KOC 12/, /LAR 13/ und zusammenfassend in /THO 13/ aufgelistet.

Fazit:

Der aus heutiger Sicht verbleibende F&E-Bedarf, der zum Abbau von Ungewissheiten und zur Bestätigung der Annahmen und Prämissen besteht, wurde im Vorhaben VSG systematisch identifiziert.

Die wesentlichen Annahmen und Prämissen im Vorhaben VSG resultieren aus der Tatsache, dass der Salzstock Gorleben untertägig erst teilerkundet ist, offene F&E-Felder bestehen sowie Annahmen zur Machbarkeit technischer Maßnahmen vorzunehmen sind.

Für die Zukunft wird eine systematische Optimierung und ein systematischer Vergleich von Endlagerkonzepten für erforderlich gehalten. Zum Abbau von Ungewissheiten sind unter anderem langzeitige in situ- und Laboruntersuchungen sowie untertägige Erkundungsarbeiten erforderlich.

Literaturverzeichnis

- /ABU 66/ Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen im Oberbergamtsbezirk Clausthal-Zellerfeld (ABVO), in der Fassung vom 2. Februar 1966 (Nds. MBl. Nr. 15/1966 S. 337).
- /ATG 10/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S.814), in der Fassung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 8. Dezember 2010 (BGBl. I S. 1817).
- /ATG 11/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565) (BGBl. III S. 751-1), zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 31. Juli 2011 (BGBl. I S. 1704).
- /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).
- /BEU 12a/ Beuth, T., Baltes, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübel, A., Wolf, J.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, ISBN: 978-3-939355-56-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BEU 12b/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarientwicklung: 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.

- /BFE 08/ Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Energie (BFE), Abteilung Recht und Sicherheit Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil. Erreichbar unter http://www.egt-schweiz.ch/fileadmin/kne_deutsch/files/080402_sachplan_geologische_tiefenlager.pdf, 2. April 2008.
- /BFS 90/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Fortschreibung des zusammenfassenden Zwischenberichtes über bisherige Ergebnisse der Standorterkundung Gorleben vom Mai 1983. Bericht ET-2/90, ISBN: 0937-4434: Salzgitter, April 1990.
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich. Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz, erreichbar unter http://www.bfs.de/de/endlager/erkundungsbergwerk_gorleben/publika/Synthesebericht_Endfassung.pdf: Salzgitter, 04.11.2005.
- /BGR 02/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Endlagerprojekt Gorleben - Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie). 2. Geologischer Fachbericht (Geologische Schnitte zur Untertägigen Erkundung): Hannover, 2002.
- /BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Hannover, 2003.
- /BMU 10a/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 10b/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Gorleben wird weiter erkundet: Transparenz und Verlässlichkeit des Entscheidungsprozesses stehen im Vordergrund. Gorleben Dialog, Pressemitteilung 037/10 v. 15.03.2010: Bonn, 14.03.2010.

- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung:
Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe
aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger
AT 05.09.2012 B1: Bonn, 28. August 2012.
- /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 Sicherheitsanaly-
se für den Standort Gorleben, GRS-281, ISBN 978-3-939355-57-1, Gesell-
schaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BOR 88/ Bornemann, O., Fischbeck, R.: Salzspiegelbohrung GoHy 3154. Schich-
tenverzeichnis ab Oberfläche des Salzstocks (Stand: Oktober 1985). 14
Seiten: Hannover, 1988.
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrer-
gebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz
(BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 01/ Bornemann, O., Bäuerle, G., Behlau, J., Mingerzahn, G.: Projekt Gorleben,
Standortbeschreibung Gorleben: Geologische Bearbeitung der Erkun-
dungssole, 1. Geologische Fortschrittsbericht. Bundesanstalt für Geowis-
senschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2001.
- /BOR 04/ Bornemann, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Pro-
jekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der
Erkundung des Salinars. 222 Seiten, Abschlussbericht zum AP G
412110000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):
Hannover, 2004.

- /BOR 08a/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BOR 08b/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Description of the Gorleben site. Part 3: Results of the geological surface and underground exploration of the salt formation. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BRA 12/ Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe „Kohlenwasserstoffe“, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, ISBN: 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /BRÄ 11/ Bräuer, V., Eickemeyer, R., Eisenburger, D., Grisseman, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J.R.: Description of the Gorleben site Part 4: Geotechnical exploration of the Gorleben salt dome. ISBN 978-3-9814108-0-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /CEN 09/ CEN – Europäisches Komitee für Normung: Eurocode 7: Entwurf, Bemessung und Berechnung in der Geotechnik, Teil 1: Allgemeine Regeln. DIN EN 1997-1, Deutsche Fassung EN 1997-1:2004+AC:2009: Brüssel, Stand Dezember 2009.
- /CEN 10/ CEN – Europäisches Komitee für Normung: Eurocode, Grundlagen der Tragwerksplanung. DIN EN 1990, Deutsche Fassung EN 1990:2002+A1:2005+A1:2005/AC: Brüssel, Stand Dezember 2010.

- /COG 86/ Compagnie Générale des Matières Nucléaires (COGEMA): Specifications of Vitrified Residues Produced from Reprocessing at UP-2 or UP-3 La Hague Plants Second Series. July 1986.
- /CZA 12a/ Czaikowski, O., Wieczorek, K.: Salzgruskompaktion – Kalibrierung der in CODE_BRIGTH verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation. internes Memo im Arbeitspaket 9.2 des Vorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 15.06.2012 (Rev. 30.08.2012).
- /CZA 12b/ Czaikowski, O., Birthler, H.: Langzeitsicherer Schachtverschluss im Salinar – Kurztitel: LASA. FuE-Vorhaben (Förderkennzeichen 02E11132), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, August 2012.
- /DBE 89/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE): Systemanalyse Mischkonzept, Übertragung der Planungsergebnisse auf das Arbeitsmodell zum strukturellen Aufbau des Salzstocks Gorleben. Technischer Anhang 10: Peine, Oktober 1989.
- /DÖR 12/ Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert W., Tholen M.: In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen. Memo im Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben DBE-TEC: Peine, August 2012.
- /ENG 95/ Engelmann, H.-J., Biurrun, E., Filbert, W., Hanetzog, G., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Raitz von Frenzt, R., Schrimpf, C., Wahl, A.: Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente DEAB (02E8201), Systemanalyse Endlagerkonzepte, Abschlussbericht., Hauptband. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe (DBE): Peine, 1995.
- /FIL 07/ Filbert, W., Jobmann, M., Uhlig, L., Wehrmann, J.: Untersuchungen zur direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) - AP 3: Auswirkungen der TLB-Einlagerung auf das technische Endlagerkonzept. DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, 2007 (in Freigabe).

- /FIL 10/ Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M., Wehrmann, J.: Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben „Optimierung der Direkten Endlagerung durch Kokillenlagerung in Bohrlöchern“ 02E9854, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, Juni 2010.
- /FRI 12/ Frieling, G., Bracke, G.: Modellaufbau und Randbedingungen für den zweiphasigen Radionuklidtransport (TOUGH2). Memo im Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 04.12.2012.
- /GRU 05/ Grundfelt, B., Jones, C., Wiborgh, M., Andersson, J., Kreuzsch, J., Appel, D.: Sicherheitstechnische Einzelfragen - Bedeutung des Mehrbarrierenkonzepts für ein Endlager für radioaktive Abfälle beim Nachweis der Einhaltung von Schutzzielen. Abschlussbericht Kemakta AR 2005-28, erreichbar unter http://www.bfs.de/en/endlager/publika/AG_3_Konzeptgrund_Mehrbarrierenkonzept1.pdf, Kemakta Konsult AB: Stockholm, Oktober 2005.
- /HAM 12/ Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretski, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A., Vogel, P.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-273, ISBN: 978-3-939355-49-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /HER 12/ Herbert, H.-J., Birthler, H.: Entwicklung chemisch-hydraulischer Modelle für die Prognose des Langzeitverhaltens von Sorelbeton in Salzformationen - Kurztitel: LAVA. FuE-Vorhaben (Förderkennzeichen 02E11122), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, August 2012.

- /ISI 08/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., J.R., W., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL). 95 Seiten, Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, April 2008.
- /ISI 10/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., J.R., W., Krone, J., Lommerzheim, A.: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW (Projekt ISIBEL), Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Peine, April 2010.
- /KAM 09/ Kamlot, P.: Gebirgsmechanische Bewertung der geologischen Barrierefunktion des Hauptanhydrits in einem Salzbergwerk. Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2009-3, ISSN 1611-1605, 290 Seiten, Institut für Geotechnik (Freiberg), TU Bergakademie Freiberg, 2009.
- /KBV 83/ Bergverordnung zum Schutz der Gesundheit gegen Klimaeinwirkungen (Klima-Bergverordnung - KlimaBergV), in der Fassung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685).
- /KEL 09/ Keller, S.: Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. ISBN 978-3-9813373-3-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2009.

- /KIE 12/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste). Als Bericht KIT-INE 003/11 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, KIT-SR 7624, ISBN 978-3-86644-907-7, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE): Karlsruhe, 2012.
- /KIE 13/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Source Term for Irradiated Fuel from Prototype, Research and Education Reactors, for Waste Forms with Negligible Heat Producing Waste Forms and for Uranium Tails. Als Bericht KIT-INE 001/12 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, KIT SR-7635, ISBN: 978-3-86644-964-0, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Nukleare Entsorgung (KIT-INE): Karlsruhe, 2013.
- /KIL 12/ Kilger, R., Bock, M., Moser, E., Gmal, B.: Betrachtungen zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase. Technischer Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: München, März 2012.
- /KLI 07a/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseman, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KLI 07b/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseman, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübél, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Description of the Gorleben site Part 1: Hydrogeology of the overburden of the Gorleben salt dome. Engl. Übersetzung von: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.

- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, ISBN: 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /KOC 13/ Kock, I.: Qualifizierung der in VSG verwendete Rechenprogramme und Codes. Memo zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: Köln, 2013.
- /KÖT 07a/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, ISBN 978-3-510-95963-1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KÖT 07b/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Description of the Gorleben site Part 2: Geology of the Overburden and adjoining rock of the Gorleben salt dome. Engl. Übersetzung von: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, ISBN 978-3-510-95963-1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KRÖ 09/ Kröhn, K.-P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.: Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrusversatz, REPOPERM - Phase 1. Abschlussbericht, GRS-254, ISBN 978-3-939355-29-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, September 2009.
- /KUD 13/ Kudla, W., Schreiter, F., Gruner, M., Jobmann, M., Bollingerfehr, W., Herold, P., Müller-Hoeppe, N., Freyer, D., Wilsnack, T., Grafe, F.: Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle. Abschlussbericht Verbundvorhaben ELSA, TU Bergakademie Freiberg (02E10921) und DBE TECHNOLOGY (02E10900), 2013 (in Vorbereitung).

- /KUK 12/ Kukla, P.A., Pechnig, R., Urai, J.: Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-276, ISBN: 978-3-939355-52-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /MEL 12/ Meleshyn, A., Noseck, U.: Radionuclide Inventory of Vitrified Waste after Spent Nuclear Fuel Reprocessing at La Hague. Basic Issues and Current State in Germany. Förderkennzeichen 02 E10548, GRS-294, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2012.
- /MIN 10/ Minkley, W., Popp, T.: Sicherheitsabstände zur vorläufigen Dimensionierung eines untertägigen Endlagers für wärme-entwickelnde Abfälle im Salzgebirge. Memo zum Arbeitspaket 9, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IFG): Leipzig, Oktober 2010.
- /MÖN 11/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, 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.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, ISBN: 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /MÜL 08/ Müller, B., Ewig, F.: Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. ISTec-A-1301, 44 Seiten: Köln, August 2008.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, ISBN: 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J.W.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-288, ISBN: 978-3-939355-64-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /NAV 13/ Navarro, M.: Erweiterungen des Codes TOUGH2 zur Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Endlagern. In Vorbereitung als Bericht zum Vorhaben 3609R03210 „Forschung und Entwicklung zum Nachweis der Langzeitsicherheit von tiefen geologischen Endlagern“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /NEA 00/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Features, Events and Processes (FEPs) for Geologic Disposal of Radioactive Waste. An International Database. Radioactive Waste Management, 92 Seiten, ISBN 92-64-18514-3: Paris, 24. August 2000.
- /NEA 04/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): Post-closure Safety Cases for Geological Repositories: Nature and Purpose. OECD-NEA No. 3679: Paris, 2004.

- /NEA 13/ Organization for Economic Co-operation and Development - Nuclear Energy Agency (OECD-NEA): The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories. OECD-NEA No. 78121: Paris, 2013.
- /NSE 12/ nse - international nuclear safety engineering GmbH, DBE TECHNOLOGY GmbH: Konzept Rückholung zu Variante C. MEMO 20120113-nse/DBE TECHNOLOGY GmbH zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Januar 2012.
- /PAN 13/ Pannach, M., Freyer, D., Altmeier, M., Bube, C., Metz, V., Neck, V., Voigt, W.: Solubility equilibria in the system Mg(OH)₂-MgCl₂-H₂O-NaCl at 25°C and 40°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013 (in Vorbereitung).
- /PEI 11a/ Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A., Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst. Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010). Bericht zum Arbeitspaket 3, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-274, ISBN 978-3-939355-50-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2011.
- /PEI 11b/ 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.
- /PEI 12/ Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-279, ISBN 978-3-939355-55-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2012.

- /PLI 02/ Plischke, I.: Projekt Gorleben – Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ. Ingenieurgeologische Erkundung der Homogenbereiche. Abschlussbericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.
- /POP 93/ Popp, T., Kern, H.: Thermal dehydration reactions characterised by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 120, No. 1-2, S. 43-57, 1993.
- /POP 07/ Popp, T., Wiedemann, M., Böhnel, H., Minkley, W., Manthei, G.: Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept. Abschlussbericht der Vorhabens: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik (IFG): Leipzig, 2007.
- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydromechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Leipzig, 30.05.2012.
- /PTB 83/ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB): Zusammenfassender Zwischenbericht über bisherige Ergebnisse der Standortuntersuchung Gorleben. Braunschweig, 1983.
- /RÖH 09/ Röhlig, K.-J., Appel, D., Kienzler, B., Lux, K.H., Odoj, R., Plischke, E.: Review des im Vorhaben „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitsliche Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitsliche Bewertung von Endlagern für HAW“ (Projekt ISIBEL) erstellten FEP-Katalogs. Abschlussbericht, Technische Universität Clausthal: Clausthal-Zellerfeld, 2009.
- /RÜB 08/ Rübel, A., Mönig, J.: Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE, Berlin, 17.-18. April 2007. GRS-242, ISBN 978-3-939355-16-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2008.

- /SAL 89/ Salzer, K.: Theorie und Berechnungsmodelle zur Untersuchung der Auslösungsvorgänge von Gas-Salz-Ausbrüchen im Kalibergbau. Freiburger Forschungshefte, Vol. A 787, 1989.
- /SIE 07/ Siemann, M.G.: Herkunft und Migration mineralgebundener Gase der Zechstein 2 Schichten in Zielitz. Kali und Steinsalz, Vol. 3, S. 26-41, 2007.
- /STÜ 07/ Stührenberg, D.: Longterm laboratory investigation on backfill. S. 223-229, Proceedings of the 6th Conference of Saltmechanics (Saltmech 6): Hannover, 2007.
- /STV 08/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV), in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 29. August 2008 (BGBl. I S. 1793).
- /THO 13/ Thomauske, B., Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen. Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-304, ISBN 978-3-939355-83-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.
- /URA 07/ Urai, J.L., Spiers, C.J.: The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation. S. 149-158, Taylor and Francis, The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt: 6th Conference (Salt-Mech6): Hannover, Germany, 2007.
- /VIG 07/ Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, P., Röhlig, K.-J., Smith, R.: European Pilot Study on The Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste Case Study: Uncertainties and their Management. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2007.

- /WEB 11/ Weber, J.R., Hammer, J., Schulze, O.: Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse. Projekt Gorleben GE442800000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2011.
- /WEB 13/ Weber, J.R., Hammer, J., Behlau, J., Schulze, O., Heemann, U., Mingerzahn, G., Popp, T.: Offene Klüfte im Zentralbereich des Hauptsalzes im Salzstock Gorleben unwahrscheinlich. Stellungnahme von Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) und Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Memo, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, 2013.
- /WIE 12/ Wieczorek, K., Lerch, C., Müller-Hoeppe, N., Czaikowski, O., Navarro, M.: Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus. Technischer Bericht, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, August 2012.
- /WOL 12a/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, ISBN: 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.

/XIE 12/ Xie, M., Herbert, H.-J.: Geochemical analysis of the sealing system. Bericht zum Arbeitspaket 9.1.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, Februar 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Übertägige Anlagen des Erkundungsbergwerks Gorleben. Im Vordergrund Schacht Gorleben 1. (Quelle: DBE TECHNOLOGY GmbH).....	14
Abb. 3.1	Strukturplan des Vorhabens VSG	19
Abb. 4.1	Schematische Darstellung der Einbindung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes in die VSG-Arbeiten	50
Abb. 4.2	Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase, aus /MÖN 12/.....	57
Abb. 5.1	Position von Schächten, Infrastrukturbereich, Richtstrecken und Querschlägen im schachtnahen Bereich (Beispiel optimiertes Streckenlagerungskonzept), aus /BOL 12/.....	98
Abb. 5.2	Variante A: Optimierte Einlagerungsfelder (West 1 bis West 3) für radioaktive Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung im Westflügel, aus /BOL 12/	99
Abb. 5.3	Variante B1: Einlagerungsfelder (Ost 1 bis 12) für die Streckenlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und Brennelement-Struktur-teilen im Ostflügel, aus /BOL 12/	101
Abb. 5.4	Variante B2: Einlagerungsfeld für 70 Transport und Lagerbehälter, aus /BOL 12/	101
Abb. 5.5	Variante C: Bohrlochlagerung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen sowie Brennelement-Strukturteilen im Ostflügel des Salzstockes, aus /BOL 12/	103
Abb. 5.6	Beispiel für eine Teilschnittmaschine (Westfalia-Luchs), aus /BOL 11/ ..	111
Abb. 5.7	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den geplanten Verschlussstandorten und entlang der Schachtachse im Fall der Streckenlagerung (Variante B1), aus /BOL 12/	113
Abb. 5.8	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an den Streckenverschlüssen und entlang der Schachtachse im Fall der Bohrlochlagerung (Variante C), aus /BOL 12/	113

Abb. 5.9	Planerische Umsetzung des Sicherheitsabstandes (blau gestrichelte Linie) im Fall der Einlagerungsvariante AB1 (Streckenlagerung).....	115
Abb. 5.10	Planerische Umsetzung des Sicherheitsabstandes (blau gestrichelte Linie) im Fall der Einlagerungsvariante AC (Bohrlochlagerung)	116
Abb. 5.11	Variante B1 (Streckenlagerung): Zeitlicher Temperaturverlauf für markante Punkte innerhalb der Einlagerungsfelder (links) und im Abstand von 50 m zur Umfahrung (rechts), aus /BOL 12/	124
Abb. 5.12	Variante C (Bohrlochlagerung): Zeitlicher Temperaturverlauf an der Oberfläche ausgewählter Verrohrungen der Einlagerungsfelder (links) und im Abstand von 50 m zur Umfahrung (rechts) jeweils in einer Teufe von 1.025 m, aus /BOL 12/	125
Abb. 5.13	Austritt von Kohlenwasserstoffen (Kondensat) am Stoß und Firste im Querschlag 1 Ost der Erkundungssohle (Quelle: DBE/BGR)	129
Abb. 5.14	Übersichtsdarstellung zu den Verfüll- und Verschlussmaßnahmen am Beispiel der Streckenlagerung (Variante B1)	142
Abb. 5.15	Konstruktive Gestaltung der Streckenverschlüsse West, Mitte, Ost und Nord, aus /MÜL 12a/	143
Abb. 5.16	Modifizierter Funktionsentwurf zum Schachtverschluss Gorleben 1, aus /MÜL 12a/	145
Abb. 5.17	Entwicklung der Porosität des Salzgrusversatzes in einzelnen Strecken in Abhängigkeit von Feuchtegrad und Wärmeeintrag bei schneller Kompaktion, aus /LAR 13/	165
Abb. 5.18	Abmessungen einer Einlagerungsstrecke, bezogen auf einen POLLUX®-Behälter, zur Berechnung der Feuchtigkeitsmengen (Variante B1), aus /BRA 12/	166
Abb. 5.19	Ergebnisse der Versatzdruckversuche der BGR: Versatzdruckkurven mit Variation des Feuchtegehalts (trocken bzw. 1,2 Gew.-% Sole) und der Temperatur, aus /KRÖ 09/	169
Abb. 5.20	Schematische Darstellung der methodischen Elemente für die Szenarienentwicklung aus /BEU 12b/	178

Abb. 5.21	Darstellung der möglichen Wahrscheinlichkeitsklassen (gelbe Markierung) der unterschiedlichen Szenarien, aus /BEU 12b/.....	179
Abb. 5.22	Schematische Darstellung der einzubeziehenden Abhängigkeiten zur Bestimmung der Ausprägung von Initial-FEP, aus /BEU 12b/	180
Abb. 5.23	Zusammenfassung der Alternativszenarien für die Einlagerungsvarianten, auf Basis von /BEU 12b/	182
Abb. 5.24	Auswertung des Minimalspannungskriteriums 30 Jahre nach Einlagerungsbeginn. Kriterienverletzung ($n_F < 1$) im lila bis roten Bereich, aus /KOC 12/	190
Abb. 5.25	Struktur des technischen Funktionsnachweises für das Verschlussystem; hydraulische Einwirkungen (hydromechanische Einwirkungen), thermische Einwirkungen (thermochemische und thermo-mechanische Einwirkungen), aus /MÜL 12a/.....	195
Abb. 5.26	Darstellung des Ostflügels (Einlagerungsvariante B1) mit dem Infrastrukturbereich auf der 870-m-Sohle im MARNIE-Grubenmodell....	209
Abb. 5.27	Modellgitter des Grubenbaus für die Einlagerungsvarianten AB1 und B1 im TOUGH2-Grubenmodell	210
Abb. 5.28	RGI am Streckenverschluss Ost (Einlagerungsvariante B1) als Ergebnis durchgeführter Radionuklidtransportrechnungen: Ausschnitt aus den Parametervariationen des Referenz- und Alternativszenariums Schachtverschlussversagen, aus /LAR 13/	212
Abb. 5.29	Variation der Position defekter Behälter (Variante B1), aus /LAR 13/.....	214
Abb. 5.30	¹⁴ C-Freisetzung in den Infrastrukturbereich, Rechenfälle für das Referenzszenarium (U1 – U4 nur Westflügel, U5 beide Flügel)	217
Abb. 5.31	¹⁴ C- Freisetzung in den Infrastrukturbereich: Rechenfälle für die Alternativszenarien, Einlagerungsvariante AB1, aus /LAR 13/	220
Abb. 5.32	Mit TOUGH2 berechneter RGI auf Basis der Aktivitätsströme durch die untersten Dichtelemente der Schachtverschlüsse (Summe aus Schacht 1 und 2), aus /LAR 13/	222

Abb. 5.33	Schematische Darstellung der Lage der Außenkante des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Fall der Einlagerungsvariante AB1 (Streckenlagerung)	230
Abb. 6.1	Zeitlicher Verlauf der Temperatur im Abstand von 50 m zur Umfahrung und am Salzspiegel für das Streckenlagerungskonzept (links) und das Bohrlochlagerungskonzept (rechts), aus /BOL 12/.....	287
Abb. 6.2	Skizze zur Tiefeneinwirkung von glazialer Rinnenbildung, Subrosion und Diapirismus, aus /KOC 12/.....	300
Abb. 7.1	Endlagerkonzeptoptimierung: Entfall der nördlichen Richtstrecke und Verlängerung der südlichen Richtstrecke.....	335
Abb. 7.2	Endlagerkonzeptoptimierung: Zentrale Lage der Einlagerungskammer für die Brennelement-Strukturteile in Feld Ost 12	337
Abb. A. 1	Vereinfachter geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet.....	382
Abb. A. 2	Stratigraphische und lithologische Gliederung des Tertiär.....	386
Abb. A. 3	Litho- und biostratigraphische Gliederung des Quartär.....	388
Abb. A. 4	Geologischer und hydrochemischer Profilschnitt (Lage des Profilschnittes s. Abb. A.2)	390
Abb. A. 5	Schema des Salzwassertransports aus der Gorlebener Rinne.....	394

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Zuordnung der im Sicherheitskonzept geforderten Maßnahmen (M) zu den Endlager-systemkomponenten.....	79
Tab. 5.2	Anzahl der für die direkte Endlagerung zu berücksichtigenden bestrahlten Brennelemente /PEI 11b/	83
Tab. 5.3	Mengengerüste der Abfälle aus der Wiederaufarbeitung (Anzahl der Kokillen) /PEI 11b/.....	85
Tab. 5.4	Mengengerüste der Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren /PEI 11b/	87
Tab. 5.5	Mobile Wassergehalte pro Behälter für das Einlagerungskonzept AB1 (Streckenlagerung, s. Kap. 5.1.2.1, aus /LAR 13/).....	93
Tab. 5.6	Zusammenstellung der Materialspezifikationen, Mächtigkeiten und Teufenlage der Funktionselemente im salinaren Teil des Schachtverschlusses Gorleben 1 (modifizierter Funktionsentwurf, aus /MÜL 12a/)	146
Tab. 5.7	Auslegungsgrößen der Funktionselemente nach /MÜL 12a/	153
Tab. 5.8	Potenzielle Angriffe der vier Dichtelemente durch korrosionsaggressive Lösungszusammensetzungen und entsprechende Gegenmaßnahmen	162
Tab. 5.9	Abfallnah durch den Salzgrusversatz eingebrachte Feuchtigkeitsmengen pro Behälter für den Ost- und Westflügel aus /FRI 12/	167
Tab. 5.10	Wahrscheinliche FEP mit direkter Beeinträchtigung einer Initial-Barriere (Initial-FEP)	175
Tab. 5.11	Weniger wahrscheinliche FEP	176
Tab. 5.12	FEP mit Eintrittswahrscheinlichkeit „nicht zu betrachten“.....	176
Tab. 5.13	Wahrscheinliche FEP ohne Relevanz für ein Endlager am Standort Gorleben	176

Tab. 5.14	Ausgewählte Rechenprogramme der Projektpartner und dabei verwendete Modellgeometrien, aus /KOC 12/	185
Tab. 5.15	Zuordnung der FEP zu den Rechenprogrammen, aus /KOC 12/.....	187
Tab. 5.16	Alternativszenarien zur Integritätsprüfung, aus /KOC 12/	192
Tab. 6.1	Anforderungen an die Endlagerauslegung, nach /BMU 10a/	259
Tab. 6.2	Anforderungen an die Sicherheitsnachweise, nach /BMU 10a/	268
Tab. 6.3	Vorgaben zum sicheren und nachsorgefreien Einschluss der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, nach /BMU 10a/	290
Tab. A. 1	Erkundete, vereinfachte Schichtenfolge des Salzstocks Gorleben	401

Verzeichnis der VSG-Abschlussberichte und Memos

Arbeitspaket-Abschlussberichte

Arbeitspaket	Zitat	GRS-Nummer
AP 2	Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretzki, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-273 , ISBN: 978-3-939355-49-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2012.	GRS-273
AP 2	Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275 , ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 2011.	GRS-275
AP 2	Kukla, P.; Pechnig, R.; Urai, J.: Sichtung und Bewertung der Standortdaten Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-276 , ISBN 978-3-939355-52-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Oktober 2011.	GRS-276
AP 3	Peiffer, F.; McStocker, B.; Gründler, D.; Ewig, F.; Thomauske, B.; Havenith, A.; Kettler, J.: Abfallspezifikation und Mengengerüst – Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010). Bericht zum Arbeitspaket 3 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-274 mit Anhang (CD-ROM) , ISBN 978-3-939355-50-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Juli 2011.	GRS-274
AP 3	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 mit Anhang (CD-ROM) , ISBN 978-3-939355-54-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, September 2011.	GRS-278

Arbeitspaket	Zitat	GRS-Nummer
AP 4	Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, 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, Köln, Juni 2011.	GRS-271
AP 4	Mönig, J.; Buhmann, D.; Rübel, A.; Wolf, J.; Baltes, B.; Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277 , ISBN 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Juni 2012.	GRS-277
AP 5	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, Köln, Juli 2011.	GRS-272
AP 6	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, Köln, Juni 2012.	GRS-281
AP 7	Wolf, J.; Behlau, J.; Beuth, T.; Bracke, G.; Bube, C.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Hammer, J.; Keller, S.; Kienzler, B.; Klinge, H.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Metz, V.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Popp, T.; Rübel, A.; Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Konzept und Aufbau. Bericht zum Arbeitspaket 7 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282 , ISBN 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2012.	GRS-282
AP 7	Wolf, J.; Behlau, J.; Beuth, T.; Bracke, G.; Bube, C.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Hammer, J.; Keller, S.; Kienzler, B.; Klinge, H.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Metz, V.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Popp, T.; Rübel, A.; Weber, J.R.: FEP-Katalog für die VSG. Dokumentation. Bericht zum Arbeitspaket 7 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283 (CD-ROM) , ISBN 978-3-939355-58-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2012.	GRS-283

Arbeitspaket	Zitat	GRS-Nummer
AP 8	Beuth, T.; Bracke, G.; Buhmann, D.; Dresbach, C.; Keller, S.; Krone, J.; Lommerzheim, A.; Mönig, J.; Mrugalla, S.; Rübel, A.; Wolf, J.: Szenarienentwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-284 mit Anhängen A-D (CD-ROM) , ISBN 978-3-939355-60-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, August 2012.	GRS-284
AP 9.1	Kock, I.; Eickemeier, R.; Frieling, G.; Heusermann, S.; Knauth, M.; Minkley, W.; Navarro, M.; Nipp, H.-K.; Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-286 , ISBN 978-3-939355-62-5, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juli 2012.	GRS-286
AP 9.2	Müller-Hoeppe, N.; Buhmann, D.; Czaikowski, O.; Engelhardt, H.-J.; Herbert, H.-J.; Lerch, C.; Linkamp, M.; Wiczorek, K.; Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-287 , ISBN 978-3-939355-63-2, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Juli 2012.	GRS-287
AP 9.2	Müller-Hoeppe, N.; Breustedt, M.; Czaikowski, O.; Wiczorek, K.; Wolf, J.: Integrität geotechnischer Barrieren –Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-288 , ISBN 978-3-939355-64-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Oktober 2012.	GRS-288
AP 10	Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289 , ISBN 978-3-939355-65-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Februar 2013.	GRS-289
AP 11	Beuth, T.; Baltés, B.; Bollingerfehr, W.; Buhmann, D.; Charlier, F.; Filbert, W.; Fischer-Appelt, K.; Mönig, J.; Rübel, A.; Wolf, J.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-280 , ISBN 978-3-939355-56-4, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2012.	GRS-280

Arbeitspaket	Zitat	GRS-Nummer
AP 12	Peiffer, F., McStocker, B.: Einschätzung betrieblicher Machbarkeit von Endlagerkonzepten. Bericht zum Arbeitspaket 12 . Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-279 , ISBN 978-3-939355-55-7, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2012.	GRS-279
AP 13	Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290 , ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2013.	GRS-290
AP 14	Thomauske, B., Charlier, F.: Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen. Bericht zum Arbeitspaket 14 , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-304 , ISBN 978-3-939355-83-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, März 2013.	GRS-304
AG KW	Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe „Kohlenwasserstoffe“ , Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285 , ISBN 978-3-939355-61-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, August 2012.	GRS-285

Technische Berichte/Memos

(interne Arbeitsunterlagen der VSG, nur z. T. als eigenständige Berichte veröffentlicht)

Lfd. Nr.	Titel	Autoren	Datum
1	Sicherheitsabstände zur vorläufigen Dimensionierung eines untertägigen Endlagers für wärmeentwickelnde Abfälle im Salzgebirge, Memo	Minkley, M.; Popp, T. (IfG)	29.10.2010
2	Empfehlungen der BGR zur Berücksichtigung der Kohlenwasserstoff-Vorkommen im Hauptsalz des Salzstockes Gorleben im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsanalyse, Memo	Weber, J.; Hammer, J.; Schulze, O (BGR)	09.02.2011
3	Zusammenstellung von Stoffparametern für Salzgrus, Entwurf/Diskussionsgrundlage, Memo	Wieczorek, K.; Czaikowski, O. (GRS), Lerch, C. (DBE TECHNOLOGY)	21.06.2011
4	Materialspezifikationen für Dichtelemente für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (Arbeitspaket 9.1.2, Memo, Rev-01)	Engelhardt, H.; Jobmann, J.; Müller-Hoeppe, N. (DBE-Tec)	August 2011
5	Zeitliche Belegung der Einlagerungsfelder in der Variante B1, Memo	Lerch, CH. (DBETec)	12.09.2011
6	Beantwortung der Fragen der GRS zu den Betonmengen, den Wasserinhalten und den ggf. vorhandene Metallanteilen in den Behältern, in den Materialien bei der Konditionierung und in den Abfällen selbst, Memo	Dörr, S.; Filbert, W.; Tholen, M. (DBE TECHNOLOGY)	November 2011
7	Thermische Behälterleistung in den Varianten B1 und C und Überprüfung der Einlagerung in der Variante B1, Memo	Lerch, Chr. (DBE TECHNOLOGY)	12.12.2011
8	Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste). Als Bericht KIT-INE 003/11 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, KIT-SR 7624, ISBN 978-3-86644-907-7	Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V. (KIT-INE)	2012
9	Konzept Rückholung zu Variante C, Bohrlochlagerung (AP 6), Memo 201031-NSE/DEBETEC	nse/ DBE TECHNOLOGY	Januar 2012
10	Bestimmung der Oberflächenfeuchte von Steinsalzgrus aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben. Memo im Arbeitspaket 9.1.2	Engelhardt, H.J., Stradinger, A., v. Borstel, L.E. (DBE TECHNOLOGY)	Januar 2012
11	E-Mail: SLB1-2D	Eickemeier, R. (BGR)	11.01.2012

Lfd. Nr.	Titel	Autoren	Datum
12	E-Mail: Ergänzung Materialkennwerte	Müller-Hoeppe, N. (DBE TECHNOLOGY)	13.01.2012
13	E-Mail: VSG-Randbedingungen aus Thermomechanik auf den Schacht	Knauth, M. (IfG)	17.01.2012
14	Materialspezifikationen für Filter/Aufsättigungs- und Widerlager/Speicherelemente sowie eines Langzeitdichtelementes für die Planung von Schacht- und Streckenverschlüssen (Arbeitspaket 9.1.2, Memo)	Müller-Hoeppe, N. (DBE TECHNOLOGY)	26.01.2012
15	E-Mail: Druckverlauf	Kock, I. (GRS)	10.02.2012
16	Geochemical analysis of the sealing system, Technical Report to Work package 9.1.2, GRS – 308, ISBN 978-3-939355-87-8	Xie, M.; Herbert, H. (GRS)	February 2012
17	Betrachtungen zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase (AP6 Endlagerauslegung und Optimierung), Memo	Kilger, R.; Bock, M.; Moser, E.; Gmal, B. (GRS)	März 2012
18	Zufluss in das Grubengebäude bei Schachtversagen, Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-05, Version 04	Buhmann, D. (GRS)	2.04.2012
19	Durchströmung von Schachtverschlüssen, Modellrechnungen mit dem Computercode LOPOS, Veränderte Aufteilung des Schachts. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, grs-notiz 808800-04, Version 04	Buhmann, D. (GRS)	2.04.2012
20	E-Mail: Datenübermittlung und Ergebnisse zum Druck am nördlichen Damm	Kock, I. (GRS)	07.05.2012
21	Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz - Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis	Popp, T.; Salzer, K. (IfG), Schulze, O.; Stührenberg, D. (BGR)	30.05.2012
22	Literaturstudie zur Metallkorrosion, Memo	Mönig, H. (GRS)	Juni 2012
23	Vertiefte Nachweisführung: 1. Dichtelement Schachtverschluss Gorleben 1. Memo im Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben,	Breustedt, M. (DBE TECHNOLOGY)	August 2012
24	Konstruktiver Entwurf der Streckenverschlüsse – Grundlagen für die hydraulische Auslegung (Variante B1 und Variante A). Memo im Arbeitspaket 9.1.2	Herold, P., Müller-Hoeppe, N. (DBE TECHNOLOGY)	August 2012
25	Salzgruskompaktion – Kalibrierung der in CODE_BRIGHT verwendeten physikalischen Modellansätze zur numerischen Simulation (AP9 - Integritätsanalyse), Memo	Czaikowski, O.; Wieczorek, K. (GRS)	30.08.2012
26	Vertiefte Nachweisführung des Schachtverschlusses Gorleben 1. Arbeitspaket 9.1.2, Memo	Wolf, J., Müller-Hoeppe, N. (DBE TECHNOLOGY)	Oktober 2012

Lfd. Nr.	Titel	Autoren	Datum
27	In das Endlager eingebrachte Inventare an Metallen, Organika und weiteren Stoffen, Memo	Dörr, S.; Bollingerfehr, W.; Filbert, W.; Tholen, M. (DBE TECHNOLOGY)	Oktober 2012
28	Berechnung des freien Volumens in einem POLLUX®-Behälter, Memo	Dörr, S.; Filbert, W. (DBE TECHNOLOGY)	26.11.2012
29	Source Term for Irradiated Fuel from Prototype, Research and Education Reactors, for Waste Forms with Negligible Heat Producing Waste Forms and for Uranium Tails. Als Bericht KIT-INE 001/12 zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, KIT SR-7635, ISBN: 978-3-86644-964-0	Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V. (KIT-INE)	2013
30	Zusammenstellung der Inventare zur Modellierung (AP 10), Memo	Seher, H. (GRS)	März 2013
31	Offene Klüfte im Zentralbereich des Hauptsalzes im Salzstock Gorleben unwahrscheinlich, Stellungnahme von BGR und IfG, Memo	Weber, J.; Hammer, J.; Schulze, O.; Behlau, J.; (BGR) Minkley, M.; Popp, T. (IfG)	24.01.2013
32	Qualifizierung der in der VSG verwendeten Rechenprogramme, Memo	Kock, I. (GRS)	09.04.2013
33	Modellaufbau und Randbedingungen für den zweiphasigen Radionuklidtransport (TOUGH2) (AP 10), Memo	Frieling, G. (GRS)	22.04.2013

Anhang A

Zusammenfassung der
geowissenschaftlichen
Standortbeschreibung

Bericht zum Arbeitspaket 13

Vorläufige Sicherheitsanalyse
für den Standort Gorleben

Siegfried Keller



A Anhang: Zusammenfassung der geowissenschaftlichen Standortbeschreibung

A.1 Schichtenfolge und Lagerungsverhältnisse im Deck- und Nebengebirge

Die Salzstruktur Gorleben-Rambow mit den sie auf beiden Seiten begleitenden Randsenken erstreckt sich in SW-NE-Richtung über eine Länge von ca. 30 km diagonal durch das Untersuchungsgebiet. Die Salzstrukturoberfläche liegt durchschnittlich in Tiefen von -200 m bis -300 m NN. Südwestlich der Elbe, im Bereich von Gorleben, hat die Salzstruktur eine Breite von ca. 3,5 km bis 4 km. Sie verengt sich unmittelbar südlich der Elbe auf ca. 1,5 km bis 2 km und beträgt bei Rambow wieder etwa 3,5 km. Die Salzstruktur besteht aus dem südwestlich der Elbe gelegenen Salzstock Gorleben und zieht sich bis zum Salzstock Rambow. Der schmalere Bereich zwischen der Elbe und Lenzen wird als Übergangsbereich zwischen den beiden Salzstöcken bezeichnet. Der Salzstock Gorleben bis einschließlich des Übergangsbereichs, nicht jedoch der Salzstock Rambow, war Ziel der Untersuchungen. Die Sedimente über dem Salzstock Gorleben sind – von kreidezeitlichen Relikten abgesehen – tertiären und quartären Alters (Abb. A.1).

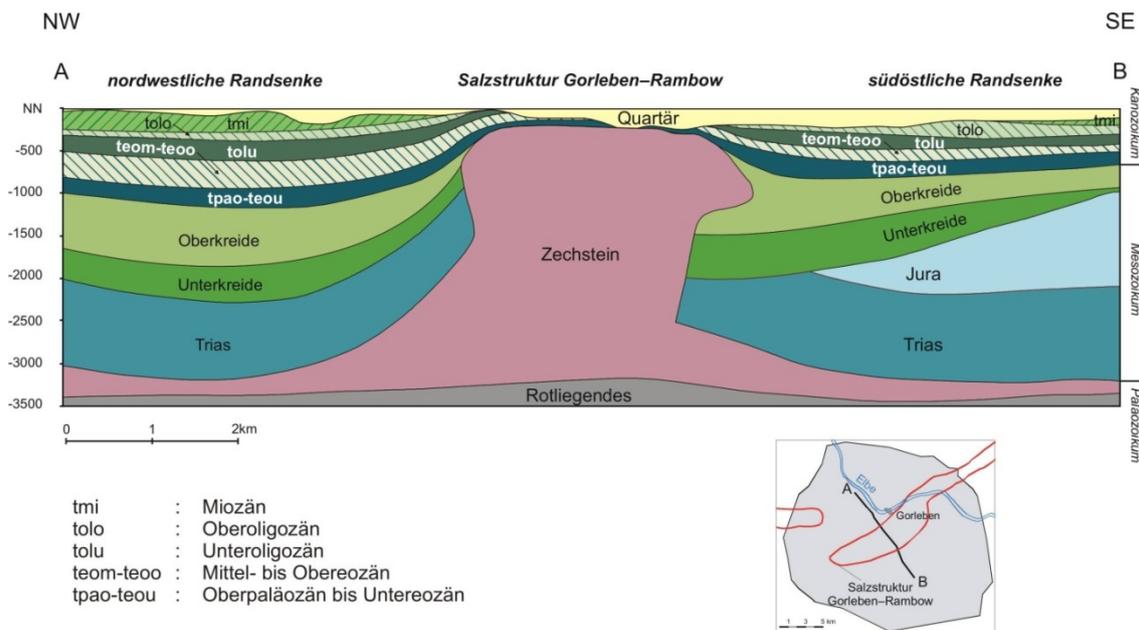


Abb. A. 1 Vereinfachter geologischer Schnitt durch das Untersuchungsgebiet

A.1.1 Präsalinärer Untergrund

Die Gesteine des **präsalinaren Untergrundes** liegen etwa in Tiefen von unter 3000 m bis 4000 m. Es sind Ablagerungen des Unter- und Oberkarbon sowie des vulkanitischen und sedimentären Rotliegenden mit einer Mächtigkeit von zusammen ca. 3000 m.

Daten des tieferen Untergrundes lieferten im Wesentlichen die Ergebnisse der Erdöl-Erdgas-Erkundungstätigkeiten außerhalb des Untersuchungsgebietes Gorleben. Die **Mohorovičić-Diskontinuität**, kurz Moho genannt, liegt im Bereich der Salzstruktur Gorleben-Rambow bei ca. 31 km Tiefe im Bereich einer markanten in NNE-SSW-Richtung streichenden Hochlage, an deren östlicher Flanke die im Rotliegend und Mesozoikum teilweise aktive Altmark-Schwelle positioniert ist. Die **Kristallin-Oberfläche** liegt im Wesentlichen bei ca. >12 km bis <12,5 km. Sie zeigt nur ein geringes Relief, so dass Hinweise auf tiefreichende Bruchstörungen nicht abzuleiten sind. Die sich noch in der Moho markant abzeichnende Hochlage ist in der Kristallin-Oberfläche in dieser prägnanten Ausbildung nicht vorhanden. Die **Präperm-Oberfläche** ist unterhalb der Zechstein-Basis die erste strukturell bedeutsame Grenzfläche. Sie trennt das variszische Grundgebirge vom jungpaläozoischen Deckgebirge und ist im Allgemeinen als markante Diskordanzfläche ausgebildet. Sie liegt im Top der Altmark-Schwelle bei < 4

500 m und taucht im umlaufenden Streichen nach Norden auf > 7 000 m ab. Auffallend ist die gute Koinzidenz mit der Hochlagenzone der Moho.

Das weitere Umfeld des Untersuchungsgebietes Gorleben liegt im regionaltektonischen Rahmen im Bereich markanter NW-SE streichender Störungszonen, die in der Literatur vielfach unter dem Sammelbegriff „**Elbe-Lineament**“ zusammengefasst werden. Der NW-Abschnitt, der unter dem Begriff „Unterelbe-Linie“ in die Literatur eingegangen ist, wird als bedeutsame vorvariszische (kaledonische) Terranegrenze betrachtet, die sich im Grenzbereich Silur/Devon herausbildete. Dagegen bleibt der Einfluss auf das variszische und postvariszische Stockwerk auf die räumliche Faziesausbildung des Unterkarbons beschränkt. Ab dem Oberkarbon zeigt die Paläogeographie keine Beziehungen mehr zur Unterelbe-Linie; die Faziesgrenzen schneiden die Unterelbe-Linie vielmehr quer. Dies trifft generell auch für die strukturelle Entwicklung der mesozoischen und känozoischen Sedimentationsräume zu.

Das markanteste strukturgeologische Element der generell nach Norden in Richtung auf das Zentrum des Norddeutschen Beckens bis in Teufen von mehr als -5100 m NN abtauchenden **Zechsteinbasis** ist die **Altmark-Schwelle**, in deren Kulmination Teufen von weniger als -3200 m NN zu beobachten sind. Auf dem Top der Altmark-Schwelle in der Altmark und im südlichen Wendland existiert ein überwiegend SSW-NNE, E-W und untergeordnet NW-SE streichendes System von Störungen, deren Versätze allerdings überwiegend sehr gering sind. Eine für die Salzstruktur Gorleben–Rambow aufgrund ihrer langgestreckten Form postulierte Störung, die besonders den präpermischen Sockel durchschlagen haben soll, konnte durch Reflexionsseismik im postpermischen Deckgebirge nicht bestätigt werden. Selbst die Unterschießung des Salzstocks Gorleben lieferte keine Indizien für Störungen, die Versatzbeträge von mehr als 50 m aufweisen.

A.1.2 Zechstein

Zur **Zechstein**-Zeit bestanden in Zentraleuropa zwei Hauptbecken, ein südliches und ein nördliches. Das nördliche Zechsteinbecken erstreckt sich von der nördlichen und zentralen Nordsee nach Dänemark nördlich des Ringköbing Fünen-Hochs. Norddeutschland liegt insgesamt im südlichen Zechsteinbecken, dem norddeutsch-polnischen Becken. Die Salzstruktur Gorleben–Rambow befindet sich annähernd im Zentralteil des südlichen Zechsteinbeckens.

Die lithostratigraphische Gliederung des Zechstein im norddeutsch-polnischen Becken beruht auf der Zyklizität der Ablagerungen (Zechstein 1 bis Zechstein 6: z1 bis z6), die über das ganze Becken verfolgt werden kann. Die Zyklen zeigen im Groben eine Abfolge von Peliten, Karbonaten, Sulfaten und Haliten, in denen sich als jüngste Schichten Kaliflöze einschalten können.

Am Aufbau der Salzstruktur Gorleben–Rambow sind vorwiegend die Staßfurt-, Leine- und Aller-Folge (z2, z3 und z4) beteiligt, deren primäre Mächtigkeiten

- Aller-Folge (Zechstein 4, z4) ca. 60 m
- Leine-Folge (Zechstein 3, z3) ca. 320 m und
- Staßfurt-Folge (Zechstein 2, z2) ca. 700 bis 950 m

betragen haben.

Die älteste Werra-Folge (z1) mit einer Gesamtmächtigkeit von 55 m liegt in flacher Lagerung den Schichten des Rotliegenden auf. Die Schichten bestehen ausschließlich aus Ton-, Karbonat- und Sulfatgesteinen und sind nicht am Salzaufstieg beteiligt. Ebenfalls in flacher Lagerung befinden sich die unteren Schichten der Staßfurt-Folge, das Staßfurt-Karbonat (z2SK) und der Basalanhydrit (z2BA), die während des Salzaufstiegs in ihrer Position verblieben. Dagegen nahmen alle übrigen jüngeren Schichten am Salzaufstieg teil.

Die verbliebenen Zechsteinanteile außerhalb der Salzstruktur Gorleben–Rambow schwanken in ihren Restmächtigkeiten südöstlich der Salzstruktur zwischen 100 und 200 m und im Bereich der nordwestlichen Randsenke zwischen 200 und 500 m. Dabei handelt es sich vorwiegend um verfaltete Schichten des Zechstein 3 mit geringeren Anteilen des Zechstein 2. Dies bedeutet, dass die mobileren Schichten des strukturbildenden Hauptsalzes (z2HS) nahezu vollständig in die Salzstruktur eingewandert sind.

A.1.3 Trias bis Oberkreide

Die Sedimente der Trias bis Oberkreide liegen in der für das norddeutsch-polnische Becken bekannten faziellen Entwicklung und petrographischen Ausbildung vor. Die Verbreitung und Mächtigkeit der Schichten werden sowohl von den Bewegungen der Altmark-Schwelle, in deren nordöstlichem Randbereich die Salzstruktur Gorleben–

Rambow liegt, als auch von halokinetischen Aktivitäten beeinflusst. Auf dem Salzstock Gorleben sind nur Relikte von kreidezeitlichen Sedimenten punktuell erhalten geblieben.

A.1.4 Tertiär

Die tertiäre Schichtenfolge wird neben der großräumigen regionalen Position des Untersuchungsgebietes am Südrand des nordwesteuropäischen Tertiärbeckens deutlich von der halokinetischen Entwicklung der Salzstruktur Gorleben–Rambow beeinflusst. Während es in den beiderseitigen sekundären Randsenken zu einer starken Mächtigkeitzunahme der tertiären Sedimente kam, sind die Ablagerungen über der Salzstruktur in ihrer Mächtigkeit reduziert.

Alter in Mio. Jahren	System/ Serie	Lithostratigraphie (Gorleben)	Lithostratigraphie (NE-Deutschland)	Fora- miniferen	Kalk- Nanno- plankton	Dino- zysten	max. erbohrte Mächtigkeit [m]		
							RS	ST	
16,4	MIOZÄN UNTER-	Ob. Braunk.- S. (tmiBS2)	Obere Mallisser - Sch. (tmiMAo)			Oberes Mittel- bis mittleres Untermiozän	24	–	
		Hamburg - Ton (tmiHT)	Untere Mallisser Schichten (tmiMAu)				102	66	
19,0			Untere Braun- kohlensande (tmiBS1)	Mölliner - Schichten (tmiMO)			D 16	130	64
23,8	OLIGOZÄN OBER-	Neochatt - Schichten (tolN)	Rogahner - Schichten (tolRO)	<i>V. crista</i>		D 15	41	21	
		Eochatt - Schichten (tolE)	Sülstorfer - Schichten (tolSL)	<i>A. osnabrug- ensis</i>	NP 25		109	45	
28,5				Plater - Schichten (tolPL)	<i>P. oblonga</i> <i>Ast. g. guenchi</i>				
	OLIGOZÄN UNTER-	Rupelton (tolRT)	Rupel - Schichten (tolR)	Oberer Rupel	NP 24	D 14 nb	203	86	
					Unt. Rupel	NP 23	na		
33,7	E O Z Ä N M I T T E L -	Neuengamm. Gass. (tolN)	Rupel - Basissand (tolRa)		NP 22	D 13	11	8	
		Obereozän - Schichten (teo)	Obere Schönevalder - Schichten (teoSWo)	„Latdorf“	NP 21	D 12 nc nb na	102	49	
37,0			Mitteloazän - Schichten (teom)	Untere Schönevalder - Schichten (teoSWu)			D 11		
	E O Z Ä N U N T E R -		Sernoer - Schichten (teoSE)		NP 17	D 10	74	45	
			Genthiner - Schichten (teoGN)	Mittel - eozän	NP 16	D 9 nb			
49,0			Brüssel - Sand (teomB)	Nedlitzer - Schichten (teoNE)		NP 15		65	70
	PALÄOZÄN OBER-	Untereozän - Schichten (teou)	Marnitzer - Schichten (teoMA)	Unter - eozän 4 3	NP 12	D 8 nb	192	82	
			Untereozän - Schichten (teou)	Schlievener - Schichten (teoSL)	Unter - eozän 3 2		D 7 nb na D 6 na		
54,8			Gartow - Sand (teouG)				D 5 nb	10	12
	PALÄOZÄN U N T E R -	Oberpaläozän - Schichten (tpao)	Heller - Schichten (tpaHE)			D 4 nb na	40	54	
60,9			Unt.-Paläoz.- Schicht. (tpau)		Oberdan		D 3 nb	–	1
65,0									

LEGENDE

Sand	sichere Datierung	nicht untersucht
Schluff	unsichere Datierung	
Schluff bis Ton	keine Datierung	
Ton	Schichtlücke	

Abk.: A. = Almaena; Ast. = Asterigerina
P. = Palmula; V. = Vaginulinopsis

RS = NW - Randsenke
ST = Salzstock Gorleben
(Salzstockdach > -250 m NN)

Abb. A. 2 Stratigraphische und lithologische Gliederung des Tertiär

In den Randsenken ist eine Schichtenfolge vom Oberpaläozän bis zu den untermiozänen Oberen Braunkohlensanden abgelagert worden, auf dem Salzstockdach sind Schichten des Unterpaläozäns bis Oberoligozäns erhalten. Die bio- und lithostratigraphische Gliederung zeigt Abb. A.2.

A.1.5 Quartär

Die quartären Ablagerungen folgen mit einem zeitlichen Hiatus von ca. 15 Mio. Jahren über den tertiären Schichten. Verbreitung und Lagerungsverhältnisse der Sedimente werden nicht mehr vordergründig durch halokinetische Strukturen im Untergrund, sondern von erosiven, akkumulativen und eistektonischen Prozessen im Zuge der nordischen Inlandvereisungen geprägt. Die Quartärbasis ist eine polygenetisch entstandene diskordante Fläche, in der Bereiche mit Hochlagen (höher -20 m NN) und rinnenförmige Vertiefungen bis unter -280 m NN wechseln. Im Rinnentiefsten werden Schichtmächtigkeiten von ca. 320 m erreicht. Die Anlage der Rinnen erfolgte während der Elster-Kaltzeit durch subglaziale, untergeordnet exarative Ausräumung. Der quartäre Sediment-Komplex besteht aus einer Wechselfolge von Schmelzwassersanden, Geschiebemergeln und Beckenbildungen (Tone, Schluffe und Feinsande). Die lithologisch vielfältige Schichtenfolge konnte aufgrund biostratigraphischer Untersuchungen und lithostratigraphischer Methoden gegliedert werden (Abb. A.3).

Alter in ka BP	Stratigraphie		Lithologie		max. Mächtigkeit [m]	
11,6	HOLOZÄN			Flugsand, Dünen, Auelehm, Auesand, Niedermoortorf,	25 7	
117	Ober	Weichsel-Kaltzeit Jüngere Niederterrasse Ältere Niederterrasse		Flusssand	24 32	
128			Eem-Warmzeit			Schluffmudde
240	Saale - Kaltzeit (-Komplex)	oberer Saale-Komplex Saale-Kaltzeit s.str.	Warthe-Stadium	Schmelzwassersand, Beckenschluff	58 58	
				Jüngeres Drenthe-Stadial		Geschiebemergel
			Drenthe-Stadium	Schmelzwassersand, Beckenschluff	142 104	
				Älteres Drenthe-Stadial		Geschiebemergel
			Dömnitz-Warmzeit	nicht nachgewiesen		
370	unterer Saale-Komplex	Fuhne-Kaltzeit		Flusssand, Schluff	24	
			Holstein-Warmzeit		Schluff, Ton, Mudde, teilweise Sand und Torf	33
			Jüngeres Elster (Elsterspät-glazial)		Sand	76
				Lauenburger Ton-Komplex	Ton, Schluff, Feinsand	149
			Haupt-Elster		Schmelzwassersand und -kies ("Rinnensand")	108
	Geschiebemergel	72				
480	Cromer-Komplex	Bilshausen-Warmzeit Warmzeit Rosmalen-Warmzeit Hunteburg-Warmzeit Osterholz-Warmzeit		Wechsellagerung von Schluff, Mudde, Torf und Sand	24	
780	Bavel-Komplex	Leerdam-Warmzeit Bavel-Warmzeit		Flusssand	39 69	
1070	Unter	Menap - Komplex		Schichtlücke		
			Waal - Komplex			
			Eburon - Komplex			
			Tegelen - Komplex			
1500		Prätegelen				
2600						

Abb. A. 3 Litho- und biostratigraphische Gliederung des Quartär

A.2 Hydrogeologie

A.2.1 Hydrogeologischer Bau des Deckgebirges

Die tertiären und quartären Deckschichten bilden ein bis zu maximal 430 m mächtiges System von Grundwasserleitern und -geringleitern. Im Umfeld des Salzstocks Gorleben bildet die Oberfläche des Rupeltons (toIRT) die Basis des regionalen Fließsystems (Abb. A.4). Diese flächenhaft verbreiteten Tone trennen dieses Aquifersystem von den im Allgemeinen hochversalzten tieferliegenden Aquiferen der Randsenken. Während die darüber lagernden gering durchlässigen tonigen Schluffe des Chatts (toloE) nur von geringer Bedeutung für die Wasserbewegung sind, bilden die Unteren Braunkohlensande (tmiBS1) einen bedeutenden überregional verbreiteten Grundwasserleiter, der in den Randsenken um den Salzstock durchgängig verbreitet ist, wohingegen er über dem Salzstock fehlt. Die Unteren Braunkohlensande werden vom gering durchlässigen Hamburg-Ton (tmiHT) überlagert.

Prägendes Strukturelement im Deckgebirge des Salzstocks Gorleben ist die Gorleber Rinne. In ihrem zentralen Bereich über dem Salzstock wurde der Rupelton, der den Salzstock ursprünglich flächenhaft überdeckte, weitestgehend erodiert, so dass die gut durchlässigen unteren Elster-Rinnensande (qe) in einer Kontaktfläche von 7,5 km² unmittelbar dem Hutgestein, lokal auch Zechsteinsalzen auflagern. Im Norden und Süden des Salzstocks Gorleben stehen die Sande mit den in den Randsenken verbreiteten Unteren Braunkohlensanden in hydraulischem Kontakt. Die elsterzeitlichen Rinnensande werden vom gering durchlässigen Lauenburger Ton-Komplex (qL) überlagert. Die insgesamt wesentlich inhomogenere, vertikal wie lateral stark gegliederten Schichtenfolge der saale- (qs) und weichselzeitlichen (qN)- Ablagerungen – ist im Ganzen gesehen – als heterogener Grundwasserleiter einzustufen.

Hydrogeologisch lässt sich die über dem Salzstock und in den Randsenken verbreitete Schichtenfolge in ein oberes und ein unteres, durch Grundwassergeringleiter hydraulisch getrenntes, Hauptgrundwasserstockwerk gliedern. Untere Braunkohlensande und elsterzeitliche Rinnensande bilden einen im Norden und Süden des Salzstocks hydraulisch verbundenen unteren Aquifer, die weichsel- und saalezeitlichen Ablagerungen den oberen Aquifer. Beide Systeme werden durch die Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton und Lauenburger-Ton-Komplex getrennt. Die Trennschichten sind in der Gorleber Rinne sowie nördlich der Elbe lückenlos verbreitet, während im Südosten und

Nordwesten größere Verbreitungslücken bestehen, so dass beide Aquifere hier in direktem Kontakt stehen.

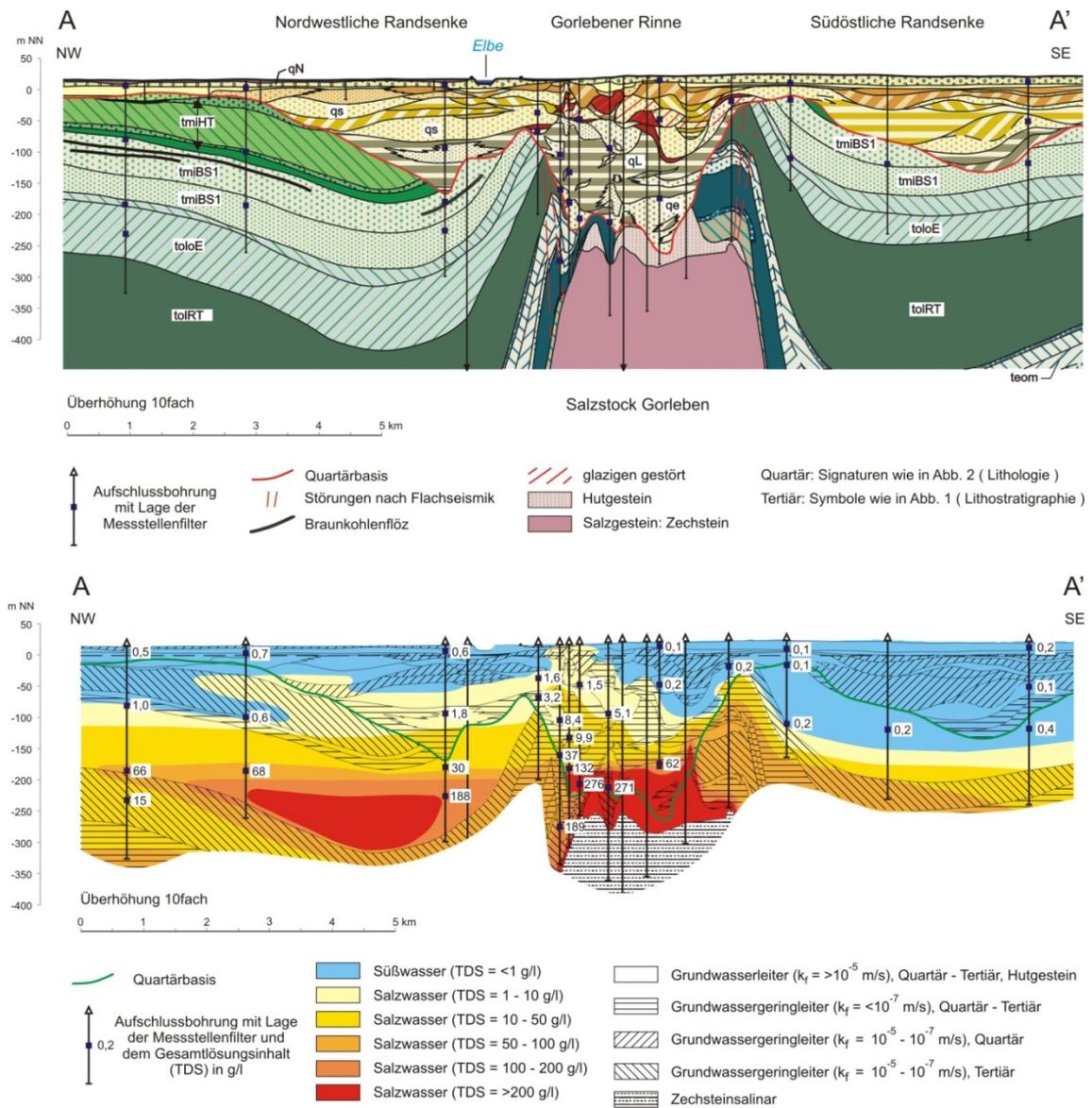


Abb. A. 4 Geologischer und hydrochemischer Profilschnitt (Lage des Profilschnittes s. Abb. A.2)

A.2.2 Das Süß-/Salzwassersystem

Wie im gesamten norddeutschen Flachland besteht auch im Umfeld des Salzstocks Gorleben eine Zweiteilung in einen oberen gering mineralisierten **Süßwasserkörper** wechselnder Mächtigkeit und einen unteren **Salzwasserkörper** unterschiedlicher Salinität.

Eine vergleichbare vertikale Gliederung zeigt sich auch in der **chemischen Zusammensetzung** der Grundwässer. Bei den Süßwässern handelt es sich vorherrschend um Ca-HCO₃-Wässer. Lediglich in den oberflächennahen Grundwässern dominiert SO₄ gegenüber HCO₃ aufgrund der oberflächlichen Entkalkung der Sedimente. Im Übergangsbereich zwischen Süß- und Salzwässern führen Ionenauschvorgänge zur Bildung von Na-HCO₃-Wässern. Bakterieller Sulfatabbau verbunden mit der Oxidation organischer Substanz führt zu stark erniedrigten Sulfatgehalten in Süßwässern und Salzwässern mit mittleren Salinitäten. Die chemische Zusammensetzung der Salzwässer ist insgesamt sehr einheitlich. Es handelt sich durchweg um Na-Cl-geprägte Halit-Ablaugungswässer.

Abb. A.5 zeigt die **Süß-/Salzwasserverteilung** in einem Profilschnitt, der den Salzstock Gorleben und die umgebenden Randsenken in NW-SE-Richtung quert. Der Süßwasserkörper hat in der südöstlichen Randsenke eine Mächtigkeit von bis zu 170 m. Die Süß-/Salzwassergrenze befindet sich hier durchgängig innerhalb des unteren Aquifers, wohingegen sie über der Gorlebener Rinne und in der nordwestlichen Randsenke wesentlich höher innerhalb der hier lückenlos verbreiteten Grundwassergeringleiter Hamburg-Ton bzw. Lauenburger-Ton-Komplex, teilweise auch innerhalb des oberen Aquifers, verläuft.

Im unteren Aquifer der Gorlebener Rinne sind die Grundwässer aufgrund des direkten Kontaktes mit dem Zechsteinsalinar hochsalin. Die Salzgehalte reichen von ca. 100 g/l bis zur Salzsättigung von etwa 320 g/l. Im Zentrum der nördlichen Randsenke treten innerhalb des unteren Aquifers Solen mit vergleichbar hohen Salzgehalten auf. Die Oberfläche dieses Solenkörpers ist weitgehend horizontal ausgebildet, während seine Unterfläche an der Aquiferbasis verläuft. In den unterlagernden Schluffen des Eochatt (toloE) weisen die Porenwässer dagegen deutlich niedrigere Salzgehalte auf.

Die Darstellung der räumlichen Verteilung der Gesamtsalzgehalte des Grundwassers an der Basis des unteren Aquifers in Abb. A.5 zeigt, dass die Verbreitung der Solen mit mehr als 200 g/l Gesamtsalzgehalt auf die Gorlebener Rinne und den zentralen, struk-

turell tiefsten Bereich der nordwestlichen Randsenke beschränkt ist, wobei beide Bereiche in direkter Verbindung stehen. Insgesamt ist die Salinität der Salzwässer in der nordwestlichen Randsenke auch außerhalb des Verbreitungsbereichs dieser Solen mit Salzgehalten von 50 bis 100 g/l erheblich höher als in der südöstlichen Randsenke sowie über dem westlichen Teil des Salzstockes mit durchgehender Tonüberdeckung. Die Salinität der Wässer an der Aquiferbasis liegt dort mit Salzgehalten von weniger als 10 g/l bis etwa 30 g/l vergleichsweise niedrig.

In Abb. A.5a ist die Tiefenlage der Unterfläche des Süßwasserkörpers dargestellt. Diese hat ein ausgeprägtes Relief, das Beziehungen sowohl zu regionalen hydrogeologischen Strukturen – insbesondere der Verbreitung der Grundwassergeringleiter – als auch zur regionalen Grundwasserbewegung erkennen lässt. Die größten Süßwassermächtigkeiten von mehr als 100 m bis maximal 170 m befinden sich in den Randsenken im Nordwesten und Südosten des Salzstocks in Gebieten mit absteigender Grundwasserbewegung, in denen zudem ein direkter hydraulischer Kontakt zwischen dem oberen und dem unteren Aquifer besteht. Ausgesprochene Salzwasser-Hochlagen, in denen Salzwässer teilweise das gesamte Aquifersystem bis an die Grundwasseroberfläche ausfüllen, befinden sich westlich des Salzstocks Gorleben in einer über dem Salzstock Groß Heide–Siemen gelegenen Niederung, in der gesamten Flussniederung nördlich der Elbe sowie über der Gorlebener Rinne. Die Hochlage über der Gorlebener Rinne erstreckt sich in Nord-Süd-Richtung vom nordwestlichen Rand der Rinne im Osten Gorlebens bis nördlich der Elbe, wobei ihre Oberfläche von Süden nach Norden ansteigt und nahe der Elbe die Grundwasseroberfläche erreicht.

A.2.3 Grundwasserbewegung im Süßwasserkörper

Die großräumige hydrogeologische Situation ist geprägt durch die Lage im Elbestromtal. Die berechneten Neubildungsraten variieren zwischen +200 mm/a im zentralen Bereich der Geest und -80 mm/a in den Flussniederungen, wo aufgrund der geringen Flurabstände und der bindigen Böden die Verdunstung den Niederschlag übersteigt. Das Grundwasser fließt generell von den Höhen der Geest den Niederungen zu. Hier wird der größte Teil des neu gebildeten Grundwassers oberirdisch in die Elbe abgeführt. Nur ein sehr kleiner Teil trägt zu einem elbtalabwärts gerichteten Grundwasserabfluss bei.

Die Geländeoberfläche im Gebiet von Gorleben weist nur sehr geringe Höhenunterschiede auf. Die maximale Höhendifferenz zwischen den Dünenfeldern der Gartower

Tannen im Süden des Salzstocks und der Elbeniederung im Norden beträgt 15 m. Die entsprechende Höhendifferenz des Grundwasserspiegels liegt bei lediglich 6 m. Das oberflächennahe Grundwasser strömt mit geringem Gefälle von 1 bis 1,5 ‰ radial von der Hochlage im Süden des Salzstocks in die umgebenden Senken ab (Abb. A.5c).

A.2.4 Grundwasserbewegung im Salzwasserkörper

Aufgrund der ortsvariablen Salinität der Salzwässer lassen Wasserstandsmessungen im Salzwasserkörper keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die Grundwasserbewegung im Salzwasserkörper zu.

Durch die Salzablaugung im Zentrum der Gorlebener Rinne kommt es zu einer starken Aufsatzung der Grundwässer im unteren Rinnenaquifer. Die Verbreitung dieser hochversalzten Solen ist nicht nur auf die Gorlebener Rinne begrenzt, sondern sie umfasst auch den zentralen Bereich der nordwestlichen Randsenke, deren unterer Aquifer mit den elsterzeitlichen Rinnensanden der Gorlebener Rinne hydraulisch verbunden ist. Messungen der Porenwasserdrücke in Messstellen in der Gorlebener Rinne zeigen ein Druckgefälle innerhalb des Salzwassers in nördliche Richtung. Dies lässt darauf schließen, dass das nördlich gerichtete Süßwasserdruckgefälle in verringertem Maße auch auf das hochsaline Grundwasser übertragen wird. Dies lässt auf einen Salzwassertransport aus der Gorlebener Rinne in den unteren Aquifer der nordwestlichen Randsenke schließen. Die charakteristische Form des Solenkörpers, d. h. seine weitgehend horizontale Oberfläche und seine konvex ausgebildete Unterfläche, ist durch das Zusammenwirken der um 15 bis 20 % höheren Dichte der Salzwässer im Vergleich zu Süßwasser und der Struktur der Randsenkenmulde zu erklären. Die Aquiferbasis im Zentrum der Mulde liegt um etwa 90 m unter dem Niveau der Basis der Gorlebener Rinne unmittelbar nördlich des Salzstocks. Salzwässer, die in der Gorlebener Rinne nach Norden transportiert werden, folgen daher nicht dem weiteren Verlauf der Rinne, sondern werden dem Gefälle der Aquiferbasis folgend nach Nordwesten zum Zentrum der Randsenke abgelenkt, wo sie sich aufgrund ihrer erhöhten Dichte an der Aquiferbasis sammeln (Abb. A.5b). Eine andere prinzipiell mögliche Hypothese, nämlich eine Herkunft der Solen aus tiefen Wasserleitern im Liegenden kann dagegen zweifelsfrei aufgrund der wesentlich geringeren Porenwässersalzgehalte in den liegenden Geringleitern ausgeschlossen werden.

Untersuchungen der Sauerstoff- und Wasserstoff-Isotopenzusammensetzung der Salzwässer in Verbindung mit Messungen der ¹⁴C-Gehalte zeigen, dass die Solen in

der Randsenke pleistozän-kaltzeitlichen Ursprungs sind. Innerhalb des unteren Aquifers der Gorleber Rinne ist die Zusammensetzung der Wässer komplexer. Neben pleistozänen Solen wurden hier einzelne Salzwässer eindeutig holozänen Alters oder Mischwässer beider Wassertypen nachgewiesen. Die teilweise nacheiszeitliche Entstehung dieser Solen belegt einerseits, dass die rezente Wasserbewegung den unteren Rinnenaquifer erfasst, wobei die durch Ablaugung gebildeten Solen ursprünglich vorhandene pleistozäne Wässer verdrängen bzw. sich mit diesen mischen. Andererseits beschränkt sich die teilweise Verdrängung pleistozäner Solen durch junge holozäne Salzwässer bislang nur auf die Gorleber Rinne selbst bzw. auf unmittelbar angrenzende Bereiche. Dies lässt auf einen insgesamt nur geringen Wasserdurchsatz durch den Rinnenaquifer seit dem Pleistozän schließen.

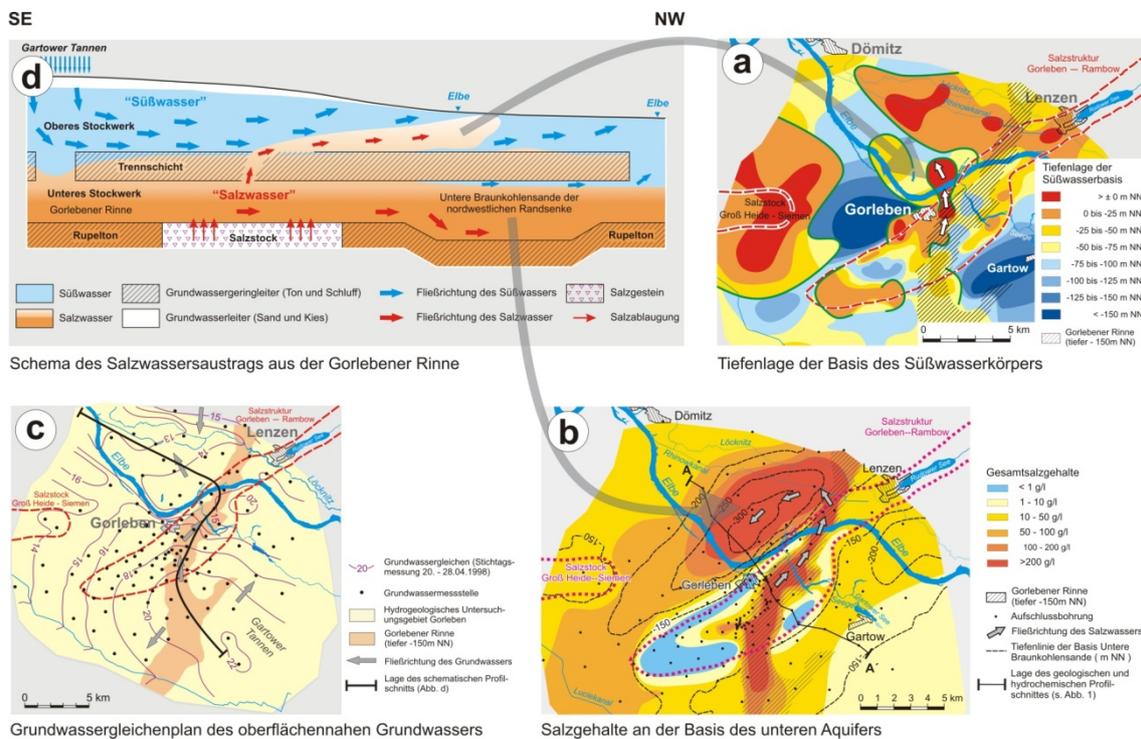


Abb. A. 5 Schema des Salzwassertransports aus der Gorleber Rinne

Der den unteren Aquifer der Gorleber Rinne flächenhaft überlagernde gering durchlässige Lauenburger-Ton-Komplex verhindert prinzipiell den direkten Salzwasserausstrom in den oberflächennahen Grundwasserleiter, jedoch existiert über der Gorleber Rinne die beschriebene, lokal begrenzte Salzwasserhochlage mit außergewöhnlich hohen Salzgehalten. Die Erstreckung dieser Salzwasserhochlage in Richtung des regionalen Grundwasserabstroms und die außergewöhnlich hohen Salzgehalten in ihrem Wurzelbereich machen eine Verbindung dieser Wässer mit den hochsalinen Wässern

des unteren Rinnenaquifers wahrscheinlich, auch wenn durch Erkundungsbohrungen im fraglichen Gebiet keine erhöhten vertikalen Durchlässigkeiten oder Verbreitungslücken im Lauenburger-Ton-Komplex nachgewiesen wurden. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich um Salzwässer aus dem unteren Rinnenaquifer, die über lokal begrenzte hydraulische Fenster in das obere Aquifersystem aufströmen und in den Grundwasseraufstromgebieten der Elbeniederung in verdünnter Form an die Grundwasseroberfläche gelangen (Abb. A.5 a, d).

A.3 Geologie des Salzstocks Gorleben

A.3.1 Entwicklungsgeschichte der Salzstruktur Gorleben-Rambow

Mit Hilfe der Schichtabfolgen vom Zechstein bis Quartär auf und neben der Salzstruktur Gorleben-Rambow lässt sich die Entwicklungsgeschichte des Gebietes rekonstruieren (/ZIR 04/: Randsenkenanalyse). Die Zechsteinabfolge besaß primär eine Mächtigkeit von über 1.000 m. Sie weist heute außerhalb der Salzstöcke nur noch Restmächtigkeiten von 100 bis 500 m auf. Der größte Teil des mobilen Salzes wanderte in die Salzstöcke. Die Zechsteinbasis liegt heute im Strukturbereich in einer Tiefe von etwa -3100 bis -4450 m.

Unter dem Salzstock Gorleben ist die Zechsteinbasis als Hochlage ausgebildet, die zur Entstehung des Salzstocks an dieser Stelle beitrug. Es fehlen bedeutende Störungszonen, die den Salzaufstieg eingeleitet haben könnten. Im Salzeinzugsgebiet des Salzstocks Gorleben sind nach den Ergebnissen der Randsenkenanalyse von den primär max. 1400 m mächtigen Zechsteinsalzen 53 % in den Salzstock gewandert. 185 km³ Salz sind im Salzeinzugsgebiet noch vorhanden, etwa die Hälfte davon ist im Salzstock akkumuliert. Beim Salzaufstieg traten im Bereich des Hauptsalzes in Höhe der geplanten Einlagerungssohle in 870 m Tiefe Salzfließgeschwindigkeiten von max. 0,34 mm/a während der Oberkreide und bis 0,07 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär auf. Die eingewanderten Salzmenge hoben dabei die Salzstockoberfläche etwa 0,08 mm/a zur Oberkreidezeit und 0,02 mm/a im Zeitraum Miozän bis Quartär. Die Berechnungen zur Randsenkenanalyse belegen, dass die Salzeinwanderung seit dem Kreidemaximum bis zur jüngsten geologischen Vergangenheit stetig abnahm.

A.3.2 Hutgestein des Salzstocks Gorleben

Das Hutgestein eines Salzstocks entsteht durch Umkristallisieren aus flüssiger Phase und durch Auflösung der leicht löslichen Salzminerale mit Ablagerung der schwer oder nicht löslichen Bestandteile am Salzspiegel. Im Hutgestein liegen also die jüngsten, aus dem Lösungsvorgang entstehenden Schichten unten am Salzspiegel und die ältesten am Top des Hutgesteins. Hauptanhydrit, Pegmatitanhydrit, die Anhydritmittel aus dem Anhydritmittelsalz sowie alle tonreichen Abfolgen werden in das Hutgestein eingebaut, ohne dass ihr primäres Gefüge verloren geht. Größere Mächtigkeiten von Hutgestein deuten auf das Vorhandensein von Einschaltungen größerer Hauptanhydritblö-

cke oder von Ablaugungsresten des höheren Zechstein 3 in die Hutgesteinsabfolge hin.

Die Oberfläche des Hutgesteins zeigt ein starkes Relief mit Höhenunterschieden von ca. 200 m (Hochlagen: ca. -100 m; Tieflagen: ca. -300 m), was zum einen auf unterschiedliche Hutgesteinsmächtigkeiten und zum anderen auf den Einfluss der quartären Rinne zurückzuführen ist, in der das Hutgestein ganz oder teilweise erodiert wurde. Die erbohrten Mächtigkeiten des Hutgesteins schwanken zwischen maximal 111 m (GoHy 1151) und 0 m (GoHy 1141, GoHy 1290, GoHy 1301). Die mittlere Mächtigkeit des Hutgesteins liegt zwischen 20 und 40 m.

Bestimmte Schichtfolgen mit charakteristischem Gefüge kommen innerhalb des Hutgesteins immer wieder flächenhaft über den gesamten Salzstock verbreitet vor. In der Standardabfolge sind schematisch von oben (alt) nach unten (jung) zu unterscheiden:

- Flaser- und Knollengips,
- Liniengips,
- Sprenkelgips,
- Hutgesteinsbrekzie und
- Geschichtetes Gips- und Anhydritgestein.

Den drei obersten Typen des Hutgesteins ist gemeinsam, dass sie vereinzelt von Klüften und Störungen durchzogen oder von inzwischen verfüllten Hohlräumen durchsetzt sind. Die wenigen vorkommenden sind mit Material aus dem überlagernden Deckgebirge verfüllt. Erst in den unteren Metern der Sprenkelgipsabfolge nimmt die Zerrüttung des Gesteins zu. Während Flaser-/Knollengips, Liniengips, Sprenkelgips sowie Geschichtetes Gips- und Anhydritgestein aus der Umwandlung von Anhydrit in Gips als Folge der Subrosion an der Salzstockoberfläche herzuleiten sind, steht die Bildung der Hutgesteinsbrekzie teilweise in ursächlichem Zusammenhang mit der Formung der elsterzeitlichen Gorlebener Rinne /BOR 08/. Die für die Rinnengenese verantwortlichen, unter hohem Druck stehenden Schmelzwässer sind lateral von der sich bildenden Rinne ausgehend auch in die damalige, salzmechanisch als Schwachstelle anzusehende Grenzfläche zwischen Hutgestein und Salinar eingedrungen und haben dort eine Aufarbeitung des vorhandenen Hutgesteinmaterials bewirkt. Das zur Hutgesteinsbrekzie führende Sedimentationsgeschehen scheint zeitlich mehrphasig nacheinander

stattgefunden zu haben, worauf aufeinander folgende Lagen mit gradierter Schichtung oder andere Sedimentationsstrukturen hindeuten (/MIN 87/: 37ff.). Mit zunehmender Distanz vom Rinnenbereich sind zudem eine Verringerung der Brekzienbildung und eine Abnahme des eiszeitlichen Materials zu beobachten. Da das Alter der Hutgesteinsbrekzie im Zusammenhang mit der Rinnengenese während der Elster-Kaltzeit (spätere Kaltzeiten weisen keine vergleichbaren Rinnenbildungen im Gorlebener Gebiet auf!) herzuleiten ist, kann das Alter der unter ihr liegenden, jüngeren Hutgesteinschichten, bzw. der über ihr liegenden, älteren Abfolgen entsprechend zeitlich eingestuft werden. Die darunter liegenden Schichten sind jünger und die darüber liegenden älter als die Elster-Kaltzeit.

A.3.3 Salzspiegel

Die Lage des Salzspiegels (Grenzfläche zwischen Hutgestein und unterlagerndem Salinar) schwankt zwischen ca. -340 und -160 m (/BOR 91/). Auch im angrenzenden Übergangsbereich zum Salzstock Rambow zwischen Elbe und Lenzen ist der Salzspiegel in Tiefen zwischen -341 und ca. -230 m erbohrt. Auf dem Salzstock Rambow gibt es zwei Bohrungen, die die Salinaroberfläche bei -207 bzw. -91 m angetroffen haben. Im Bereich der Elbe sinkt sie zwischen den Salzstöcken Gorleben und Rambow bis auf ca. -400 m ab.

Mit einer Serie von Bohrungen (z. B. GoHy 1302 – 1305, GoHy 3153, GoHy 3154) wurden die besonderen Veränderungen des mit seinen leicht löslichen Kalium-/Magnesiummineralen am Salzspiegel austreichenden Kaliflözes Staßfurt untersucht. Das Kaliflöz im vollständig abgelaugten Zustand liegt als z. T. rot gefärbtes Steinsalz vor, das mehr oder weniger Gipskristalle, Polyhalit, Hämatitschüppchen (GoHy 3153) oder auch starke Imprägnationen und Lagen von klastischem Deckgebirgsmaterial enthält. Kainitit zeigt z. B. in der Bohrung GoHy 1304 ebenfalls die Einwirkung von Grundwasser auf das Flöz an, da er aus der Umwandlung von Carnallitit abzuleiten ist. Insgesamt ergab sich, dass das Kaliflöz bis in mehreren Zehnermetern durch Ablaugungsprozesse intensiv verändert wurde und in extremen Fällen bis ca. 170 m (GoHy 1305) unterhalb des ursprünglichen Salzspiegels partiell durch Grundwasser verändert sein kann. Auf der anderen Seite ist das in Trümmercarnallitit-Fazies aufgeschlossene Kaliflöz der Bohrung GoHy 3154 (/BOR 88/) ca. 26 m unterhalb des Salzspiegels durch Grundwasser nicht beeinflusst und weist wie das umgebende Hauptsalz weder Umwandlungsprodukte noch andere Veränderungen auf. Daraus ergibt sich, dass die Eindringtiefe der Grundwässer in das Kaliflöz Staßfurt und seine Ablaugung örtlich großen

Unterschieden unterworfen sind. Die Verhältnisse können sich zudem schon auf kurzen Entfernungen ändern. Offenbar findet die Ablaugung aber bevorzugt an solchen Stellen statt, wo sich das Kaliflöz in überkippter Lagerung befindet und die Schutzwirkung des darüber liegenden geringdurchlässigen Grauen Salztons (z3GT) nicht wirksam werden kann.

A.3.4 Subrosion

Die stärkste Subrosion am Salzstock Gorleben erfolgte z. Z. des Diapirstadiums (Ende Malm bis Oberkreide) aufgrund des Salztransports bis zur Geländeoberfläche. Mit der fortschreitenden Sedimentbedeckung des Salzstocks im Tertiär wurde die Subrosion wesentlich geringer. Zum Ende des Tertiär und in der Präglazial-Zeit verringerten sich infolge einer Deckgebirgserosion die tonigen Alttertiärsedimente derart, dass lokal wieder eine verstärkte Subrosion einsetzen konnte. Im südwestlichen Scheitelbereich des Salzstocks Gorleben kam es zur Entstehung eines flachen Sedimentationsbeckens, in dem sich Sedimentakkumulation und subrosionsbedingtes Einsinken die Waage hielten.

Durch die elsterkaltzeitliche Tiefenerosion wurde in der Gorlebener Rinne das Hutgestein, an eng begrenzten Stellen das Salzgestein, auf einer Fläche von ca. 7,5 km² freigelegt. Damit konnte die Subrosion verstärkt einsetzen. Die Ablaugungsintensität erreichte dort in der kurzen Zeitspanne der Ablagerung der elsterglazialen Schmelzwassersande ihr quartäres Maximum. Das Ausmaß der Subrosion, die sich nach der Bildung von Rinne und Hutgesteinsbrekzie ereignete, wird durch die Mächtigkeit des Geschichteten Gips- und Anhydritgesteins dokumentiert.

Die weichselzeitliche Niederterrasse als jüngster geologischer Leithorizont (117.000 bis 14.400 Jahre) wurde im Rahmen der quartärgeologischen Kartierungen eingehend untersucht. Basis- und Mächtigkeitskarten der Niederterrasse weisen im Rahmen der Kartiergenauigkeit keine Formen auf, die auf Subrosion schließen lassen. Somit lassen sich für die letzten 128.000 Jahre mit geologischen Methoden keine Subrosions- oder Einsenkungsbewegungen nachweisen. Heute liegt im Gegensatz zu dem Zeitraum vom Präglazial bis zur Elster-Kaltzeit der Salzspiegel wesentlich tiefer, so dass in der Gegenwart und in Zukunft Subrosion zwar möglich, die Ablaugungsraten aber unter den gegebenen hydrogeologischen Bedingungen gering sein werden.

A.3.5 Stratigraphie und Lithologie

Bei der Beschreibung der Schichtfolgen sind zwei unterschiedliche Bereiche im Salzstock Gorleben zu unterscheiden (/BOR 04/, /BOR 08/). Zum einen handelt es sich hierbei um die Kernzone des Salzstocks, vertreten durch Schichten des Hauptsalzes (z2HS) der Staßfurt-Folge, sowie zum anderen um die bis zum Salzstockrand reichenden jüngeren Schichtfolgen der Leine- und Aller-Folge (z3, z4). Die unterschiedlichen Bewegungen der beiden Salzstockbereiche werden durch das Kaliflöz Staßfurt im Grenzbereich Staßfurt-/Leine-Folge mit extremer Ausdünnung oder intensiver Verfaltung und Anstauung ausgeglichen. Der generelle Unterschied der Schichten in den beiden Bereichen besteht darin, dass die sedimentären Strukturen des Hauptsalzes infolge des zurückgelegten Aufstiegsweges zumeist zerstört ist. Die jüngeren Schichten der Leine- und Aller-Folge dagegen haben keine längeren Wege zurückgelegt und sind daher nur intensiv verfaltet. Ihre primär-sedimentären Kennzeichen blieben zumeist erhalten. Bei der Erkundung des Bergwerkbereiches oder des Salzstocks durch Bohrungen wurden bis zum Jahr 2000 Schichten vom Basissalz der Staßfurt-Folge, über die der Leine-Folge bis zum Tonbrockensalz der Aller-Folge angetroffen (Tab. A.1).

Tab. A. 1 Erkundete, vereinfachte Schichtenfolge des Salzstocks Gorleben

Abteilung	Gruppe	Formation	Lithologie	Symbol	Mächtigkeit (m)
Zechstein 4 (Aller-Folge)					
	Tonbrockensalz		vorwiegend Steinsalz	z4TS	ca. 15
	Rosensalz			z4RS	ca. 4
	Schneesalz			z4SS	ca. 4
	Basissalz			z4BS	ca. 25
	Pegmatitanhydrit		Anhydrit	z4PA	ca. 1,5
	Roter Salzton		Salzton	z4RT	ca. 10
Zechstein 3 (Leine-Folge)					
	Tonmittelsalz		vorwiegend Steinsalz	z3TM	ca. 36
	Kaliflöz Riedel		Kalisalz	z3RI	ca. 10
	Schwadensalz		vorwiegend Steinsalz	z3SS	ca. 12
	Anhydritmittelsalz			z3AM	ca. 60
	Buntes Salz			z3BT	ca. 12
	Kaliflöz Bergmanns-segen		Kalisalz	z3BE	ca. 15
	Bändersalz		vorwiegend Steinsalz	z3BD	} ca. 14
	Banksalz			z3BK	
	Orangesalz			z3OS	ca. 50
		Oberes Orangesalz		z3OSO	
		Gorleben-Bank		z3OSM	0-0,7
		Unteres Orangesalz	z3OSU		
	Liniensalz			z3LS	ca. 30
	Basissalz			z3BS	ca. 15
	Hauptanhydrit		Anhydrit	z3HA	ca. 40-80
	Leine-Karbonat		Karbonat	z3LK	ca. 1,5
	Grauer Salzton		Salzton	z3GT	ca. 2,5
Zechstein 2 (Staßfurt-F.)					
	Gebänderter Deckanhydrit		Anhydrit	z2DA	ca. 1,5
	Decksteinsalz		vorwiegend Steinsalz	z2DS	ca. 0,2-0,5
	Kaliflöz Staßfurt		Kalisalz	z2SF	15-30
	Kieseritische Übergangsschichten		Steinsalz	z2UE	0-2,5
	Hangendsalz			z2HG	max. 10
	Hauptsalz			z2HS	
		Kristallbrockensalz		z2HS3	ca. 60
		Streifensalz		z2HS2	} ca. 700-800
		Knäuelsalz	z2HS1		
	Basissalz			z2BS	ca. 20

Steißfurt-Folge

Die Salze der Steißfurt-Folge (Zechstein 2) liegen infolge ihrer starken Durchbewegung während des Salzaufstiegs als salztektonische Brekzie vor. Der ursprüngliche primär sedimentäre (diagenetische) Schichtverband ist während des Aufstiegs durch Zerschneiden und Wiederverheilen überwiegend zerstört und homogenisiert worden (/BOR 00/).

Die Halitschichten der Steißfurt-Folge werden in drei Schichtglieder aufgeteilt, das Basissalz (z2BS), das Hauptsalz (z2HS) und das Hangendsalz (z2HG). Im Hauptsalz soll das Endlager errichtet werden. Über dem Hangendsalz folgen mit den Kieseritischen Übergangsschichten (z2UE) und dem Kaliflös Steißfurt (z2SF) Kalium/Magnesiumhaltige Salzgesteine, die von halitischen und anhydritischen Salzgesteinen (Decksteinsalz: z2DS und Gebänderter Deckanhydrit: z2DA) als Abschluss der Steißfurt-Folge überlagert werden.

Leine-Folge

Der Graue Salzton (z3GT) bildet die Basis der Leine-Folge (Zechstein 3). Bereichsweise ist die Abfolge aus z3GT, z3LK und z3HA stark geklüftet. Die Grenze zum darauf folgenden Leine-Karbonat (z3LK) zeichnet sich durch den Materialwechsel von einem schwarzen Tonstein zu beigegrauem anhydritischen Magnesitgestein deutlich ab. Mit einer ebenso leicht erkennbaren Grenze lagert der Hauptanhydrit (z3HA) dem Leine-Karbonat auf. Die Mächtigkeiten des während des Aufstiegs in einzelne Schollen zerbrochenen Hauptanhydrit liegen zwischen 40 und 80 m. Die Hauptanhydritschollen weisen z. T. ein offenes, Fluid erfülltes Klufnetz auf.

Die halitische Abscheidungsphase der Leine-Folge setzt mit dem Basissalz (z3BS) an einer scharfen Grenze über dem Hauptanhydrit ein. Darüber folgt das Liniensalz (z3LS). Es enthält 230 charakteristische, teilweise feingeschichtete, regelmäßige Anhydritlinien.

Über dem Liniensalz lagert das Orangesalz (z3OS), das in das Untere (z3OSU), Mittlere (z3OSM) und Obere Orangesalz (z3OSO) gegliedert werden kann. Die Dreigliederung ergibt sich aus einer vorwiegend aus Anhydrit bestehenden Bank. Sie wird als Mittleres Orangesalz oder auch als **Gorleben-Bank** bezeichnet. Sie besteht vereinfacht aus einer Folge von mit Polyhalit- und Anhydritflocken verunreinigten Steinsalzhorizonten, feinkristallinem oder geschichtetem Anhydritgestein und einer Tonlage.

Eine darin speziell auszuhaltende Zone bildet eine immer schichtparallel verlaufende mit halitischen oder carnallitischen Bestegen verheilte Bewegungszone, welche Öffnungsweiten von 0,1 bis 34 cm erreicht. Die tonige Bewegungszone der Gorleben-Bank wirkte während der Faltung als Scherhorizont zwischen dem Unteren und Oberen Orangesalz. Kennzeichnend für die geschichteten Anhydritlagen der Gorleben Bank sind Mächtigkeitsschwankungen und lokal eine Lösungs- und Gasführung.

Über dem Orangesalz lagern das Bank-/Bändersalz (z3BK/BD), das Bunte Salz (z3BT) und das Schwadensalz (z3SS). Auf dem Schwadensalz folgt der ca. 10 m mächtige Horizont des vertaubten Kaliflözes Riedel (z3RI/na). Die Leine-Folge schließt mit dem Tonmittelsalz (z3TM) ab, das aus einer Wechselfolge von Steinsalzschiefern mit anhydritischen Einlagerungen und tonigen, untergeordnet schluffig-feinsandigen Zwischenschichten besteht.

Aller-Folge

Der Rote Salzton (z4RT) bildet die pelitische Basis der Aller-Folge (Zechstein 4) und besteht aus rotbraunem Tonstein, der teilweise bis zu 5 cm große anhydritische Feinsandsteinknollen sowie bis zu 2 cm große deformierte idiomorphe Steinsalzkristalle enthält.

Das jüngste erbohrte Schichtglied der Aller-Folge ist das Tonbrockensalz (z4TS). Es wurde aufgrund der unterschiedlichen Ausbildung der Toneinlagerungen in das Untere und Obere Tonbrockensalz (z4TSU bzw. z4TSO) unterteilt.

A.3.6 Klüfte und Störungen im Salinargestein

Feine, nicht oder nur wenig geöffnete Gesteinsfugen, an denen keine wesentliche Bewegung stattgefunden hat, werden als Klüfte bezeichnet. Sie unterscheiden sich damit von Störungen, an denen ein Versatz des Gesteinsverbandes vorliegt. Klüfte und Störungen wurden bei der über- und untertägigen Erkundung des Salzstocks Gorleben in mehreren Salzstockbereichen angetroffen und lagen bis auf wenige Ausnahmen verheilt vor. Die Klüfte treten hauptsächlich im Grenzbereich von kompetenten und inkompetenten (z. B. Zechstein 2/3-Grenzbereich) bzw. in den kompetenten (z. B. Hauptanhydrit) Salzgesteinen auf.

Die im Salzstock angetroffenen Klüfte sind schichtparallel oder winkelig zur Schichtung angelegt, wobei ihre jeweilige Geometrie (Verlauf, Öffnungsweite, Länge) von den Materialeigenschaften und der Beanspruchung der Salzgesteine abhängt. Das Auftreten von Klüften in halitischen Salinargesteinen ist an bestimmte salztektonische Positionen geknüpft. Bisher wurden im Hauptanhydrit Klüftweiten von Millimeter- bis Metergröße und Klüftlängen im Dezimeter- bis Zehnermeter-Bereich festgestellt. Nach /BOR 08/: S. 183 schwanken im Hauptanhydrit die Abstände der Klüfte unregelmäßig. Es konnten keine Abhängigkeiten zwischen den auftretenden Klüftabständen und Lithologie oder Bankung festgestellt werden.

Klüftvorkommen im Salzstock Gorleben sind im Wesentlichen auf die Bereiche Hauptanhydrit (z3HA), teilweise auf Basissalz/Unteres Liniensalz (z3BS/z3LSU), Mittleres Orangesalz (Gorleben-Bank, z3OSM), Anhydritmittelsalz (z3AM), Tonmittelsalz (z3TM), Tonbrockensalz (z4TS) sowie Kristallbrockensalz (z2HS3) und Hangendsalz (z2HG) beschränkt. Die bisherigen Erkundungsergebnisse lieferten keine Hinweise auf offene geogene Klüfte im Kernbereich des Hauptsalzes. Auch im Salzspiegelbereich wurden bisher nur geschlossene und durch Mineralneubildungen verheilte Klüfte angetroffen.

A.3.7 Lösungsvorkommen im Salinargestein

Die angetroffenen Lösungsvorkommen sind nicht beliebig im Salzstock verteilt, sondern an bestimmte stratigraphische Horizonte mit einer entsprechenden lithologischen und strukturellen Ausbildung gebunden. Diese Horizonte zeichnen sich durch größere Anteile rigider Gesteinsarten aus. Im Hauptsalz, das durch eine Deformation und Homogenisierung gekennzeichnet ist, kommen verglichen mit den vorher genannten keine nennenswerten Mengen von Lösungen vor (/BOR 04/: 83). Diese Gesetzmäßigkeit erlaubt es bei bekanntem geologischem Bau der Struktur, mögliche Lösungszutritte und ihr Ausmaß bei der Auffahrung vorherzusehen.

Bei der bisherigen Erkundung wurden Lösungszutritte hauptsächlich in den anhydritischen Gesteinen der Leine-Folge (z3) bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld angetroffen, in denen klüft- oder schichtgebundene Speicherräume möglich sind. Die angetroffenen Lösungen stehen unter petrostatischem Druck, was eine Verbindung zu den über dem Salzstock befindlichen Aquiferen ausschließt (/NOW 02/: 10ff.). Des Weiteren treten Lösungszutritte an der Grenze zwischen der Staßfurt- und der Leine-Folge (z2/z3) auf.

Vom Zechstein 2, aus dem Bereich des Hauptsalzes sind Lösungszutritte lediglich als Feuchtstellen z. T. ohne erkennbare Zutrittspunkte bekannt.

Als maximal mögliche Volumina der bisher angetroffenen Reservoirs wurden je nach stratigraphischem Horizont, in dem die Lösungen gespeichert sind, Werte zwischen wenigen cm^3 im Hauptsalz (z2) und einigen 10^3 m^3 im Hauptanhydrit bzw. im Grenzbe-
reich der z2/z3-Folge (/NOW 02/: 62ff.; auch /SCM 09/: 101) berechnet. Die Größe der
Zutritte im Hauptanhydrit ist abhängig von der Größe der Hauptanhydritschollen.

Neben den kluftgebundenen Lösungen existieren μm bis mm große inter- und intrakris-
talline (fluid inclusions) Lösungseinschlüsse. Der durchschnittliche Lösungsgehalt
(H_2O) des Hauptsalzes im Salzstock Gorleben beträgt nach den bisherigen Erkun-
dungsergebnissen $< 0,02 \text{ Gew.-%}$.

Bei den salinaren Lösungen handelt es sich nach /BOR 08/ um natürliche (Rest-,
Misch- und Metamorphoselösungen) sowie technisch bedingte (anthropogen in Erkun-
dungsbergwerk eingebrachte) Lösungen. Entstanden sind die natürlichen salzstockin-
ternen Lösungen entweder durch Mischung primärer Meerwasserrestlösung mit NaCl -
gesättigten Lösungen oder aus der Reaktion von Kaliflözgestein mit NaCl -gesättigten
Lösungen. Anhand charakteristischer geochemischer Signaturen konnte nachgewiesen
werden, dass die Lösungen im Verlauf der durch die Halokinese hervorgerufenen salz-
stockinternen Migration zum Teil mit Schichtsilikaten und/oder Karbonaten (Grauer
Salzton, Leine-Karbonat) reagierten (/SCM 09/).

A.3.8 Kohlenwasserstoff- und Gasvorkommen im Salinargestein

Kohlenwasserstoffe

Beim Auffahren des Bergwerkes sowie bei den vorangehenden Erkundungsarbeiten
wurden Kohlenwasserstoffvorkommen angetroffen. Die KW-Vorkommen waren an fol-
gende Bereiche gebunden:

- Kluftspeicher in Anhydritgesteinen oder Tonsteinen,
- durch sekundäres Steinsalz verheilte Störungs- oder Kluftzonen im Grenzbereich
z2/z3 und teilweise im Liegenden der Gorleben-Bank,
- ausgedünntes Kaliflöz Staßfurt im Grenzbereich z2/z3 bei Abwesenheit der Schich-
ten des Gebänderten Deckanhydrits bis Hauptanhydrits.

In den Schachtvorbohrungen Go 5001 und Go 5002 traten flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe zu. Go 5001 hatte vor allem zwischen 864,5 und 872 m im Bank-/Bändersalz (z3BK/BD; Zutrittsstelle war die Gorleben-Bank bei 857 m) sowie zwischen 960,0 und 967,8 m im Orangesalz (z3OS) ihre Zuflüsse. Die Zuflussmessungen in der Bohrung Go 5001 ergaben Werte von knapp 5 m³ Kondensat, während die Zuflusswerte der Bohrung Go 5002 insgesamt sehr gering waren. Weitere Hinweise auf das Vorkommen von Gas ergaben sich aus dem Auftreten von „Knistersalzen“. Sie wurden in verschiedenen Steinsalzhorizonten und im Carnallitit angetroffen.

Nahezu ausschließlich im Knäuelsalz (z2HS1), der ältesten Schichtfolge des Hauptsalzes, das Anhydrit in disperser sowie Anhydritknollen und -knäuel in unregelmäßiger Verteilung enthält (BOR 08/: 85, wurden geringfügige Zutritte von Kondensat und Gas festgestellt (vgl. /NOW 02/: 58ff.). Die Verteilung der innerhalb des Knäuelsalzes gefundenen Kondensatvorkommen ist unregelmäßig und eine Gesetzmäßigkeit bezüglich der Lage in der Gesamtstruktur des Hauptsalzsattels ist nicht erkennbar. Im Kernmaßstab machen sich allerdings zwischen KW-imprägnierten und benachbarten KW-freien Bereichen nach /POP 02/ signifikante Unterschiede im Korngefüge und der Br-Verteilung bemerkbar, die möglicherweise auf eine tektonische Beanspruchung dieser Salzpartien hindeuten. Die Vorkommen sind bei länglicher bandartiger Erstreckung annähernd schichtig ausgerichtet, wobei sich der KW-imprägnierte Bereich durch eine stärkere Ausrichtung des Korngefüges und erhöhte Br-Gehalte auszeichnet (/POP 02/).

An eindeutig kondensatführendem Material des Knäuelsalzes wurden Einschlussvolumina mit einer Variationsbreite von 0,04 und ca. 250 ml/m³ bestimmt (/POP 02/. Diese Werte entsprechen einem Volumenanteil von nicht mehr als rund 0,02 bis 0,03 % KW im Gestein.

Bislang durchgeführte isotopengeochemische Untersuchungen (/GER 02/) und erdölgeologische Beckenmodellierungen (/CRA 05a/: 33) zeigen, dass als Muttergestein der Staßfurt-Karbonat (z2SK) anzusehen ist. Die Modellierung des Erdöl- und Erdgaspotenzials ergab weder für die heutige Situation noch für eine Zeit der geologischen Vergangenheit eine wirtschaftlich relevante Akkumulation von KW im Bereich der Salzstruktur Gorleben-Rambow (/CRA 05a/: 37; /CRA 05b/).

Gase

Neben den gasförmigen Kohlenwasserstoffen kommen größere Mengen an molekularem Stickstoff vor, wie die Analysedaten der freien Gaszutritte belegen. Darüber hinaus sind aus den Salzgesteinen auch Gase bzw. Gasgemische bekannt (N_2 , O_2 , H_2 , H_2S , CH_4), die in den kleinen, μm - bis mm -großen Einschlüssen (fluid inclusions) vorhanden sind.

Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Gruppen von Gasen oder Gasgemischen in den Einschlüssen vorhanden: die stickstoffhaltigen und die stickstofffreien (/SIE 01/). Erstere können O_2 enthalten, letztere sind generell O_2 -frei. Für die stickstoff- und sauerstoffhaltigen Gase besteht die Vermutung, dass es sich bei diesen Gasen wegen ihres der heutigen Atmosphäre ähnelnden N_2/O_2 -Verhältnisses um eine eingeschlossene Paläoatmosphäre aus der Zechstein-Zeit handeln könnte. Reine Stickstoffeinschlüsse befinden sich immer in direkter Nachbarschaft zu N_2-O_2 -führenden Einschlüssen. Sauerstoff und Stickstoff wurden niemals zusammen mit H_2 und H_2S gefunden. Salzgesteinshorizonte mit zahlreichen Einschlüssen von N_2-O_2 - oder N_2 -Gasen zeigen nur selten andere Einschlüsse mit N_2 , CH_4 -, H_2 - und H_2S -Gasen und umgekehrt.

Die häufigsten Gasgemische der stickstoffhaltigen Gruppe setzen sich aus N_2 und CH_4 oder N_2 , CH_4 und H_2 zusammen. Diese Gemische werden aus dem Abbau organischer Substanz unter anoxischen Bedingungen abgeleitet wie sie z. B. für die Verhältnisse des Staßfurt-Karbonats zutreffen. Eine entsprechende Erklärung gilt für die Genese der Stickstoff (N_2)-freien Gasgruppe.

Hinsichtlich der Stickstoffanteile ist nicht auszuschließen, dass sie zumindest teilweise auch durch Entgasungsprozesse aus unterliegenden frühpermischen oder karbonischen Sedimentgesteinen herzuleiten sind, die über hohe Anteile an organischen Substanzen verfügen. Der migrierende Stickstoff müsste dann während des Frühstadiums der Halokinese in den Salzgesteinen eingeschlossen worden sein. Reine N_2 -Einschlüsse kommen gehäuft im Knäuel- und Streifensalz (z2HS1, z2HS2) vor. Im Kristallbrockensalz (z2HS3) überwiegen Einschlüsse mit einer N_2-CH_4 -Zusammensetzung (/ELL 99/).

Die Untersuchungen von /PRO 98/ ergaben, dass bei H_2 -haltigen Einschlüssen der Großteil der Proben einen Wasserstoffanteil von unter 15 Vol.-% besitzt. Das gilt insbesondere für solche aus dem Zechstein 2. Zechstein 3-Proben weisen in der Mehr-

zahl kleinere H₂-Gehalte von < 3 Vol.-% auf (/ELL 99/). Eine Entstehung des Wasserstoffes innerhalb der Einschlüsse ist in der Regel auszuschließen. Die Diffusion von H₂ aus großen Tiefen oder aus den die Zechstein-Salze direkt unterlagernden Gesteinen ist denkbar. Möglich ist auch die Zersetzung von Ammoniumverbindungen als Erklärung für die H₂-haltigen Einschlüsse. Da jedoch N₂ nicht in allen H₂-haltigen Einschlüssen vorkommt, dagegen aber CH₄ und H₂ immer zusammen anzutreffen sind, ist die Methanogenese von organischen Molekülen im reduzierenden Milieu als Wasserstoffquelle wahrscheinlicher als die vorher genannten Möglichkeiten. Dies lässt auch den Schluss zu, dass der in den Einschlüssen gefundene Wasserstoff dort seit ihrer Bildung vorliegt, was auf eine geringe Möglichkeit einer diffusiven Migration des Wasserstoffes durch das Salzgestein hindeutet (s. a. /PRO 98/: 55; /SIE 01/).

Das Vorkommen von H₂S in Evaporiten kann auf bakterielle oder thermische Sulfatreduktion zurückgeführt werden. Werden Sedimente in größere Tiefen abgesenkt, so besteht die Möglichkeit, dass aus organischen Schwefelverbindungen und der Reaktion von Kohlenwasserstoffen mit Sulfatmineralen oder gelöstem Sulfat bei Temperaturen um 100 °C Schwefelwasserstoff entsteht (/HER 87/: 42). Dies würde das gemeinsame Auftreten von CH₄ und H₂S erklären (/ELL 99/: 74).

A.4 Geologische Langzeitprognose

Die im Rahmen der VSG (AP 2) erstellte geowissenschaftliche Langzeitprognose beschreibt die geologische Entwicklung des Standortes Gorleben ohne die Einflüsse eines Endlagers für die nächsten eine Million Jahre. Die Prognose basiert auf dem Aktualitätsprinzip, das besagt, dass die naturwissenschaftlichen Grundgesetze auch in Zukunft gültig sind und dass die daraus resultierenden Prozesse, in gleicher Weise wie in der Vergangenheit ablaufen werden. Auf diese Weise können vergangene Entwicklungen in die Zukunft extrapoliert werden und eine Abschätzung von zukünftigen Gegebenheiten am Standort Gorleben erfolgen. Angelehnt an die Einstufungen im FEP-Katalog sind die Hauptgliederungsebenen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose die Beschreibung der Rahmenbedingungen am Standort Gorleben, der wahrscheinlichen Entwicklungen sowie der wenig wahrscheinlichen oder auszuschließenden. Ergänzend erfolgt eine Diskussion der Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen.

A.4.1 Ableitung der zukünftigen Rahmenbedingung

Rahmenbedingungen sind die allgemeinen klimatischen, geomorphologischen, geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten am Standort Gorleben. Zusammengefasst sind im vorliegenden Bericht die in Zukunft zu erwartenden Rahmenbedingungen und deren Entwicklungsunsicherheiten.

Für die Prognose des zukünftig am Standort Gorleben herrschenden **Klimas** bilden die natürlichen Einflüsse die Grundlage. Anthropogene Eingriffe fließen nicht in die Prognose ein, da deren Auswirkungen sehr ungewiss sind. Erwartet wird, dass die Klimaänderungen weiterhin dem seit 800.000 Jahren vorherrschenden 100.000-Jahre-Zyklus folgen werden. In einer Million Jahre ist daher am Standort Gorleben mit ca. zehn weiteren Kaltzeiten und dazugehörigen Warmzeiten zu rechnen, deren Temperaturmaxima und -minima denen der Vergangenheit entsprechen werden. Als Folge davon sind in Zukunft kaltzeitliche Inlandeisüberdeckungen und warmzeitliche Meeresüberdeckungen am Standort Gorleben möglich, deren genaues zeitliches Auftreten und Intensität/Ausmaß insbesondere in späten Entwicklungsphasen jedoch nicht vorhersagbar sind. Erschwert wird die Klimaprognose durch:

- die zahlreichen beeinflussenden und steuernden Komponenten, die berücksichtigt werden müssen und deren Datengrundlage z. T. unvollständig ist,
- die nach aktuellem Stand der Forschung noch unzureichenden Kenntnisse über Prozessabläufe und Verzahnungen von Teilprozessen und
- die Leistungsgrenzen von Klimamodellen.

Bei der Bewertung der zukünftigen Veränderungen der **Geomorphologie** werden die Topographie und die Oberflächengewässer am Standort Gorleben betrachtet. Umgestaltungen der **Topographie** werden vor allem in Kaltzeiten und untergeordnet auch durch langfristig ablaufende Prozesse wie z. B. Sedimentation und Erosion erwartet. Für die Zukunft kann nur der Ablauf der Veränderungen vorhergesagt werden, da eine Vielzahl von sich z. T. auch überlagernden Prozessen wirken, die unterschiedliche Ergebnisse haben können. Bei einem Fortwirken der Prozesse der Vergangenheit ist innerhalb der nächsten einen Million Jahre nicht mit einer grundlegenden Änderung der Topographie, z. B. in Form eines stark ausgeprägten Reliefs, zu rechnen. Die **Oberflächengewässer** müssen für die zukünftige Entwicklung des Standortes nicht betrachtet werden, da sie kaum Einflüsse auf das Gesamtsystem haben und entsprechend der

Umgestaltung der Topographie in der heutigen Form nicht fortbestehen werden. Oberflächengewässer werden sich in der nächsten einen Million Jahre jeweils entsprechend der dann vorherrschenden klimatischen Situation ausbilden.

Die heutige Zusammensetzung und der strukturelle Aufbau des **Deck- und Nebengebirges** wurden durch zahlreiche Prozesse geschaffen, die auch zukünftig wirken. Insbesondere die kommenden Kalt- und Warmzeiten werden das Deckgebirge, z. B. durch intensive Erosion oder Sedimentation, wie in der Vergangenheit umgestalten. Es wird daher erwartet, dass ein zukünftiges Deckgebirge ähnlich ausgebildet sein wird, wie das heutige. Exakte Angaben über Art und Mächtigkeit der zukünftig abgelagerten Schichten oder an welcher Stelle diese von einer Erosion betroffen sein werden können nicht gemacht werden, da vor allem die klimaabhängigen Prozesse zeitlich und räumlich nicht genau eingegrenzt werden können.

Im Kapitel **Hydrogeologie** werden in der Langzeitprognose die zukünftigen Veränderungen der Grundwasserströmung und des -chemismus beschrieben. Eine zusammenfassende Beschreibung des Ausgangszustandes ist in diesem Bericht in Kapitel A3 wiedergegeben. Als Grundwasserleiter, bzw. -geringleiter werden auch in Zukunft die Lockergesteinsschichten des Deck- und Nebengebirges wirksam sein. Die **Grundwasserströmung** bleibt als Rahmenbedingungen über den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre bestehen. Lediglich unter Permafrostbedingungen kann sie am Standort zeitlich begrenzt zum Erliegen kommen. Die Veränderungen der Grundwasserfließrichtung sind neben klimatischen Einflüssen auch von der Ausgestaltung des Deckgebirges abhängig und somit über den gesamten Betrachtungszeitraum nicht exakt prognostizierbar. Bei den an die Grundwasserströmung gekoppelten **hydrochemischen Verhältnissen** besteht ebenfalls eine Abhängigkeit von mehreren Faktoren, die den Stoffeintrag in das System und als Folge davon die hydrochemischen Prozesse verändern. Für die Zukunft kann davon ausgegangen werden, dass der in Norddeutschland weit verbreitete Anstieg der Gesamtsalzgehalte in den Wässern mit zunehmender Tiefe bestehen bleibt, da er sich auch nach intensiven, z. B. klimatisch bedingten, Eingriffen wieder einstellt. Am Standort Gorleben wird auch in Zukunft erwartet, dass es im Bereich des Hutgesteins oder bei einem Kontakt des Grundwassers mit dem Salzspiegel zu einer Aufsalzung kommt, die zu gesättigten Lösungen mit höherer Viskosität führt. Dadurch bleibt die Fließgeschwindigkeit der Wässer dort im Betrachtungszeitraum herabgesetzt. Aufgrund der für die Zukunft unbekanntem genauen Sedimentzusammensetzung und der unbekanntem zeitlichen Änderung der Stoffeinträ-

ge ist eine genaue Prognose der hydrochemischen Verhältnisse besonders in den oberen Aquiferbereichen und in späten Zeiten der Entwicklung nicht möglich.

In Kapitel 4 dieses Berichts ist der Ausgangszustand im **Salzstock Gorleben** beschrieben, so dass nachfolgend nur die zukünftige Entwicklung behandelt wird. In der nächsten eine Million Jahre sind bei der **Zusammensetzung des Salinars** im Salzstock Gorleben keine Änderungen zu erwarten, da dort kein nennenswerter Stoffein- oder Stoffaustrag stattfinden wird. Lediglich am Salzspiegel werden Prozesse wie die Subrosion oder die Erosion, z. B. bei einer glazialen Rinnenbildung, zu engräumigen Veränderungen führen. Aufgrund des abnehmenden Diapirismus ist auch nicht mit einer grundlegenden Umgestaltung des Internbaus im Salzstock Gorleben zu rechnen. Ungewissheiten der Entwicklungen im Salinar resultieren aus den einwirkenden Prozessen und werden bei diesen erläutert. Für die **Klüfte und Störungen im Salinar** wird angenommen, dass der über längere Zeiträume bestehende aktuelle Zustand mit der schichtspezifischen Verteilung und Art fortbesteht. Daran gebunden wird nicht erwartet, dass im Salinar in Zukunft zusammenhängende Kluffnetze entstehen, die Wegsamkeiten für Lösungen oder eindringendes Grundwasser ausbilden. Ungewissheiten bei der Prognose ergeben sich aus der Tatsache, dass die Erkundung und Bewertung dieser Faktoren im Salzstock noch nicht abgeschlossen sind. Ungewiss ist derzeit auch wie und in welchem Zeitrahmen sich die Entwicklung der Klüfte und Störungen von ihrer Anlage bis zum Verheilen vollzogen hat. Die **Fluidvorkommen** (Lösungen und Gase) im Salinar des Salzstocks Gorleben treten in bestimmten stratigraphischen Horizonten an Korngrenzen bzw. interkristallin oder in Klüften und Störungen auf. Ein nachträgliches Eindringen von Fluiden über oberflächennah wirkende Prozesse hinaus in tiefere Bereiche des Salzstocks konnte nicht nachgewiesen werden und wird auch für die zukünftige eine Million Jahre nicht angenommen. Lediglich im Bereich von lösungserfüllten Klüften in Anhydritgesteinen sind Lösungswege möglich, die aufgrund der vorhandenen Boudinage-Strukturen und der Zerblockung jedoch nicht über weite Strecken durchgängig sind. Ungewissheiten bei der Prognose ergeben sich hauptsächlich durch die noch nicht abgeschlossene Erkundung. Außerdem ist die im geringen Maße ablaufende interne Mobilisierung der Fluide und die damit verbundene Wechselwirkung mit dem Gestein noch nicht ausreichend bekannt. Ungewiss ist zudem die Prognose der möglichen Reservoirgrößen im Hauptanhydrit, da sie von der Größe der Einzelschollen abhängt, die außerhalb des erkundeten Bereichs noch nicht bekannt ist. Eine besondere Beachtung erfahren die **Kohlenwasserstoffe im Salinar**, die unregelmäßig verteilt vorliegen. Es wird erwartet, dass dieser Zustand bestehen bleibt, da deren Mobilisierung an den schwächer werdenden Diapirismus gekoppelt ist, der in der nächsten ei-

nen Million Jahre nur geringe Veränderungen hervorrufen wird. Ungewiss ist, ob die derzeitigen Forschungen zu diesem Thema Erkenntnisse liefern werden, die sich auf die derzeitige Bewertung der Situation auswirken werden.

A.4.2 Wahrscheinliche zukünftige geologische Entwicklungen am Standort Gorleben

Bei den wahrscheinlichen zukünftigen geologischen Entwicklungen handelt es sich um die Prozesse, die in der nächsten eine Million Jahre am Standort Gorleben eintreten werden oder die permanent ablaufen und die rezenten Gegebenheiten verändern.

A.4.3 Überregionale Entwicklungen

Das Andauern der auch im Standortbereich Gorleben nachgewiesenen **Senkung der Erdkruste** hätte in der nächsten eine Million Jahre am Salzstock Gorleben keine Auswirkungen, da die darauf basierende Transgression in diesem Bereich nicht zu einer Meeresüberflutung führen würde.

Krustendeformationen im Ergebnis von Gletscherüberfahrungen am Standort Gorleben konnten für die Vergangenheit nicht nachgewiesen werden und sind auch in Zukunft nur in geringem Umfang möglich, wenn ein Inlandgletscher dort für längere Zeit mit einer großen Mächtigkeit zu liegen kommt. Eine exakte Vorhersage, ob dies tatsächlich eintreten wird ist jedoch aufgrund des ungenügend prognostizierbaren Klimaverlaufs (s. o.) nicht möglich. Insgesamt ist dennoch zu erwarten, dass eine solche Situation entsprechend der Klimaschwankungen nicht lange genug anhält, um Auswirkungen in einem Umfang zu erzeugen, der das System messbar beeinflussen würde.

Die **neotektonischen Vorgänge** beinhalten alle tektonischen Prozesse, die ungefähr seit dem Beginn des Neogen, vor ca. 23 Millionen Jahren, Deformationen ausgelöst haben oder sie rezent auslösen. Im Bereich Gorleben ist aufgrund der langfristig stabilen plattentektonischen Lage nicht damit zu rechnen, dass diese Prozesse in der nächsten einen Million Jahre Auswirkungen haben werden. Die Ungewissheiten der Prognose sind als sehr gering einzuschätzen, da das Spannungsfeld im gesamten westeuropäischen Raum nur wenig variiert und stabil ist.

Wird Deformationsenergie, die sich in begrenzten Bereichen der Lithosphäre aufgebaut hat, plötzlich freigesetzt, entstehen **Erdbeben**. Historisch wurden im direkten Umfeld

von Gorleben keine tektonisch bedingten Erdbeben oder Mikrobeben dokumentiert. Als Prognose wird für den Nachweiszeitraum am Standort ein deterministisch ermitteltes Bemessungserdbeben zugrunde gelegt, das basierend auf verschiedenen Arbeiten eine Intensität von 7,3 (MSK) aufweist. Aufgrund von Untersuchungen zu horizontalen Hauptspannungsrichtungen in Norddeutschland kann für Gorleben weitgehend ausgeschlossen werden, dass durch eine Wiederbelebung oder Schaffung von Sockelstörungen Erdbeben ausgelöst werden können. Ebenso können Erdbeben durch Vulkanismus ausgeschlossen werden, da dieser im Umfeld nicht auftreten wird. Aufgrund fehlender aktiver Störungszonen und den in Zukunft zu erwartenden Eismächtigkeiten werden am Standort auch keine eistektonischen Erdbeben erwartet. Insgesamt werden die Auswirkungen von Erdbeben mit der genannten Intensität gering sein und das Gesamtsystem kaum beeinflussen. Eine Prognose von Erdbeben ist für den Betrachtungszeitraum als Näherung zu werten, da sie auf historischen Beobachtungen beruht und über statistische Abschätzungen hinaus nicht möglich ist.

A.4.4 Kaltzeitliche Entwicklungen

Am Standort Gorleben wird entsprechend des z. B. in /FOR 99/ prognostizierten Klimaverlaufs ab ca. 10.000 Jahren nach heute eine Kaltzeit vom Ausmaß der Weichsel-Kaltzeit herrschen, die mit der Bildung von **Permafrost** einhergeht, ab ca. 50.000 Jahren nach heute bis zum Maximum dieser Kaltzeit wird er kontinuierlich ausgebaut sein. In jeder zukünftigen Kaltzeit ist Permafrost am Standort möglich, da dieser auch vor und nach einer vollständigen Inlandvereisung im Untergrund aufgebaut wird. Ungewissheiten bei der Prognose der Permafrostentwicklung treten vor allem im Zusammenhang mit der zeitlich nicht exakt eingegrenzten klimatischen Entwicklung auf. Daher kann über das Modell von /FOR 99/ hinaus für spätere Kaltzeiten keine genaue Prognose gestellt werden, die besagt wann am Standort Permafrost vorliegt und welche Mächtigkeit er dann erreicht.

Im Umfeld von Hannover wurden in einigen Salzstöcken vom Salzspiegel ausgehende Klüfte beschrieben, deren Entstehung nach einer bisher noch unbewiesenen Hypothese in /BAU 91/ möglicherweise kryogen ist. Der Hypothese folgend könnten solche **kryogenen Klüfte** nur in Kaltzeiten mit Permafrost oder in Eisrandlage entstehen, wenn die Abkühlung weit in den Untergrund vordringt. Bei einer vollständigen Eisüberdeckung fungiert der Gletscher als Isolationsschicht unter dem auch der Permafrost abgebaut wird. Aufgrund der Tiefenlage des Salzspiegels in Gorleben und der begrenzten Reichweite der Abkühlung wären nur die oberen Bereiche im Südwesten des

Salzstocks betroffen. Eine Ausbildung von tief ins Salinar reichenden kryogenen Klüften kann daher im Salzstock Gorleben nicht angenommen werden. Ungewiss ist vor allem, ob es sich bei den beschriebenen Klüften tatsächlich um kryogene handelt und welche Prozesse zu deren Entstehung führen /HAM 12/. Derzeit kann die Bildung kryogener Klüfte nicht sicher ausgeschlossen werden, weshalb sie in der Langzeitprognose betrachtet werden.

Bei einer **Inlandvereisung in randlicher Lage** liegt der Standort Gorleben in der gletschernahen Permafrostzone, ohne von ihm dauerhaft überfahren zu werden. Die Eismächtigkeiten im Randbereich werden ähnlich wie in der Vergangenheit ca. 300 m betragen. Eine Gletscherrandlage ist ein instabiler Zustand, der am Standort durch unterschiedliche Prozesse vor allem Auswirkungen auf die Hydrogeologie, die Geomorphologie und auf das Deckgebirge hätte. Ungewissheiten resultieren daraus, dass das Ausmaß der Auswirkungen bei einer Inlandvereisung in randlicher Lage nicht genau prognostizierbar ist. Unterschiedliche Prozesse, wie Permafrost oder Gletscherüberfahrung, wirken z. T. auch häufig wechselnd auf den Untergrund ein. Insbesondere in späteren Kaltzeiten haben schon mehrere Umgestaltungen der Geomorphologie und Hydrogeologie stattgefunden, so dass der Ausgangszustand auf den die Einwirkungen treffen nicht mehr bekannt ist. Darüber hinaus liegen am Standort Gorleben keine Befunde vor, die lokal eine Inlandvereisung in randlicher Lage dokumentieren. Eine Bewertung der Situation ist daher hauptsächlich über Vergleiche mit Daten aus anderen Regionen oder Zeiten möglich.

In zukünftigen Kaltzeiten ist, wie in der Elster- und Saale-Kaltzeit, erneut eine **vollständige Inlandvereisung** mit einer Überfahrung des Standortes Gorleben durch einen Gletscher möglich. Die Mächtigkeit des Gletschereises wird für den Raum Gorleben dann auf ungefähr 1.000 m abgeschätzt, kurzfristige Überschreitungen dieses Wertes auf bis zu 1.500 m können jedoch nicht vollständig ausgeschlossen werden. Durch die erhöhte Auflast kann es zur Kompaktion oberflächennaher Sedimente kommen und in tieferen Bereichen auch zu diagenetischen Veränderungen. Ebenso ist vom Vereisungszentrum ausgehend eine Ausweitung der Krustendeformation bis in den Standortbereich möglich, die dort jedoch nur sehr geringe und reversible Auswirkungen hätte. Ein Verstärken des Diapirismus wird aufgrund der geringen Restmächtigkeiten kriechfähiger Salinargesteine in den Randsenken und der kurzen Dauer der Auflasterhöhung nicht erwartet. Einflüsse auf die Hydrogeologie resultieren hauptsächlich daraus, dass sich der Permafrost unter dem Gletscher zurückbildet, wodurch in dem neu gebildeten Fließsystem verstärkt Schmelzwässer zur Grundwasserneubildung

beitragen. Eine Eisüberdeckung führt auch zu einer intensiven Umgestaltung der Geomorphologie (z. B. Glazialerosion) und des Deckgebirges (z. B. durch Glazialtektonik), wodurch das hydrogeologische System nachhaltig verändert wird. Ungewiss ist wie bei allen klimaabhängigen Prozessen die zeitliche Prognose des Eintretens einer Kaltzeit mit ausreichender Intensität. Ebenso ungewiss ist dann auch welche Mächtigkeit der Gletscher tatsächlich erreichen wird und welche Auswirkungen daran gekoppelt sind. Grundsätzlich gilt jedoch, dass die beobachteten Auswirkungen der Vergangenheit in Zukunft erneut möglich sind.

Eng an eine vollständige Inlandvereisung geknüpft ist die Bildung **glazialer Rinnen**, die bei einer Eisüberdeckung am Standort Gorleben auch zukünftig möglich ist. Tritt in Zukunft eine Rinnenbildung auf, die eine Rinne ähnlich der bereits vorhandenen elsterzeitlichen schafft, würde das dann vorhandene Deckgebirge in gleicher Weise ausgeräumt. Wird der Salzstock dabei erreicht so verlangsamt sich der Prozess, da das Salinar im Vergleich zum lockeren Deckgebirge einen Härtling darstellt. Die bereits vorhandene Gorlebener Rinne wurde beim Gletscherrückzug mit Sedimenten gefüllt, die den ausgeräumten ungefähr entsprechen. Dies wäre auch in Zukunft der Fall, so dass eine Rinne keine langfristig vorhandene Hohlform im Gelände darstellt und auch die Füllung stellt keinen bevorzugten Ansatzpunkt für spätere Rinnenbildungen dar. Eine Ungewissheit bei der Prognose der zukünftigen Rinnenbildungen ist, dass der Ablauf und das Ineinandergreifen der dafür nötigen Prozesse nicht vollständig bekannt sind. Es kann daher nicht prognostiziert werden, ob eine neue Rinne gebildet wird, wo sie verlief und welche Tiefe sie erreichen würde. Wie bei allen klimaabhängigen Prozessen ist auch bei diesem der Eintrittszeitpunkt nicht vorhersagbar.

Am Standort Gorleben muss bei zukünftigen Vereisungen mit der Entstehung von **glazigenen Deformationen** (Schichtverstellungen, Lagerungsstörungen bis Schuppenbau) gerechnet werden, die das Deckgebirge umgestalten. Dabei werden in der nächsten Million Jahre Auswirkungen analog zur Vergangenheit erwartet und das Entstehen von tiefreichenden glazigenen Störungen oder glazigen induzierten Erdbeben wegen fehlender Voraussetzungen ausgeschlossen. Auch bei diesem an die Klimaentwicklung gekoppelten Prozess kann der Zeitpunkt des Eintretens nicht exakt bestimmt werden. Ebenso ungewiss ist, welche Deformationsformen in dem dann bereits umgestalteten Deckgebirge entstehen werden.

Entwicklungen der Geomorphologie sowie des Deck- und Nebengebirges

In der nächsten eine Million Jahre wird der Standort Gorleben von **Transgressionen und Regressionen** betroffen sein. Die erwartete epirogenetische Absenkung von ca. 10 m wird nicht zu einer Überflutung des Standortes führen, diese könnte jedoch in einer Warmzeit mit einem Abschmelzen der Polkappen entstehen, bei der der Meeresspiegel um etwa 65 m ansteigt. Die hätte eine Ablagerung von flachmarinen Sedimenten zur Folge und würde die hydrogeologischen sowie die Spannungsverhältnisse beeinflussen. Es ist jedoch aufgrund der unbekanntenen Klimaentwicklung nicht vorhersagbar, wie oft der Standort Gorleben während zukünftiger Warmzeiten überflutet wird. Im Falle einer Regression, die in intensiven Kaltzeiten eine deutliche Absenkung des Meeresspiegels bewirkt, hätte am Standort kaum Auswirkungen, da dann die kaltzeitlichen Prozesse stärker wirken und das insgesamt ausgeglichene Relief bis in den Nordseeraum hinein nicht zu einer erosiven Vertiefung der Elbe führen wird.

Unter dem Sammelbegriff „**Erosion**“ werden Vorgänge zusammengefasst, die die Geomorphologie durch Abtragung verändern. Für die nächsten eine Million Jahre wird am Standort nicht mit der Erhöhung der Erosionsrate gerechnet, da keine Prozesse erwartet werden, die in diesem Bereich ein stärkeres und somit erosionsanfälliges Relief erzeugen. Verstärkt wird die Erosion durch die Einwirkung von Gletschern während Kaltzeiten, diese Abtragung wird jedoch durch die anschließende Sedimentation beim Abschmelzen relativiert. Auch wenn die Erosion nicht zu einer Verringerung der Deckgebirgsmächtigkeit führt, werden die Morphologie und die Zusammensetzung der Sedimente ständig verändert, wodurch Auswirkungen auf das hydrogeologische System entstehen. Die Abhängigkeit des Prozesses von der Klimaentwicklung erzeugt Ungewissheiten bei der Prognose, in welchem Maß und/oder zu welcher Zeit ein bestimmter Erosionsprozess wirkt.

Am Standort Gorleben wird für die nächste eine Million Jahre erwartet, dass die **Sedimentation** das Deckgebirge und die Geomorphologie auf die gleiche Weise gestaltet wie in der Vergangenheit. In Kaltzeiten kann daher auch in Zukunft mit größeren Sedimentationsleistungen und darauf beruhenden Umgestaltungen des Deckgebirges und der hydrogeologischen Verhältnisse gerechnet werden. Unmöglich ist die genaue Angabe der Mächtigkeiten zukünftiger Sedimentschichten, da z. B. eine enge Verzahnung mit dem gegenläufigen Prozess der Erosion besteht, der quantitativ ebenfalls nicht bekannt ist. Zu welchem Zeitpunkt welche Art der Sedimentation zu erwarten ist kann aufgrund der Klimaabhängigkeit der Prozesse nicht vorhergesagt werden.

Das Salinar und die tieferen Schichten des Deckgebirges am Standort Gorleben haben die **Diagenese** bereits durchlaufen, so dass Auswirkungen dieses Prozesses nur in den darüber liegenden unverfestigten Schichten des Deckgebirges möglich sind. Ungewiss ist, welche der vorhandenen Lockergesteinsschichten oder zukünftig zur Ablagerung kommenden Sedimente von der Diagenese betroffen sein werden.

Störungen und Störungszonen können im **Deck- und Nebengebirge** durch verschiedene Prozesse angelegt werden. In der nächsten Million Jahre kann am Standort Gorleben ausgeschlossen werden, dass sie durch den Salzaufstieg oder den Übergang in eine tektonisch aktive Phase angelegt werden. Kleinräumige Störungen mit geringem Versatz und ohne Auswirkungen auf andere Prozesse können in Zeiten mit kurzfristig hohen Subrosionsraten im Bereich des Hutgesteins entstehen. Ungewiss ist ob in Zukunft Rahmenbedingungen herrschen, die ausreichen um die Subrosion entsprechend zu erhöhen. Insgesamt ist in Zukunft eine Neuanlage von Störungen im Deckgebirge möglich, deren Einfluss auf die weitere Entwicklung des Standortes kann jedoch vernachlässigt werden.

In der nächsten einen Million Jahre wird am Standort Gorleben mikrobielles Leben möglich sein, so dass zu jeder Zeit **mikrobielle Prozesse im Deckgebirge** ablaufen. Umwandlungsprozesse, die in die Systementwicklung oder die Gesteinszusammensetzung maßgeblich eingreifen, sind jedoch nicht zu erwarten. Und auch die damit verbundenen Ungewissheiten sind vernachlässigbar.

Entwicklungen des hydrogeologischen Systems

Mikrobielle Prozesse sind Teil des hydrogeologischen Systems und werden in den nächsten eine Million Jahren in gleicher Weise wie bisher ablaufen. Änderungen der Lebensbedingungen, wie z. B. bei Permafrost, haben langfristig keine Auswirkungen, da die Lebensräume nach dem Abklingen dieser Einflüsse erneut von Mikroorganismen besiedelt werden. Den stärksten Einfluss auf den Grundwasserchemismus haben am Standort Gorleben die sulfatreduzierenden Bakterien. Wegen der zu erwartenden klimaabhängigen Änderungen der Lebensbedingungen ist ungewiss, zu welchem Zeitpunkt welche Mikroorganismen wo aktiv sein werden.

Salinarspezifische Entwicklungen des Salzstocks Gorleben

Für die nächsten eine Million Jahre kann am Standort Gorleben davon ausgegangen werden, dass sich in dem tektonisch ruhigen Bereich keine hohen kompressiven Spannungen im Untergrund aufbauen und sich der in der Vergangenheit bereits abzeichnende Abschwächungstrend des **Diapirismus** fortsetzt. Dafür sprechen auch die geringen Restmächtigkeiten gut kriechfähiger Salinarschichten in den Randsenken. Für den Salzspiegel ergibt sich auf Basis der Aufstiegsrate vom Miozän bis Quartär eine Hebung um 20 m. Dieser Wert kann aufgrund der erwarteten Abschwächung jedoch geringer ausfallen. Im Zentralteil des Sattels wurden im gleichen Zeitraum im Hauptsalz in Tiefen von ca. 800 – 900 m Fließraten von 0,07 mm/a abgeschätzt, was in einer Million Jahre zu einer Bewegung von 70 m führen könnte. Auch auf diesen Wert wird sich eine Abschwächung des Prozesses auswirken. Kurzfristige Erhöhungen der Fließrate, die das Gesamtergebnis jedoch nicht wesentlich beeinflussen werden, können z. B. bei einer lang andauernden Kaltzeit mit einer mächtigen Eisüberdeckung oder einer spannungsverändernden Eisrandlage am Standort nicht völlig ausgeschlossen werden. Ausgeschlossen wird ein signifikanter Anstieg des Auflastdrucks, bei dem ein Abpressen des Restvolumens des Salinars in den Randsenken möglich wird. Dazu wäre eine Erhöhung der Deckgebirgsmächtigkeit um mehrere hundert Meter nötig, die sich nicht einstellen wird. Ungewiss ist bei diesen Abschätzungen, wie sich die Abschwächung des Diapirismus quantitativ entwickelt und ob oder wann es zu einem völligen Erliegen dieses Prozesses kommt.

Am Standort Gorleben ist die zu erwartende **Subrosion** u. a. abhängig von der klimatischen Entwicklung und von der Tiefenlage des Salzspiegels. In der Vergangenheit wurden in unterschiedlichen Zeitabschnitten verschiedene Subrosionsraten ermittelt. Darauf basierend und unter Berücksichtigung der kaltzeitlichen Einwirkungen und der Tieferlegung des Salzspiegels wurde für die Zukunft als Näherung eine Rate von 0,05 bis 0,1 mm pro Jahr angesetzt, was zu einer Abtragung von 50 bis 100 m führen würde. Ungewissheiten bei der Prognose der Subrosion resultieren aus der unbekanntenen klimatischen Entwicklung und einer z. T. lückenhaften Datengrundlage (Subrosionsraten der Elster-Kaltzeit konnten nicht ermittelt werden). Methodisch wurden die Subrosionsraten mittels einer Randsenkenanalyse oder anhand der Hutgesteinsmächtigkeit ermittelt, beide Methoden sind mit Ungewissheiten behaftet und weisen in den Ergebnissen Schwankungsbreiten auf.

A.4.5 **Wenig wahrscheinliche oder auszuschließende Entwicklungen des geologischen Systems am Standort Gorleben**

Bei den wenig wahrscheinlichen oder auszuschließenden Entwicklungen handelt es sich um Prozesse, die geologisch allgemein von Bedeutung sind oder die in ähnlichen Regionen wie dem Standort Gorleben ablaufen, dort jedoch nicht erwartet werden.

Am Standort Gorleben wurde für die letzten 30 Millionen Jahre ein andauernder Trend der Abwärtsbewegung von 0,01 mm/a nachgewiesen, weshalb eine **Hebung der Erdkruste** als aufwärtsgerichteter Teil der weiträumig und langfristig ablaufenden und ohnehin nur untergeordnet wirkenden Epirogenese nicht zu erwarten ist.

Eine **Orogenese** wird in den nächsten eine Million Jahren am Standort Gorleben nicht erwartet, da er nicht in der Nähe einer Subduktionszone liegt und sich Norddeutschland zudem in einer tektonisch ruhigen Phase befindet.

Innerhalb der nächsten eine Million Jahre wird eine **Grabenbildung** am Standort Gorleben ausgeschlossen. Untersuchungen lieferten keine Hinweise auf alte Grabenstrukturen im Untergrund und darüber hinaus herrschen seit dem Miozän Spannungszustände in Norddeutschland, die einer Grabenbildung entgegenwirken.

Mit **Magmatismus** und damit verbundenen geothermischen Prozessen ist am Standort Gorleben aufgrund der Rahmenbedingungen in den nächsten eine Million Jahre nicht zu rechnen. Das gilt sowohl für die Bildung von Plutoniten und Vulkaniten, als auch für Gasaustritte oder Thermalquellen. Die tektonischen Bedingungen im Untergrund des Standortes sprechen nicht dafür, dass durch die alpidische Orogenese Störungen neu angelegt werden, die den Aufstieg von Magma in Gorleben ermöglichen. Ohne einen aktiven Magmatismus kommt es auch nicht zum Auftreten von hydrothermalen Lösungen, wodurch ein Einfluss durch **hydrothermale Aktivitäten** am Standort Gorleben innerhalb der nächsten eine Million Jahre ausgeschlossen wird.

Druck- und Temperaturerhöhungen, die eine **Gesteinsmetamorphose** auslösen, z. B. durch ein stark erhöhtes Deckgebirge oder magmatische Vorgänge, werden sich in den nächsten einen Million Jahre im Untergrund des Standortes nicht einstellen.

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein **Meteoriteneinschlag** mit einer großen Sprengkraft den Standort Gorleben innerhalb der nächsten einen Million Jahre direkt trifft ist so

gering, dass dieses Ereignis und seine Auswirkungen auf die Standortentwicklung vernachlässigt werden können. Weiter entfernte Einschläge hätten am Standort Auswirkungen, wenn sie z. B. im Meer stattfänden und eine Flutwelle erzeugen. Diese könnte den Standort erreichen und zeitweise überfluten, und aufgrund des Tsunami-Charakters der Überflutung, auch erosiv auf das Deckgebirge einwirken.

Literaturverzeichnis Anhang A

- /BAU 91/ Bauer, G.: Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren? Zentralblatt für Geologie und Paläontologie, Vol. I, No. 4, S. 1247-1261, 1991.
- /BOR 88/ Bornemann, O., Fischbeck, R.: Salzspiegelbohrung GoHy 3154. Schichtenverzeichnis ab Oberfläche des Salzstocks (Stand: Oktober 1985). 14 Seiten: Hannover, 1988.
- /BOR 91/ Bornemann, O.: Zur Geologie des Salzstocks Gorleben nach den Bohrerergebnissen. BfS-Schriften 4/91, 67 Seiten, Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Salzgitter, 1991.
- /BOR 00/ Bornemann, O., Fischbeck, R., Bäuerle, G.: Investigation of deformation textures of salt rock from various Zechstein units and their relationship to the formation of the salt diapirs in NW Germany. S. 89-94, ISBN 0444500650, Proc. 8th World Salt Symposium: Amsterdam, 2000.
- /BOR 04/ Bornemann, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben - Teil III: Ergebnisse der Erkundung des Salinars. 222 Seiten, Abschlussbericht zum AP G 412110000, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2004.
- /BOR 08/ Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, ISBN 978-3-510-95964-8, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.
- /BRÄ 10/ Bräuer, V., Eickemeyer, R., Eisenburger, D., Grissemann, C., Hesser, J., Heusermann, S., Kaiser, D., Nipp, H.-K., Nowak, T., Plischke, I., Schnier, H., Schulze, O., Sönke, J., Weber, J.R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben Teil IV: Geotechnische Erkundung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2010.

- /CRA 05a/ Cramer, B.: Erdölgeologische 3D-Modellierung des Salzstocks Gorleben. 57 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2005.
- /CRA 05b/ Cramer, B., Gerling, P., Bornemann, O.: 3D-Beckenmodellierung zur Klärung der Herkunft von Kohlenwasserstoffen im Salzstock Gorleben. 165-169 Seiten, Deutsche Wissensch. Ges. für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK), Fachbereich Aufsuchung u. Gewinnung: Hamburg, 2005.
- /ELL 99/ Ellendorf, B.: Geochemische Untersuchungen an einzelnen Fluid Inclusions in Zechsteinevaporiten mittels Laser-Ramanspektrometrie, Ionenchromatographie und Laser-Ablation-ICP-Massenspektrometrie. (Zitat in: Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.). Dissertation, 93 Seiten, Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1999.
- /FOR 99/ Forsström, L.: Future glaciation in Fennoscandia. POSIVA 99-30, 31 Seiten, Posiva OY: Helsinki, September 1999.
- /GER 02/ Gerling, P., Faber, E., Wehner, H.: Projekt Gorleben, Geologische Bearbeitung der Erkundungssohle (Geologie, Mineralogie, Geochemie). Interpretation der chemischen Analysen von gasförmigen und flüssigen Kohlenwasserstoffen (einschließlich der Daten aus der obertägigen Erkundung und der Schächte). 84 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.

- /HAM 12/ Hammer, J., Fleig, S., Mingerzahn, G., Kühnlenz, T., Mertineit, M., Pusch, M., Schramm, M., Behlau, J., Zaretski, B., Hesser, J., Shao, H., Köthe, A., Vogel, P.: Salzgeologische Bewertung des Einflusses von „kryogenen Klüften“ und halokinetischen Deformationsprozessen auf die Integrität der geologischen Barriere des Salzstocks Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-273, ISBN: 978-3-939355-49-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2012.
- /HER 87/ Herrmann, A.G.: Gase in marinen Evaporiten. 137 Seiten, Universität Clausthal-Zellerfeld, Institut für Miner. und mineral. Rohst.: Clausthal-Zellerfeld, 1987.
- /KLI 07/ Klinge, H., Boehme, J., Grisseemann, C., Houben, G., Ludwig, R.-R., Rübels, A., Schelkes, K., Schildknecht, F., Suckow, A.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 1: Die Hydrogeologie des Deckgebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 71, 147 Seiten, ISBN 978-3-510-95962-4, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /KÖT 07/ Köthe, A., Hoffmann, N., Krull, P., Zirngast, M., Zwirner, R.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 2: Die Geologie des Deck- und Nebengebirges des Salzstocks Gorleben. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 72, 201 Seiten, ISBN 978-3-510-95963-1, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2007.
- /MIN 87/ Mingerzahn, G.: Klastische Sedimente im subrodierten Kaliflöz Staßfurt (Zechstein 2) des Salzstocks Gorleben. Diplomarbeit, Technische Universität Braunschweig: Braunschweig, 1987.
- /NOW 02/ Nowak, T., Weber, J.R., Bornemann, O.: Gas- und Lösungsreservoir im Salzstock Gorleben. 71 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2002.
- /POP 02/ Popp, T., Fischer, M., Kern, H.: Gefügekundliche Untersuchungen zur Verteilung von Kohlenwasserstoffen (KW) im Steinsalz. Meyniana, Vol. 54, S. 131-154, 2002.

- /PRO 98/ Prohl, H.: Raman-spektroskopische Untersuchungen zur Zusammensetzung gasförmiger Einschlüsse in Gesteinen des Salzstocks Gorleben. (Zitat in: Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Projekt Gorleben, Standortbeschreibung Gorleben. Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch, Vol. C 73, 211 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2008.). Dissertation, 62 Seiten, Universität Clausthal-Zellerfeld: Clausthal-Zellerfeld, 1998.
- /SCM 09/ Schramm, M., Kühnlenz, T., Mingerzahn, G., Hammer, J.: Lösungen im Salzstock Gorleben - eine Dokumentation und genetische Interpretation. BGR-Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2009.
- /SIE 01/ Siemann, M.G., Ellendorff, B.: The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany. Chemical Geology, Vol. 173, No. 1–3, S. 31-44, DOI [http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541\(00\)00266-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0009-2541(00)00266-7), March 2001.
- /ZIR 04/ Zirngast, M., Zwirner, R., Bornemann, O., Fleig, S., Hoffmann, N., Köthe, A., Krull, P., Weiss, W.: Projekt Gorleben, Schichtenfolge und Strukturbau des Deck- u. Nebengebirges. Abschlussbericht, 570 Seiten, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 2004.

**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

ISBN 978-3-939355-66-3