

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

**Titel:** Endlager Morsleben  
Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das verfüllte und  
verschlossene Endlager - eine Übersicht

**Autor:** Georg Resele (AF-Colenco AG), Matthias Ranft (BfS), Jürgen Wollrath (BfS)

**Erscheinungsjahr:** 2009

**Unterlagen-Nr.:**

**Revision:**

**Unterlagenteil:**



# KURZFASSUNG

Verfasser: Georg Resele (AF-Colenco AG), Matthias Ranft (BfS), Jürgen Wollrath (BfS)

Titel: Endlager Morsleben – Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das verfüllte und verschlossene Endlager: eine Übersicht

Stand: 30.06.2009

Stichworte: Langzeitsicherheit, radiologische Auswirkungen, Übersicht

Die Langzeitsicherheit des verfüllten und verschlossenen Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben wurde im Zusammenhang mit der beantragten Stilllegung während rund 10 Jahren untersucht. Der vorliegende Bericht vermittelt eine Übersicht über den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit, spricht die sicherheitsrelevanten Sachverhalte und Prozesse an, legt das Vorgehen für den Nachweis dar, gibt die Ergebnisse wieder, wertet diese und dient allgemein als Wegweiser.

Der Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit umfasst eine differenzierte Darstellung des Endlagersystems, eine sorgfältige qualitative Systemanalyse, eine ausreichende Erhebung und Bereitstellung der erforderlichen Daten sowie Modellrechnungen mit qualifizierten Rechenmethoden und Programmen. Im Laufe der Projektbearbeitung wurden mehrfach alternative Optionen für das Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie entwickelt und überprüft, so dass das vorliegende Stilllegungskonzept hinsichtlich technischer Machbarkeit und Langzeitsicherheit optimiert ist.

Das nach dem vorgesehenen Stilllegungskonzept verfüllte und verschlossene Endlager erweist sich im Hinblick auf die Schutzziele zur radiologischen Langzeitsicherheit als robustes System, das zwar im Detail komplex ist, für das die Nachweise zur Einhaltung der Schutzziele aber gestützt auf wenige und gesicherte Sicherheitsfunktionen erbracht werden können. Die durchgeführten qualitativen und quantitativen Analysen belegen, dass das verfüllte und verschlossene Endlager Morsleben die radiologischen Schutzziele zur Langzeitsicherheit zuverlässig einhält.

# ABSTRACT

Authors Georg Resele (AF-Colenco AG), Matthias Ranft (BfS), Jürgen Wollrath (BfS)

Title: Morsleben Repository – Proof of Radiological Long-term Safety for the Backfilled and Sealed Repository: a Survey

As per: 30.06.2008

Key words: Long-term safety, radiological effects, survey

The long-term safety of the backfilled and sealed Morsleben repository for radioactive waste has been investigated for about ten years in association with its decommissioning that has been applied for. This report provides a survey of the proof of radiological long-term safety, addresses the safety-relevant issues and processes, explains the approach to gaining the proof, presents the results, and generally serves as a directory.

The proof of radiological long-term safety comprises a differentiated representation of the repository system, a careful, qualitative system analysis, a sufficient collection and provision of the necessary data, and model calculations with qualified calculation methods and programs. In the process of working on the project, alternative options for the backfilling and sealing of the Bartensleben-Marie twin mine were repeatedly developed and evaluated, so that the existing decommissioning concept has been optimised with regard to technical feasibility and long-term safety.

In view of the protection goals relating to the radiological long-term safety, the repository, which has been backfilled and sealed according to the planned decommissioning concept, proves to be a robust system that is complex in detail but for which the proof that the protection goals are adhered to can be furnished on the basis of few and secured safety functions. The qualitative and quantitative analyses carried out prove that the backfilled and sealed Morsleben repository reliably keeps the radiological protection goals relating to long-term safety.

# ZUSAMMENFASSUNG

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurde im ehemaligen Kali- und Steinsalzbergwerk Bartensleben eingerichtet. Dieses ist Teil der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie, welche unmittelbar an der westlichen Landesgrenze von Sachsen-Anhalt liegt und um 1900 abgeteuft wurde. Nach einer längeren Nutzung als Gewinnungsbergwerk diente die Doppel-Schachtanlage während einiger Jahrzehnte verschiedenen industriellen Zwecken.

1970 wurde die Schachtanlage Bartensleben von den verantwortlichen staatlichen Stellen der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) als Endlager für radioaktive Abfälle ausgewählt. Im Jahr 1990 ging das Endlager in den Zuständigkeitsbereich des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) über. Die Abfalleinlagerung erfolgte mit Unterbrechungen von 1971 bis 1998. Insgesamt wurden rund 37 000 m<sup>3</sup> schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit überwiegend kurzlebigen Radionukliden, einer Gesamtaktivität von weniger als 6·10<sup>14</sup> Bq und einer Aktivität der Alpha-Strahler in der Größenordnung von 10<sup>11</sup> Bq eingelagert (Stand 30.06.2005). Im Jahr 1997 wurde der Antrag auf Stilllegung des ERAM gestellt. Durch die Stilllegungsmaßnahmen sind der sichere Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre herzustellen und die Langzeitsicherheit zu gewährleisten.

Die beantragten Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie gingen aus einem längeren Entwicklungsprozess hervor und beruhen auf einem Sicherheitskonzept für die Zeit nach Verschluss der Anlage, das den Gegebenheiten in den Gruben und am Standort Rechnung trägt. Sie umfassen das weitgehende Verfüllen von unverfüllten Hohlräumen nach differenzierten Zielvorgaben mit einem Salzbeton, der ein hohes Fließmaß aufweist, die hydraulische Abtrennung der Einlagerungsbereiche Westfeld, Südfeld und Ostfeld von der Restgrube durch Abdichtungen aus Salzbeton (bzw. Magnesiabeton bei einem Abdichtungsbauwerk) sowie den Verschluss der Tagesschächte mit Verschlussbauwerken aus mehreren Elementen und unterschiedlichen Materialien. Ziel der Stilllegungsmaßnahmen ist es, die dauerhafte Standsicherheit des Grubengebäudes mit Sicherheit und die trockene Verwahrung der Abfälle mit hoher Wahrscheinlichkeit und für lange Zeiten zu gewährleisten. Das Volllaufen der Grube nach deren Verschluss und der Lösungszutritt zu den Abfällen sind allerdings nicht auszuschließen und wurden als Möglichkeit bei der Maßnahmenplanung und beim Nachweis der Langzeitsicherheit berücksichtigt.

Die Langzeitsicherheit des verfüllten und verschlossenen ERAM wurde im Zusammenhang mit der beantragten Stilllegung im Rahmen eines Gesamtprojektes während rund 10 Jahren untersucht. Das Gesamtprojekt stand unter der Leitung des BfS und umfasste zahlreiche Teilprojekte. Diese betrafen

- die Charakterisierung des Grubengebäudes, der Salzstruktur und des Deckgebirges,
- die Ausarbeitung und den Vergleich von möglichen Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des Grubengebäudes,
- die ingenieurtechnische Planung der beantragten Maßnahmen,
- die Identifikation der potenziell langzeitsicherheitsrelevanten Prozesse,
- die Identifikation der möglichen künftigen Entwicklungen des Endlagersystems und deren qualitative Bewertung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit,
- die Entwicklung von Modellen und die Anwendung von entsprechenden Rechenprogrammen für die Berechnung von Zustandsgrößen und möglichen Auswirkungen des Endlagersystems unter Annahme der möglichen künftigen Systementwicklungen,
- die Interpretation und Bewertung der quantitativen Modellergebnisse hinsichtlich Folgerungen zur Langzeitsicherheit,
- die Zusammenstellungen von ergänzenden Argumenten zur Langzeitsicherheit sowie
- die Ausarbeitung einer zusammenfassenden Aussage zur Langzeitsicherheit des ERAM.

Die Ergebnisse der Teilprojekte sind in zahlreichen Berichten dargestellt. Erst gemeinsam und in der Kombination ergeben die in diesen Berichten dargestellten Befunde den Nachweis der Langzeitsicherheit. Gegen-

stand des vorliegenden Berichts ist die Darstellung der radiologischen Langzeitsicherheit. Der Bericht vermittelt eine Übersicht über den Nachweis, spricht die sicherheitsrelevanten Sachverhalte und Prozesse an, legt das Vorgehen für den Nachweis dar, gibt die Ergebnisse wieder, wertet diese und dient allgemein als Wegweiser. Formell maßgebend für den Langzeitsicherheitsnachweis bleiben jedoch die einzelnen Prüfberichte.

Der Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das System „Endlager Morsleben“ wurde von qualifizierten Mitarbeitern verschiedener Firmen und Organisationen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik und unter der koordinierenden und technischen Leitung des BfS erarbeitet. Er umfasst eine differenzierte Darstellung des Endlagersystems, eine sorgfältige qualitative Systemanalyse, eine ausreichende Erhebung und Bereitstellung der erforderlichen Daten sowie Modellrechnungen mit qualifizierten Rechenmethoden und Programmen. Im Laufe der Projektbearbeitung wurden mehrfach alternative Optionen für das Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie entwickelt und überprüft, so dass das vorliegende Stilllegungskonzept hinsichtlich technischer Machbarkeit und Langzeitsicherheit optimiert ist.

Das nach dem vorgesehenen Stilllegungskonzept verfüllte und verschlossene Endlager erweist sich im Hinblick auf die Schutzziele zur radiologischen Langzeitsicherheit als robustes System, das zwar im Detail komplex ist, für das die Nachweise zur Einhaltung der Schutzziele aber gestützt auf wenige und gesicherte Sicherheitsfunktionen erbracht werden können. In Bezug auf das radiologische Schutzziel „maximale potenzielle Strahlenexposition niedriger als der Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis“ gewährleisten mehrere diversitäre Sicherheitsfunktionen die Langzeitsicherheit. Verschiedene Prozesse und Sachverhalte, die der Langzeitsicherheit zwar förderlich, aber nicht oder nur schwer belastbar zu quantifizieren sind, blieben in den entsprechenden Nachweisen unberücksichtigt.

Die durchgeführten qualitativen und quantitativen Analysen belegen, dass das verfüllte und verschlossene Endlager Morsleben die radiologischen Schutzziele zur Langzeitsicherheit zuverlässig einhält.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>KURZFASSUNG</b> .....	<b>3</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>4</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>5</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>7</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>9</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>10</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>11</b>
<b>1 EINLEITUNG</b> .....	<b>13</b>
1.1 KURZABRISS DER GESCHICHTE DES ENDLAGERS MORSLEBEN .....	13
1.2 GEGENSTAND UND ZIELSETZUNG DES VORLIEGENDEN BERICHTS .....	13
1.3 AUFBAU DES BERICHTS .....	14
<b>2 SYSTEMBESCHREIBUNG „ENDLAGER MORSLEBEN“</b> .....	<b>15</b>
2.1 STANDORT .....	15
2.2 GEOLOGISCHE GEGEBENHEITEN .....	15
2.2.1 Salzstruktur .....	15
2.2.2 Hutgestein .....	18
2.2.3 Deckgebirge .....	19
2.3 GRUBENGEBÄUDE, EINLAGERUNGSBEREICHE UND ABFÄLLE .....	21
2.3.1 Grubengebäude .....	21
2.3.2 Einlagerungsorte .....	23
2.3.3 Eingelagerte Abfälle .....	25
2.4 GEBIRGSMECHANISCHE VERHÄLTNISSE .....	30
<b>3 SICHERHEITS-, VERSCHLUSS- UND NACHWEISKONZEPT</b> .....	<b>31</b>
3.1 SCHUTZZIELE .....	31
3.2 SICHERHEITSKONZEPT .....	33
3.2.1 Mögliche sicherheitsrelevante Prozesse und Standorteigenschaften .....	34
3.2.2 Konzept für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit .....	35
3.3 VERFÜLL- UND VERSCHLUSSKONZEPT .....	36
3.3.1 Entwicklung des Konzeptes für das Verfüllen und Verschließen .....	36
3.3.2 Beantragtes Konzept für das Verfüllen und Verschließen .....	40
3.4 KONZEPT FÜR DEN NACHWEIS DER RADIOLOGISCHEN LANGZEITSICHERHEIT .....	49
3.4.1 Freisetzung von Radionukliden in Lösung .....	52
3.4.2 Freisetzung von Radionukliden in der Gasphase .....	54
3.4.3 Menschliches Eindringen .....	55
3.4.4 Gewährleistung der Unterkritikalität .....	56
<b>4 MÖGLICHE SYSTEMENTWICKLUNGEN UND RELEVANTE PROZESSE</b> .....	<b>57</b>
4.1 ZUSTAND DES SYSTEMS „ENDLAGER MORSLEBEN“ NACH ABSCHLUSS DER VERSCHLUSSMAßNAHMEN .....	57
4.2 SYSTEMENTWICKLUNG BEI ANNAHME UNVERÄNDERT FORTBESTEHENDER ÄUßERER RANDBEDINGUNGEN .....	59



4.2.1	Systementwicklung „trockene Grube“ .....	59
4.2.2	Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ .....	61
4.3	SYSTEMENTWICKLUNG BEI ANNAHME SICHER ÄNDERNDER ÄUßERER RANDBEDINGUNGEN ..	70
4.3.1	Geowissenschaftliche Langzeitprognose .....	70
4.3.2	Einflüsse auf die Entwicklung des Systems „Endlager Morsleben“ .....	73
4.4	WICHTIGE SACHVERHALTE, EREIGNISSE UND PROZESSE FÜR DEN LANGZEITSICHERHEITSNACHWEIS .....	73
4.5	BETRACHTETE SZENARIEN .....	76
4.5.1	Radionuklidtransport bei der Systementwicklung „trockene Grube“ .....	76
4.5.2	Radionuklidtransport in Lösung .....	76
4.5.3	Radionuklidtransport in der Gasphase .....	82
4.5.4	Menschliches Eindringen .....	84
<b>5</b>	<b>VERFÜGBARE GRUNDLAGEN FÜR DEN NACHWEIS DER LANGZEITSICHERHEIT ....</b>	<b>86</b>
<b>6</b>	<b>QUANTIFIZIERUNG DER MÖGLICHEN AUSWIRKUNGEN .....</b>	<b>91</b>
6.1	GEBIRGSMCHANISCHE MODELLRECHNUNGEN .....	92
6.2	MODELLIERUNG DER GRUNDWASSERBEWEGUNG IM HUTGESTEIN UND DECKGEBIRGE ....	93
6.3	MODELLRECHNUNGEN ZUR GASBILDUNG .....	103
6.4	MODELLRECHNUNGEN ZU WEITEREN PROZESSEN .....	106
6.4.1	Konvergenz der Grubenbaue .....	106
6.4.2	Korrosion von Abdichtungsbauwerken durch Grubenlösung .....	108
6.5	MODELLRECHNUNGEN ZUR „TROCKENEN“ GRUBE .....	112
6.6	MODELLRECHNUNGEN ZU DEN SZENARIEN „RADIONUKLIDAUSSTRAG IN LÖSUNG“ .....	114
6.6.1	Modellierungskonzepte und Rechenprogramme .....	114
6.6.2	Berücksichtigte Prozesse .....	120
6.6.3	Ergebnisse für das Referenzszenario .....	124
6.6.4	Ergebnisse für alternative Szenarien .....	130
6.6.5	Schlussfolgerungen aus den Modellrechnungen zum Radionuklidaustrag in Lösung .....	137
6.7	MODELLRECHNUNGEN ZUM RADIONUKLIDAUSSTRAG IN DER GASPHASE .....	139
6.8	MODELLRECHNUNGEN ZUM MENSCHLICHEN EINDRINGEN .....	143
6.9	BEURTEILUNG DER GEWÄHRLEISTUNG DER UNTERKRITIKALITÄT .....	144
<b>7</b>	<b>WERTUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>145</b>
7.1	WERTUNG DER QUALITATIVEN ANALYSE .....	145
7.2	WERTUNG DER QUANTITATIVEN ANALYSE .....	152
7.3	ERGÄNZENDE ARGUMENTE BETREFFEND LANGZEITSICHERHEIT .....	157
7.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	160
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>162</b>
	<b>GLOSSAR .....</b>	<b>168</b>

Gesamtblattzahl: 171

# ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1:	Schematischer geologischer West-Ost-Schnitt durch das Allertal im Bereich des ERAM.....	16
Abbildung 2-2:	Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, Ansicht von Süden nach Norden.....	22
Abbildung 2-3:	Einlagerungshohlräume auf der 4. Sohle (-372 mNN), der 4a-Sohle (-346 mNN) und der 5a-Sohle (-395 mNN).....	24
Abbildung 2-4:	Toxizitätsindikator TI der im ERAM eingelagerten radioaktiven Abfälle und maßgebliche Radionuklide als Funktion der Zeit.....	29
Abbildung 2-5:	Toxizitätsindikator TI der in den einzelnen Einlagerungsbereichen eingelagerten Abfälle als Funktion der Zeit im Vergleich.....	29
Abbildung 3-1:	Schematische Darstellung eines Abdichtungssegments aus Salzbeton.....	41
Abbildung 3-2:	Aufzufahrendes Großbohrloch zwischen Westfeld (3. Sohle) und Südfeld (1. Sohle).....	42
Abbildung 3-3:	Schematische Darstellung der Abdichtungen in den Verbindungsstrecken und dem südlichen Wetterrolllochsystem zwischen Südfeld und Zentralteil.....	43
Abbildung 3-4:	Schematische Darstellung der Schachtverschlüsse von Schacht Bartensleben und Schacht Marie.....	45
Abbildung 3-5:	Verfülltes und verschlossenes Grubengebäude Bartensleben; schematisierter Sohlenriss der 4. Sohle (-372-m-Sohle) mit Einlagerungshohlräumen der 4a-, 4. und 5a-Sohle.....	47
Abbildung 3-6:	Verfülltes und verschlossenes Grubengebäude Bartensleben; schematisierter Schnitt entlang der Ostquerschläge mit Einlagerungshohlräumen im West- und Ostfeld.....	48
Abbildung 4-1:	Transportpfade durch das Hutgestein und das Deckgebirge (schematische Darstellung, abgeleitet aus Modellrechnungen).....	69
Abbildung 6-1:	3D-Modell: Perspektivische Ansicht aus SE auf 9 Serienschnitte in SW-NE-Richtung, Abstand der Serienschnitte 1 km. Die Farben bezeichnen die hydrostratigraphischen Einheiten, diese können anhand von Abbildung 6-2 und der zugehörigen Legende identifiziert werden.....	95
Abbildung 6-2:	2D-Modell mit den hydrostratigraphischen Einheiten (überhöht, Legende in gesonderter Tabelle).....	96
Abbildung 6-3:	Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen mit Dichteeffekten ohne Lösungszutritt in das Grubengebäude oder Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude. Oben: relativer Salzgehalt des Grundwassers; unten: Filtergeschwindigkeiten.....	100
Abbildung 6-4:	Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen mit Dichteeffekten mit Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude: Filtergeschwindigkeiten und Trajektorien bei einem Übertritt in das Hutgestein am unteren Ende der Schichtenfolge DGL.....	101
Abbildung 6-5:	Rechenprogramm für die Modellierung der Gasbildung: berücksichtigte Prozesse. N steht für Denitrifikation, S für Sulfatreduktion, F für Fermentation, M für Methanogenese, K für Korrosion und C für Carbonatisierung.....	103
Abbildung 6-6:	Bandbreite der kumuliert gebildeten Gasmenge als Funktion der Zeit: (a) im ELB WSF, (b) in der übrigen Grube.....	105
Abbildung 6-7:	Zeitliche Entwicklung des fluidzugänglichen Volumens (unverfüllter Hohlraum und Porenvolumen im kompaktierbaren Versatz) in der Restgrube und im ELB WSF für die Referenzwerte der Modellparameter.....	108
Abbildung 6-8:	Druckanstieg im Endlager bei der Entwicklung „trockene Grube“ für absolut gasdichte Abdichtungen (West-Südfeld, Ostfeld, Restgrube) und für hoch gasdurchlässige Abdichtungen (Gesamtgrube).....	113
Abbildung 6-9:	Räumliche Darstellung des Endlagersystems in den Modellrechnungen mit EMOS (Strukturmodell).....	116



Abbildung 6-10:	Topologische Darstellung des Endlagersystems in den Modellrechnungen mit PROSA (Strukturmodell). .....	118
Abbildung 6-11:	Ausgewählte, bei der Modellierung der Ausbreitung auf dem Lösungspfad berücksichtigte Prozesse und Orte ihrer Wirkung im Endlagersystem. ....	123
Abbildung 6-12:	Zeitlicher Verlauf der berechneten potenziellen Strahlenexposition im Referenzfall (Erläuterungen im Text). ....	125
Abbildung 6-13:	Komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung (Überschreitenswahrscheinlichkeit) des Maximums der potenziellen Strahlenexposition bei relevantem Lösungszutritt in die Grube. ....	127
Abbildung 7-1:	Übersicht über die berechneten maximalen Strahlenexpositionen in den Szenarien mit relevantem Lösungszutritt in das Grubengebäude (Ergebnisse PROSA: grün = Fall „oo“, orange = Fall „mm“, rot = Fall „mo“, vgl. Kapitel 6.6.1; Ergebnisse EMOS: blau; bei deterministischen Modellrechnungen: offene Symbole = 1. Maximum, volle Symbole = 2. Maximum; lila: Ergebnis einer Spezialrechnung mit Referenzwerten (volles Symbol) und Bandbreite).....	153
Abbildung 7-2:	Verteilung der Radionuklide auf die Komponenten des Systems „Endlager Morsleben“ als Funktion der Zeit, summarisch quantifiziert durch den Toxizitätsindikator; Beitrag aller Einlagerungsbereiche. ....	159
Abbildung 7-3:	Verteilung der Radionuklide auf die Komponenten des Systems „Endlager Morsleben“ als Funktion der Zeit, summarisch quantifiziert durch den Toxizitätsindikator; Beitrag der abgedichteten Einlagerungsbereiche. ....	159

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1:	Volumen der in die verschiedenen Einlagerungshohlräume eingelagerten radioaktiven Abfälle. ....	25
Tabelle 2-2:	Inventar der potenziell langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide sowie von $^3\text{H}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{90}\text{Sr}$ und $^{137}\text{Cs}$ in den Abfällen an den verschiedenen Einlagerungsorten, angegeben als Aktivität in Bq, bezogen auf den 30.06.2005. ([BfS 2007d] und dort zitierte Literatur). ....	27
Tabelle 4-1:	Konturvolumen und Volumenanteile mit unterschiedlichem Versatz in den verschiedenen Grubenteilen, wobei die Abfälle dem kompaktierbaren Versatz zugerechnet sind. ....	58
Tabelle 6-1:	Widerstandszeit einer Abdichtung von 26 m Länge gegen die korrosive Wirkung von Mg-haltiger Lösung bei verschiedenen Anfangspermeabilitäten und einem zeitlich konstanten Druckgefälle von 4,8 MPa. ....	110
Tabelle 6-2:	Relevante Parameter gemäß den statistischen Auswertungen der Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen mit PROSA und EMOS. ....	128

# ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

<b>AtG</b>	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
<b>AVV</b>	Novellierung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 StrlSchV, Entwurf des BfS, Stand 11.11.2002; basierend auf: Bundesminister der Justiz, Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen, Bundesanzeiger 42 (Nr. 64a), 1990
<b>BFA</b>	Braunkohlefilterasche
<b>BfS</b>	Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter
<b>BGR</b>	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
<b>BMI</b>	Bundesministerium des Innern, Bundesinnenminister
<b>BMU</b>	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Bundesumweltminister
<b>DGL</b>	Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat, Folge nicht-chloridischer Schichten im Übergang von der Staßfurt- zur Leine-Serie des Zechstein
<b>ELB</b>	Einlagerungsbereich
<b>ERAM</b>	Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben
<b>FEP</b>	Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse, Abkürzung vom englischen „features, events and processes“
<b>IAEA</b>	International Atomic Energy Agency, Internationale Atomenergieorganisation
<b>ICRP</b>	International Commission on Radiological Protection, Internationale Strahlenschutzkommission
<b>IP19</b>	Lösung des hexären Meerwassersystems im Gleichgewicht mit Halit, Kieserit, Carnallit, Kainit, Polyhalit
<b>IP21</b>	Lösung des hexären Meerwassersystems im Gleichgewicht mit Halit, Sylvit, Carnallit, Kainit, Polyhalit
<b>LZSN</b>	(radiologischer) Langzeitsicherheitsnachweis
<b>NF</b>	Nordfeld, Teil der Grube Bartensleben, hier nur als Bezeichnung eines ELB verwendet
<b>OECD/NEA</b>	Nuclear Energy Agency (NEA) within the Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Nuklearenergie Agentur der Organisation für wirtschaftliche Entwicklung und Zusammenarbeit,
<b>OF</b>	Ostfeld, Teil der Grube Bartensleben, hier nur als Bezeichnung eines ELB verwendet
<b>RSK</b>	Reaktor-Sicherheitskommission
<b>SF</b>	Südfeld, Teil der Grube Bartensleben
<b>SSK</b>	Strahlenschutzkommission

- StrISchV** Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrISchV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 20. Juli 2001 (BGBl Teil I, S. 1714), zuletzt geändert durch Art 2 § 3 Abs. 31 des Gesetzes vom 1. September 2005. BGBl Teil I, S. 2618
- UMF** Untertage-Messfeld, Grubenfeld im Zentralteil der Grube Bartensleben
- VBA** allgemein: verlorene Betonabschirmung. Mit Radium-VBA wird hier ein bestimmter Abfallbehälter einschließlich der ihn umgebenden VBA bezeichnet.
- WF** Westfeld, Teil der Grube Bartensleben
- WSF** Bezeichnung des ELB, der das SF und das WF umfasst
- ZT** Zentralteil, Teil der Grube Bartensleben, hier auch als Bezeichnung eines ELB verwendet

ERA  
Morsleben

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 KURZABRISS DER GESCHICHTE DES ENDLAGERS MORSLEBEN

Das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) wurde im ehemaligen Kali- und Steinsalzbergwerk Bartensleben eingerichtet. Dieses ist Teil der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, welche unmittelbar an der westlichen Landesgrenze von Sachsen-Anhalt liegt und um 1900 abgeteuft wurde.

In den beiden Schachanlagen wurde zunächst Kali- und später – bis Ende der 60er Jahre – Steinsalz abgebaut. Im 2. Weltkrieg dienten die Grubengebäude auch Rüstungszwecken. Von 1959 bis 1984 wurden Teile der Schachanlage Marie zur untertägigen Hähnchenmast genutzt, und von 1987 bis 1996 waren Härtereialtsalze zwischengelagert.

1970 wurde die Schachanlage Bartensleben von den verantwortlichen staatlichen Stellen der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) aus zehn Salzbergwerken als Endlager für radioaktive Abfälle ausgewählt. Die erste probeweise Einlagerung radioaktiver Abfälle erfolgte 1971. Die Inbetriebnahmegenehmigung wurde 1979, die unbefristete Genehmigung zum Dauerbetrieb 1986 erteilt. Im Jahr 1990 ging das Endlager mit der Dauerbetriebsgenehmigung auf das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) über. Die Abfalleinlagerung dauerte mit Unterbrechungen bis 1998, im Jahr 2001 verzichtete das BfS auf Annahme und Einlagerung weiterer Abfälle. Der 1992 bei der zuständigen Planfeststellungsbehörde des Landes Sachsen-Anhalt gestellte Antrag auf Weiterbetrieb wurde mit Antrag von 1997 auf die Stilllegung des ERAM beschränkt. Durch die Stilllegungsmaßnahmen sind der sichere Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre herzustellen und die Langzeitsicherheit zu gewährleisten.

Im ERAM sind insgesamt rund 37 000 m<sup>3</sup> schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit überwiegend kurzlebigen Radionukliden, einer Gesamtaktivität von weniger als 6·10<sup>14</sup> Bq und einer Aktivität der Alpha-Strahler in der Größenordnung von 10<sup>11</sup> Bq eingelagert (Stand 30.06.2005). Volumenmäßig entspricht diese Abfallmenge dem mittleren Aufkommen von vernachlässigbar wärmeentwickelnden Betriebsabfällen in den deutschen Kernkraftwerken während rund 17 Jahren. Die Radiotoxizität<sup>1</sup> der im ERAM eingelagerten Abfälle ist jedoch gering, sie beträgt nur rund 12 % der Radiotoxizität dieser Betriebsabfälle aus den Kernkraftwerken, die im langjährigen Mittel in einem Jahr anfallen (nach [ARGE 2001] und [Colenco 2009]).

## 1.2 GEGENSTAND UND ZIELSETZUNG DES VORLIEGENDEN BERICHTS

Der Nachweis der Langzeitsicherheit für das ERAM betrifft mehrere Themenkreise und verschiedene Aspekte, die in zahlreichen vom BfS erstellten oder vom BfS in Auftrag gegebenen Berichten dargestellt und behandelt werden. Erst gemeinsam und in der Kombination ergeben die in diesen Berichten dargestellten Befunde den Nachweis der Langzeitsicherheit.

Die Langzeitsicherheit umfasst die Sicherheit vor einer schädlichen Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen in die Biosphäre (radiologische Langzeitsicherheit), die Sicherheit vor einer schädlichen Freisetzung von chemotoxischen Stoffen aus dem Endlager in die Biosphäre (chemotoxische Langzeitsicherheit) sowie die Sicherheit vor unzulässigen gebirgs- und bodenmechanischen Veränderungen an der Geländeoberfläche (Sicherheit vor unzulässigen Senkungen der Geländeoberfläche), jeweils nach Verschluss des Endlagers.

---

<sup>1</sup> berechnet mit dem Inventar an Radionukliden und den radionuklidspezifischen Dosiskoeffizienten für Ingestion gemäß StrlSchV

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die radiologische Langzeitsicherheit. Der Bericht soll eine Übersicht über den Nachweis vermitteln, die sicherheitsrelevanten Sachverhalte und Prozesse ansprechen, das Vorgehen für den Nachweis darlegen, die Ergebnisse wiedergeben und werten sowie allgemein als Wegweiser dienen. Formell maßgebend für den Langzeitsicherheitsnachweis bleiben jedoch die einzelnen Prüfberichte. Die chemotoxische Langzeitsicherheit ist in [BfS 2007a] dargestellt, die Sicherheit vor unzulässigen Senkungen der Geländeoberfläche in [DBE 2008a].

Die potenziellen Auswirkungen des Endlagers während der Betriebsphase und damit auch während und durch das Umsetzen der Maßnahmen zum Schließen der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie sind nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts. Ausgangspunkt für den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit ist das gemäß Planung verfüllte und verschlossene Endlager, wobei die Möglichkeit von Fehlern bei der Umsetzung der geplanten Verschlussmaßnahmen in die Überlegungen einbezogen wird.

### **1.3 AUFBAU DES BERICHTS**

Im nachfolgenden Kapitel 2 wird zunächst das System „Endlager Morsleben“ im Zustand vor dem Umsetzen der geplanten Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen der Anlage beschrieben. Die Beschreibung betrifft den Standort, die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse in der Salzstruktur, im Hutgestein und im Deckgebirge, das Grubengebäude, die Einlagerungsorte der Abfälle, die eingelagerten Abfälle und die gebirgsmechanischen Verhältnisse.

Kapitel 3 fasst anschließend das Sicherheitskonzept, das Verschlusskonzept sowie das Konzept für den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit zusammen. Zur besseren Verständlichkeit des Sicherheitskonzepts wird das entsprechende Kapitel 3.2 – als vorgreifender Abriss des späteren Kapitels 4.4 – durch eine kurze Darstellung der potenziell sicherheitsrelevanten Prozesse und Standorteigenschaften eingeleitet. Das Kapitel 3.3 zum Verfüll- und Verschlusskonzept enthält neben der Kurzbeschreibung des beantragten Konzepts auch eine zusammenfassende Darstellung seiner Entwicklung. Diese Darstellung zeigt, dass das beantragte Konzept aus einer Alternativenprüfung hervorgegangen ist.

Kapitel 4 beschreibt im Überblick die möglichen künftigen Entwicklungen des Endlagersystems und identifiziert die potenziell relevanten Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse. Es wird durch eine Systembeschreibung nach Umsetzen der geplanten Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des Grubengebäudes eingeleitet. Im abschließenden Kapitel 4.5 werden die im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises betrachteten Szenarien angeführt und kurz charakterisiert.

Kapitel 5 gibt einen Überblick über die beim Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit verwendeten Unterlagen und insbesondere über die am Standort oder mit direktem Bezug zum Standort durchgeführten Untersuchungen (soweit diese für den Langzeitsicherheitsnachweis relevant sind).

In Kapitel 6 werden die quantitativen Analysen, welche für den Nachweis der Langzeitsicherheit durchgeführt wurden, kurz beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse wiedergegeben. Das Kapitel ist nach Themenbereichen derart gegliedert, dass im Allgemeinen eine logische Kette entsteht: Gebirgsmechanik, Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge, Gasbildung, Konvergenz der Grubenbaue als Schnittstelle zwischen Gebirgsmechanik und Modellrechnungen zum Radionuklidtransport im Grubengebäude, Korrosion von Abdichtbauwerken durch Grubenlösung, künftige Entwicklung des Endlagersystems ohne nennenswerten Lösungszutritt in das Grubengebäude, Radionuklidaustrag in Lösung bei relevantem Lösungszutritt in das Grubengebäude, Radionuklidaustrag in der Gasphase, menschliches Eindringen und Nachweis der anhaltenden Unterkritikalität des spaltbaren Materials im ERAM.

Kapitel 7 bewertet zusammenfassend die Ergebnisse der durchgeführten Analysen. Es ist gegliedert in eine Wertung der qualitativen Analyse, eine Wertung der quantitativen Analysen, ein Unterkapitel mit ergänzenden Argumenten zur radiologischen Langzeitsicherheit sowie Schlussfolgerungen.



## 2 SYSTEMBESCHREIBUNG „ENDLAGER MORSLEBEN“

### 2.1 STANDORT

Die Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie befindet sich in einer Salzstruktur aus zechsteinzeitlichen Salzgesteinen im Untergrund des Allertals, das ungefähr Südost-Nordwest verläuft, eine Breite von etwa 1 km aufweist und im Südwesten vom Höhenzug des Lappwalds (bis ca. 180 mNN), im Nordosten vom Flechtinger Höhenzug (130 mNN – 170 mNN) begrenzt wird. Das Niveau der Aller liegt in der Nähe des ERAM auf ca. 108 mNN. Der Schacht Bartensleben hat die Gauß-Krüger-Koordinaten R = 44 38 673,8 und H = 57 88 155,1. Seine Rasenhängebank liegt in einer Höhe von +133,8 mNN.

Die Aller entspringt rund 20 km südöstlich des ERAM nahe Seehausen und mündet etwa 240 km flussabwärts des ERAM bei Verden in die Weser. Am Pegel Alleringersleben wurden in den Jahren 1971 bis 2004 ein mittlerer Abfluss (Mittelwasser MQ) von 423 l/s – entsprechend 13,3 Mio. m<sup>3</sup>/a – und ein mittleres Niedrigwasser (MNQ) von 81 l/s gemessen. Der höchste während dieser Zeitperiode auf Höhe des Schachtes Bartensleben aufgetretene Wasserstand der Aller lag bei 111,8 mNN.

Mit Ausnahme der Stadt Helmstedt und des südlich von ihr gelegenen ehemaligen Braunkohletagebaugebiets ist das Gebiet im 10 km-Bereich um das ERAM ländlich geprägt. Es wird heute überwiegend landwirtschaftlich und untergeordnet forstwirtschaftlich genutzt. Die Böden bestehen aus Festgesteinsverwitterungsmaterial (insbesondere aus Sand-, Kalk- und Tonsteinen) sowie aus eiszeitlichen Ablagerungen.

### 2.2 GEOLOGISCHE GEGEBENHEITEN

#### 2.2.1 Salzstruktur

Die Salzstruktur, in der sich das ERAM befindet, wird als Allertal-Salzstruktur bezeichnet und erstreckt sich über rund 50 km von Seehausen im Südosten bis Wolfsburg im Nordwesten. Im Bereich der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie liegt der Salzspiegel weitgehend flachsöhlig bis leicht gewellt in einer Tiefe von ca. -140 mNN. An einigen Stellen im Ausstrichbereich des Kaliflözes Staßfurt kommen Eintiefungen des Salzspiegels, zum Teil bis 35 m, vor. Derartige Eintiefungen befinden sich über dem Hauptquerschlag Bartensleben und über dem 3. Nordquerschlag Marie im Bereich des Lagers H. Die Breite der Salzstruktur am Salzspiegel beträgt in der Umgebung des ERAM etwa 1700 m.

Die Salzstruktur entstand durch das Öffnen der Allertalspalte im Keuper, d. h. vor mehr als 200 Mio. Jahren, bei dem saline Gesteine in die sich allmählich verbreiternde Störungszone einwanderten und aufstiegen.

Der Internbau der Salzstruktur ist durch eine ausgeprägte Verfallung der salinaren Schichtfolgen des Zechsteins gekennzeichnet (Abbildung 2-1). Die Faltenachsen streichen grundsätzlich entsprechend dem Verlauf der Allertalstörungszone NW-SE. Der südwestliche Strukturteil ist salztektonisch stärker überprägt; hier sind isoklinale NE-vergente Falten vorherrschend. Im Nordostteil der Salzstruktur treten weitspannige Sättel und Mulden auf. Die Sättel werden im Kern aus den salinaren Einheiten der Staßfurt-Folge aufgebaut, während in den Mulden Einheiten von der Leine-Folge bis zur Aller-Folge vorkommen. Die Schichten der Aller-Folge sind verbreitet noch über der Ostmulde erhalten. Die Schichten der Werra-Folge wurden nicht in die Strukturbildung einbezogen. Sie bestehen im wesentlichen aus Karbonaten und Anhydrit. Zur Abscheidung von chloridischen Gesteinen kam es während der Werra-Folge im Bereich des ERAM nicht.



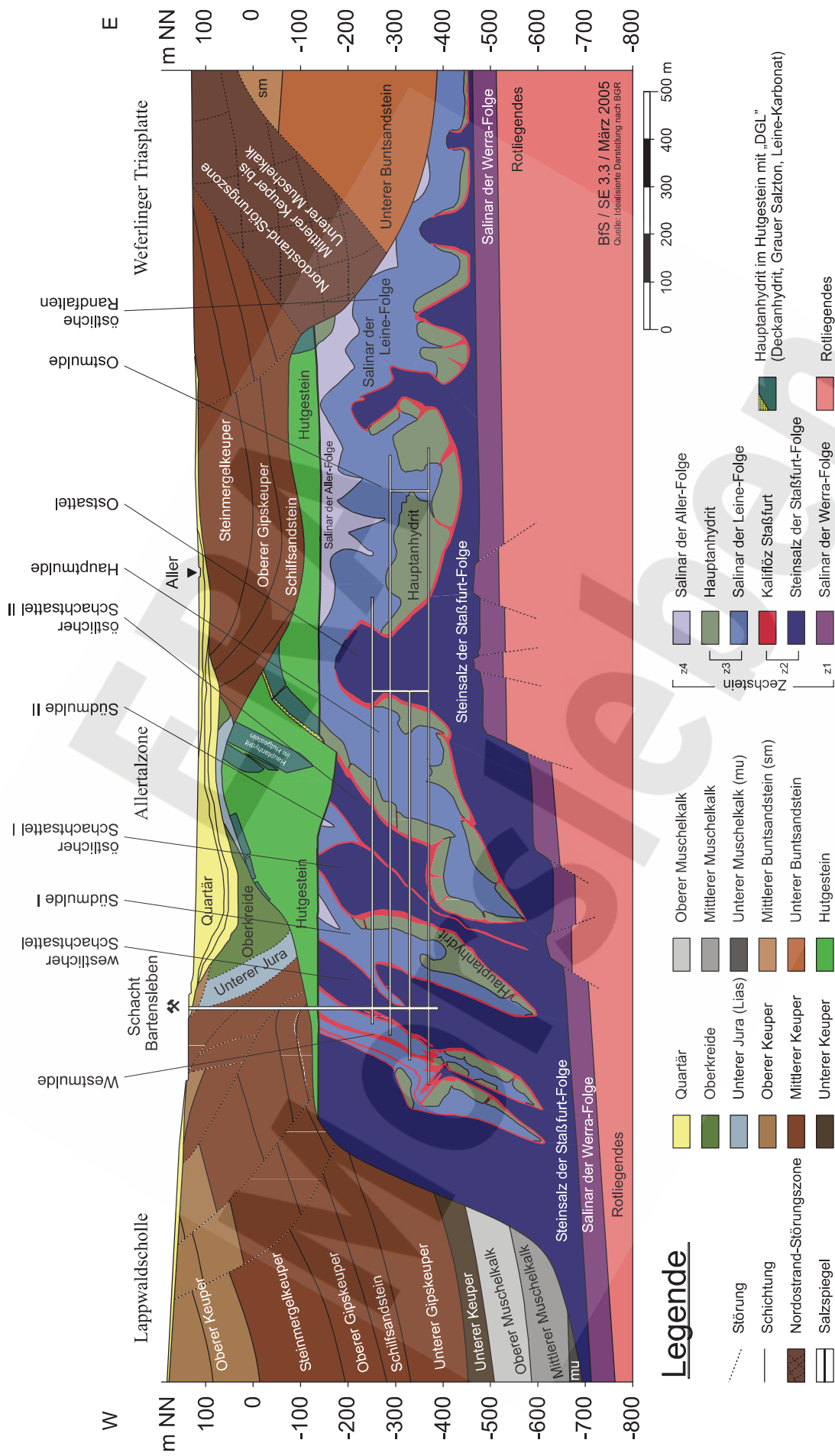


Abbildung 2-1: Schematischer geologischer West-Ost-Schnitt durch das Allertal im Bereich des ERAM.

Die Oberfläche des Staßfurt-Karbonats liegt im Südwesten bei ca. -680 mNN, unter dem Ostfeld bei ca. -470 mNN. Das fließfähige Salinar bis zum Salzspiegel hat also im Südwesten eine maximale Mächtigkeit von ca. 540 m und im Nordosten von ca. 330 m. Die Salzstruktur wird von den Schichten des Rotliegenden unterlagert. Die Basis der Salzstruktur liegt im Südwesten bei -700 mNN und bei etwa -520 mNN im Nordosten.

Das Kaliflöz Staßfurt wirkte bei den salztektonischen Bewegungen im Rahmen der Strukturbildung als Ausgleichshorizont zwischen den beiden unterschiedlichen, mächtigen Schichtkomplexen der Staßfurt-Folge einerseits und der Leine- und Aller-Folge andererseits. Diese ehemals salztektonisch mobile Zone wird sowohl durch die rheologischen Eigenschaften des Kaliflöz selbst, als auch durch den erheblichen Kontrast in den geomechanischen Eigenschaften zur benachbarten, kompetenten Schichtenfolge des Hauptanhydrit der Leine-Folge geprägt. Das Kaliflöz Staßfurt reagierte auf die salztektonische Beanspruchung durch Anstau oder sehr starke Ausdünnung. Aufgrund des tiefreichenden und steilen Mulden-Sattel-Baus tritt das Kaliflöz Staßfurt in Form von zahlreichen steilstehenden Kalilagern auf, die die Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie von der untersten bis zur obersten Sohle queren. Sie reichen nur in der Grube Marie und im südwestlichen und zentralen Strukturteil Bartensleben bis zum Salzspiegel. Im Nordostteil der Struktur wird das Kaliflöz Staßfurt aufgrund der weitspannigen Faltung nicht nur von den Steinsalz-Schichten der Leine-, sondern auch von jenen der Aller-Folge überlagert und so vom Salzspiegel isoliert (z. B. in den Flanken des Ostsattels und der Ostmulde).

Der Hauptanhydrit reagierte aufgrund seiner spröden Eigenschaften bruchhaft auf die salztektonische Verformung der übrigen salinaren Gesteine und liegt daher heute in der Salzstruktur in Form einzelner, durch Salz getrennter Schollen vor. Der Grad der Zerblockung nimmt entsprechend der salztektonischen Beanspruchung von NE gegen SW zu. Die Hauptanhydritschollen blieben bei der halokinetischen Bewegung als relativ immobile Körper vorwiegend in den tieferen Bereichen der Mulden zurück. Lediglich im zentralen Strukturteil an der Westflanke der Hauptmulde erstreckt sich der – auch dort in Schollen zerlegte – Hauptanhydrit bis zum Salzspiegel und weiter nach NE ansteigend in das Hutgestein. Im nordöstlichen Strukturteil wird auch er durch die Steinsalz-Schichten der Leine- und Aller-Folge vom Salzspiegel isoliert.

Die Petrographie, Struktur und Genese der Lagerstätte sind ausführlich in [BGR 2000a] beschrieben.

Steinsalz und Kalisalz sind in unverritztem Zustand dicht (Permeabilität  $< 10^{-20} \text{ m}^2$ ). Um Auffahrungen bilden sich Auflockerungszonen von weniger als 1 m bis wenigen Metern Ausdehnung, in denen die hydraulische Durchlässigkeit erhöht ist. In den stark durchbauten Bereichen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie können sich die Auflockerungszonen von Abbau zu Abbau erstrecken und diese hydraulisch miteinander verbinden.

Die Permeabilität des Hauptanhydrit ist sehr heterogen und variiert über kurze Distanzen zwischen den Werten des kompakten Hauptanhydrit, die vergleichbar zu jenen von unverritztem Steinsalz sind, und Werten bis  $> 10^{-15} \text{ m}^2$ . Die Permeabilität im Dekameter- und Hektometerbereich des Hauptanhydrit hängt stark vom Grad der Klüftung und deren Vernetzung ab. Innerhalb der einzelnen Hauptanhydrit-Schollen kann eine ausgedehnte Vernetzung nicht ausgeschlossen werden.

Der Graue Salzton ist eine tonhaltige Schicht, welche im Übergang von der Staßfurt-Serie zur Leine-Serie in Verbindung mit dem Deckanhydrit (Staßfurt-Serie) und dem Leinekarbonat auftritt. Er besitzt eine geringe Permeabilität im Bereich von  $10^{-19} \text{ m}^2$  bis  $10^{-18} \text{ m}^2$ .

Die Permeabilitäten der salinaren Gesteine in der Salzstruktur sind in [BGR 1998a], [BGR 1998b] und [BGR 2000b] diskutiert. Die mögliche Permeabilität von eventuellen ausgedehnten hydraulischen Wegsamkeiten in Hauptanhydrit-Schollen wird in [Colenco 2009] und in [GRS 2009b] abgeschätzt.

## 2.2.2 Hutgestein

Über den Salinargesteinen der Salzstruktur liegt das Hutgestein. Dieses Rückstandsgebirge entstand – und entsteht rechnerisch mit äußerst geringen Raten noch –, wenn die Gesteine der Salzstruktur an ihrer Obergrenze in Kontakt mit ungesättigten Grund- und Formationswässern kommen und dadurch leichtlösliche Bestandteile (Salzminerale) aufgelöst und mit den Wässern weggeführt werden. Dieser Lösungsprozess wird als Subrosion bezeichnet. Aus den zurückbleibenden schwer- und unlöslichen Mineralen der Salzgesteine (Anhydrit, Tonminerale), den schwer- und unlöslichen Gesteinen im Salinar (z. B. Hauptanhydrit, Leinekarbonat) sowie eventuellen Sulfatneubildungen entsteht das Hutgestein. Dieses besteht weitgehend aus Anhydrit und Gips, daneben kommen Ton bzw. Tonsteine und Karbonatgesteine vor. Die Ablaugungsgrenze der Salinargesteine, der Salzspiegel, bildet die Basis des Hutgesteins. Die Verbreitung des Hutgesteins entspricht der Erstreckung des Salzspiegels. An den Flanken der Salzstruktur entwickelte sich in diesem Bereich der Allertal-Salzstruktur aufgrund der hohen Salzkonzentration im Formationswasser des Deckgebirges und der geringen Gebirgsdurchlässigkeit kein Rückstandsgebirge. Die Mächtigkeit des Hutgesteins variiert stark zwischen einigen 10 m und ca. 240 m. Die geringsten Mächtigkeiten weist das Hutgestein im Bereich der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie entlang des Südwest- und Nordostrands des Salzspiegels sowie nordöstlich des Schachtes Bartensleben oberhalb der Ostmulde auf (Abbildung 2-1).

Ungestörtes, „intaktes“ Hutgestein weist eine geringe Klufthäufigkeit mit niedrigem Vernetzungsgrad auf und ist hydraulisch gering durchlässig. Als Strukturen mit relativ erhöhten Permeabilitäten liegen im Hutgestein vor oder können möglicherweise im Hutgestein vorkommen

- die Schichtenfolge<sup>2</sup> Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat, die als nichtchloridische Zechsteinfolge bei der Subrosion wenig verändert in das Hutgestein eingebaut wurde,
- Karstschlotten, die als Sekundärphänomene durch Sulfatverkarstung an der Hutgesteins-Obergrenze entstanden sind. Sie sind mit Gesteinsmaterial aus den darüber liegenden Sedimenten gefüllt und weisen eine begrenzte Teufenerstreckung auf. Entsprechend der Lithologie der das Hutgestein überlagernden Schichten (Keuper, Jura oder Kreide, selten Quartär) sind sie mit wenig durchlässigem tonigem (Keuper, Jura) und schluffigem (Kreide) Material plombiert.
- offene Klüfte in Hauptanhydrit-Schollen, die durch Lösung der ehemaligen Kluffüllung nahe der Hutgesteins-Oberfläche entstanden sind und ebenfalls eine begrenzte Teufenerstreckung aufweisen,
- geomechanische Schwächezonen, die aufgrund von geotektonischen oder bergbaubedingten Beanspruchungen entstanden sind und die dann im Vergleich mit dem „intakten“ Hutgestein eine erhöhte Kluff- und Risshäufigkeit und damit evtl. eine erhöhte Permeabilität aufweisen.

Geomechanische Schwächezonen können das Hutgestein von dessen Obergrenze bis zum Salzspiegel durchziehen und lateral ausgedehnt sein. Die Standortuntersuchungen ergaben allerdings keine Hinweise auf das Bestehen solcher Zonen. Gleichwohl wurde das Entstehen einer solchen Zone in geologischer Zukunft als Möglichkeit in die Sicherheitsbetrachtung einbezogen.

Eine aufgrund von Standortbefunden identifizierte Struktur mit erhöhter Permeabilität, die das Hutgestein von der Obergrenze bis zum Salzspiegel queren kann, ist die Schichtenfolge DGL. Ihr Verlauf im Hutgestein ist durch ihre ursprüngliche Lage im nicht-subrodierten Zechstein und damit durch dessen Lagerungsverhältnisse gegeben. Die durchschnittliche Mächtigkeit dieser Schichtenfolge im Hutgestein beträgt etwa 4 m. Sie verläuft aufgrund der überkippten Faltung im Hangenden des Hauptanhydrit, NW-SE-streichend und nach SW einfallend. Am Salzspiegel ist sie damit auch dem Kaliflöz Staßfurt in der Salzstruktur benachbart. Eine bis zur Obergrenze des Hutgesteins reichende Schichtenfolge DGL liegt im Hutgestein nur in der Verlängerung der Westflanke der Hauptmulde vor (Abbildung 2-1).

Gekoppelt an die Zerblockung des Hauptanhydrit verläuft auch die Schichtenfolge DGL im Hutgestein nicht durchgehend. Im Streichen ist von einer hydraulisch wirksamen Ausdehnung von wenigen 100 m auszugehen. Die hydraulisch wirksamen Längen von DGL-Schollen im Einfallen der Schichten sind schwieriger an-

---

<sup>2</sup> nachfolgend bezeichnet als Schichtenfolge DGL

zugeben. Eine Zerblockung der Schichtenfolge DGL in dieser Richtung wird deshalb für den Langzeitsicherheitsnachweis nicht unterstellt.

Die Strukturen mit begrenzter Teufenerstreckung, die Karstschlotten und offenen Klüfte in Hauptanhydrit-Schollen, sind an die Obergrenze des Hutgesteins gebundenen und treten deshalb nur in dessen Randbereich auf. Da ein eventueller Radionuklidtransport aus der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie durch das Hutgestein von einem Bereich des Salzspiegels ausgeht, über dem das Hutgestein relativ mächtig ist, haben diese Strukturen keinen Einfluss auf die Langzeitsicherheit des ERAM.

Eine detaillierte Beschreibung des Hutgesteins enthält [BGR 1998c].

Das Grundwasser zeigt im Hutgestein im Allgemeinen diffusionsdominierte Vertikalprofile von NaCl-Konzentration und Grundwasseralter, wobei letztere aus Isotopenuntersuchungen abgeleitet sind [Sonntag 1999]. Die Profile weisen auf eine geringe, nach unten gerichtete Bewegungsrate des Grundwassers hin. Die Ergebnisse von Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge stimmen mit diesem Befund überein: Das Porenwasser im Hutgestein bewegt sich nach den Modellrechnungen bei Berücksichtigung der Dichteeffekte mit geringen Raten ungefähr horizontal in Richtung des Bereichs, der vom Oberkreidetrog (vgl. Kapitel 2.2.3) überlagert wird, und steigt dort in die Oberkreide auf. Im Bereich nordöstlich des Oberkreidetrogs, für den Isotopenprofile im Hinblick auf Grundwasseralter und -bewegung im Hutgestein ausgewertet wurden [Sonntag 1999], zeigt das Modell in der Schichtenfolge DGL eine geringe, nach unten gerichtete Lösungsbewegung (vgl. Kapitel 6.2).

Unterhalb von etwa 300 m unter Gelände sind die Grundwässer nach den Isotopenuntersuchungen sehr alt (Millionen von Jahre, vgl. auch Kapitel 2.2.3) [Sonntag 1999].

Die Hutgesteinsbildung in Folge der Salinarsubrosion war in der geologischen Vergangenheit unterschiedlich; aktive Subrosionsphasen waren durch tektonisch induzierten starken Salzaufstieg oder unter eiszeitlichen Bedingungen mit Eisüberdeckung gegeben. Gegenwärtig findet aufgrund der tektonischen und hydrogeologischen Verhältnisse praktisch keine Subrosion statt. Die auf der Basis hydrogeologischer Modellrechnung modellhaft ermittelte Subrosionsrate beträgt derzeit wenige Mikrometer pro Jahr. In den kommenden 150 000 Jahren kann so selbst bei Unterstellung extremer Szenarien (Permafrost) nur eine Steinsalzschieht mit der Mächtigkeit von ca. 2 m aufgelöst werden [BGR 1999b].

## 2.2.3 Deckgebirge

Das Deckgebirge weist eine strukturelle Dreiteilung in die Allertalzone, die im Südwesten daran angrenzende Lappwaldscholle und die im Nordosten angrenzende Weferlinger Triasplatte auf. Diese drei Einheiten werden durch die beidseitigen Randstörungen der Allertalzone getrennt.

Innerhalb der Lappwaldscholle und der Weferlinger Triasplatte zeigt das Deckgebirge einen relativ ruhig gelagerten Aufbau von hydraulisch wenig durchlässigen und besser durchlässigen Schichten (Unterer Buntsandstein bis Lias).

Die Lappwaldscholle im Südwesten der Allertalzone ist durch Schichten des Muschelkalk bis Lias aufgebaut (Abbildung 2-1). Sehr gering durchlässige Einheiten sind der Obere Gipskeuper, der Untere Gipskeuper, der Untere Keuper und der Mittlere Muschelkalk. Steinsalzführend sind der Obere und der Untere Gipskeuper sowie der Mittlere Muschelkalk. Nach den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung mit Berücksichtigung der Dichteeffekte ist die Versalzung des Porenwassers in der Lappwaldscholle in erster Linie auf die Subrosion dieser triassischen Steinsalzlager zurückzuführen. Die geringdurchlässigen, relativ ruhig gelagerten Schichten und der hohe, auf die Salzlager in diesen Schichten zurückgehende Salzgehalt des Grundwassers bewirken eine lediglich geringe Grundwasserbewegung an der Flanke der Salzstruktur.

Die Allertalzone zeigt im südwestlichen und nordöstlichen Teil einen unterschiedlichen Aufbau (Abbildung 2-1). Im südwestlichen Teil und südwestlich der Kulmination des Hutgesteins beherrscht ein O-



berkreidetrog den Aufbau des Deckgebirges. Dieser setzt sich von oben nach unten aus den zunehmend geringer durchlässigen, hydraulisch eng verbundenen Porenwasserleitern der Walbecker Schichten, der Oberen und der Unteren Alleringerslebener Schichten zusammen. Diese Schichten, insbesondere die Oberen Alleringerslebener Schichten, weisen vertikal eine geringere hydraulische Durchlässigkeit als horizontal auf (Anisotropie). An der Südwestflanke des Troges und meistens auch an dessen Basis und an der Nordostflanke trennen gering durchlässige Gesteine des Unteren Jura den Oberkreidetrog vom Hutgestein.

Nordöstlich der Kulmination des Hutgesteins setzt sich das Deckgebirge im Wesentlichen aus Schichten des Keuper zusammen. Flächig verbreitet ist der beschränkt durchlässige Steinmergelkeuper. Dieser wird teilweise unterlagert vom gering durchlässigen Oberen Gipskeuper. Nur örtlich treten der verhältnismäßig gut durchlässige Schilfsandstein, der gering durchlässige Untere Gipskeuper sowie Reste des Mittleren und Unteren Muschelkalk auf.

Die Weferlinger Triasplatte im Nordosten der Allertalzone ist von dieser durch eine relativ mächtige, erhöht durchlässige Randstörung getrennt, die steil nach Nordosten ansteigt (Abbildung 2-1). Die Basis der Weferlinger Triasplatte bilden mächtige, gering durchlässige Schichten des Unteren Buntsandstein, die konkordant auf dem Zechstein aufliegen. Darüber folgen, ruhig und flach gelagert, der etwas erhöht durchlässige basale Volpriehausen-Sandstein und die gut durchlässige Solling-Folge, voneinander getrennt durch die gering durchlässige, mächtige Volpriehausen-Folge. Über der Solling-Folge wird das Deckgebirge praktisch bis zur Geländeoberfläche durch das gering durchlässige, jedoch örtlich verkarstete Röt (Oberer Buntsandstein) gebildet.

Die Grundwasserbewegung im Deckgebirge wird einerseits durch die morphologischen Hochlagen des Lappwalds und der Weferlinger Triasplatte und der dazwischen verlaufenden Tieflage der Aller und andererseits durch die erhöhte Dichte des Grundwassers im tieferen Untergrund bestimmt. In der Lappwaldscholle und der Weferlinger Triasplatte erfolgt sie generell quer zum Allertal, wobei sie oberflächennah durch die Einschnitte der seitlichen Zuflüsse der Aller modifiziert ist. Durch die flache Wechsellagerung von hydraulisch besser durchlässigen mit gering durchlässigen Schichten und die zunehmende Versalzung des Grundwassers nimmt die Grundwasserbewegung mit zunehmender Teufe stark ab.

Die Aller und die Tieflage des Allertals bilden die regional dominierende Exfiltrationszone. In Schnitten quer zum Allertal verschiebt sich die Aller im Bereich des ERAM von ungefähr der Mitte der Allertalzone im SE gegen den Nordostrand der Allertalzone im NW. Je nach der Lage der Aller und dem Verlauf der Hutgestein-Obergrenze sind die Grundwasserflüsse in der Allertalzone etwas unterschiedlich gerichtet. Da die Aller überall NE des Oberkreidetrogs verläuft, ist in diesem jedoch immer eine NE-gerichtete Grundwasserbewegung zu erwarten, die aufgrund der abnehmenden (und teilweise anisotropen) hydraulischen Durchlässigkeit der Porenwasserleiter und der zunehmenden Versalzung des Grundwassers mit der Tiefe abnimmt.

In den relativ höher durchlässigen Schichten, vor allem in Oberflächennähe sowie im Schilfsandstein der Lappwaldscholle, in der Solling-Folge der Weferlinger Triasplatte und im Oberkreidetrog in der Allertalzone kann die Grundwasserbewegung auch eine nennenswerte Komponente längs des Allertals aufweisen.

Außer in begrenzten Bereichen ist das Hutgestein überall mindestens durch eine mehr oder weniger mächtige geringdurchlässige Schichteinheit des Deckgebirges von den oberflächennahen Grundwässern getrennt. Selbst wo der Oberkreidetrog direkt an das Hutgestein angrenzt und nicht durch gering durchlässige Gesteine des Unteren Jura von diesem getrennt ist, bilden die Unteren und Oberen Alleringerslebener Schichten eine gewisse hydraulische Barriere zwischen Hutgestein und oberflächennahen Grundwässern.

Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge sind ausführlich in [BGR 1998b] und [BGR 1998c] beschrieben.

Aufgrund von isopenhydrogeologischen Untersuchungen ergibt sich im Deckgebirge und im Hutgestein generell eine zonierte Tiefenverteilung der Grundwasseralter in der Lappwaldscholle und in der Allertalzone. In den oberen Schichten bis ca. 120 m unter Gelände weist das Grundwasser holozänes Alter auf (d. h. jünger als 10 000 Jahre). Darunter folgen Grundwässer mit weichseleiszeitlichem Alter (d. h. zwischen rund 15 000 und 100 000 Jahren) bis ca. 300 m unter Gelände und in den Tieflagen darunter Millionen Jahre alte

Wässer [Sonntag 1999]. Analoge Aussagen können für die Weferlinger Triasplatte aufgrund fehlender Daten nicht gemacht werden. Eine vergleichbare Zonierung der Grundwässeralter ist aber zu erwarten, da auch hier der zunehmende Salzgehalt des Grundwassers mit der Tiefe die Grundwasserbewegung behindert.

Der oberflächennahe verdünnende Grundwasserfluss in einem 200 m langen Abschnitt des Allertals liegt im Mittel pro Talflanke im Bereich von etwa 15 000 m<sup>3</sup> pro Jahr, entsprechend knapp 30 l/min (abgeleitet aus dem Grundwasserumsatz des 3-dimensionalen numerischen Grundwassermodells [Colenco 2001a], vgl. Kapitel 6.2).

Der Standort des ERAM zeichnet sich durch ein gering durchlässiges Hutgestein aus, das allenfalls von wenigen hydraulisch potenziell relevanten Strukturen von der Basis bis zur Obergrenze durchquert wird. Diese Strukturen sind die im Streichen zerrissenen Elemente der Schichtenfolge DGL. Das Deckgebirge ist als flache Wechsellagerung von gering durchlässigen, tonigen und erhöht durchlässigen Schichten aufgebaut. Zusammen bilden das Hutgestein und das Deckgebirge eine 250 m mächtige Schutzschicht über der Salzstruktur, die die Grundwasserbewegung an deren Oberfläche (und somit auch die Subrosion) auf äußerst geringe Werte begrenzt.

## **2.3 GRUBENGEBÄUDE, EINLAGERUNGSBEREICHE UND ABFÄLLE**

### **2.3.1 Grubengebäude**

Das Grubenfeld der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie erstreckt sich von der Gemeinde Morsleben aus betrachtet über eine Gesamtlänge von 5,6 km in nordwestlicher Richtung. Die größte querschlägige Ausdehnung beträgt etwa 1,7 km und liegt im Grubengebäude Bartensleben. Die Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie ist durch die beiden Schächte „Bartensleben“ und „Marie“ von der Tagesoberfläche aus erschlossen, die beiden Grubengebäude sind durch Verbindungsstrecken im Niveau der -291-m-Sohle (2. Sohle Bartensleben) und der -332-m-Sohle (3. Sohle Bartensleben) miteinander verbunden. Das System der Grubenbaue der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie ist in Abbildung 2-2 dargestellt.

Das aufgefahrene Hohlraumvolumen der beiden Grubengebäude beträgt etwa 8,7 Mio m<sup>3</sup>. Davon sind heute ca. 2,5 Mio m<sup>3</sup> mit Salzgrus, anderem kompaktierbarem Versatz und Abfällen verfüllt. Bis zum Abschluss der vorgezogenen Verfüllung im Rahmen der Maßnahmen zur bergbaulichen Gefahrenabwehr im Zentralteil, welcher zum Jahreswechsel 2009/2010 vorgesehen ist, werden zudem insgesamt etwa 0,8 Mio m<sup>3</sup> Salzbeton eingebracht. Die restlichen 5,4 Mio m<sup>3</sup> werden zu Beginn der Schließungsmaßnahmen noch unversetzt offen stehen [DBE 2005c]. Ein Großteil dieses unversetzten Hohlraumvolumens wird als Maßnahme zur Stilllegung des Endlagers verfüllt werden (vgl. Kapitel 3.3.2).

Im Grubengebäude Bartensleben, in dem die radioaktiven Abfälle eingelagert sind, wurden vier Hauptsohlen mit einem gegenseitigen vertikalen Abstand von etwa 40 m aufgefahren:

- 253-m-Sohle: 1. Sohle Bartensleben, 380-m-Sohle, -253 mNN
- 291-m-Sohle: 2. Sohle Bartensleben, 420-m-Sohle, -291 mNN
- 332-m-Sohle: 3. Sohle Bartensleben, 460-m-Sohle, -332 mNN
- 372-m-Sohle: 4. Sohle Bartensleben, 500-m-Sohle, -372 mNN



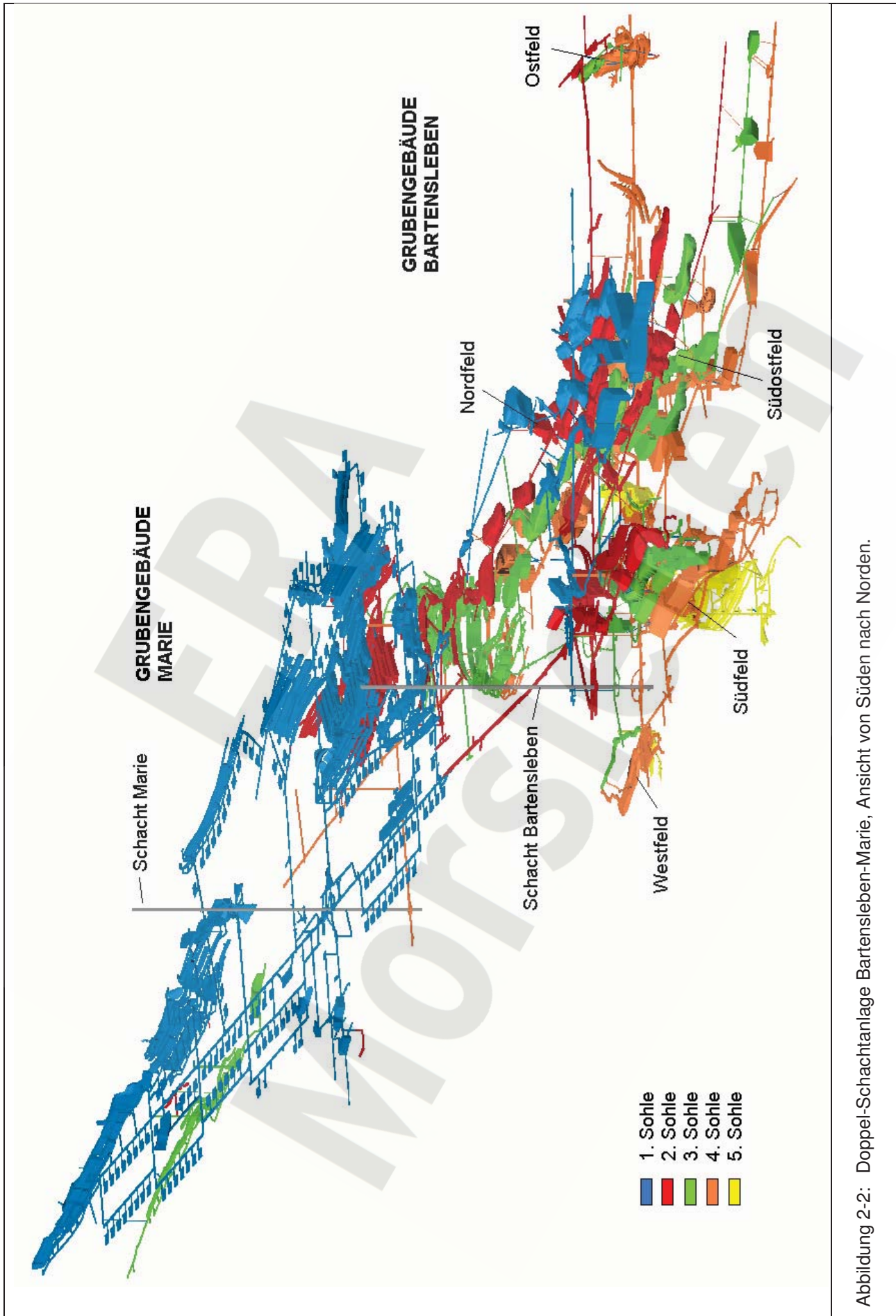


Abbildung 2-2: Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, Ansicht von Süden nach Norden.

Das Grubengebäude Bartensleben gliedert sich in das Westfeld, das Südfeld, das Südostfeld, das Ostfeld, den Zentralteil und das Nordfeld (Abbildung 2-2). Diese Feldesteile weisen Auffahrungen auf unterschiedlichen Sohlen und folgende gerundete Minimalabstände der obersten Auffahrungen vom Salzspiegel auf:

Westfeld:	110 m
Südfeld:	80 m
Südostfeld:	75 m
Ostfeld:	140 m
Zentralteil:	65 m
Nordfeld:	90 m

Das Westfeld ist mit dem Südfeld durch zwei Strecken auf der 4. Sohle und eine Strecke auf der 3. Sohle verbunden (Abbildung 2-2). Das Südfeld ist mit dem Zentralteil durch 12 Strecken auf allen vier Hauptsohlen und mit dem Grubengebäude Marie durch die zwei nördlichen Richtstrecken auf der 2. und 3. Sohle verbunden. Zum Ostfeld führen vom Zentralteil zwei Ostquerschläge, einer auf der 2. und einer auf der 4. Sohle. Das Nordfeld und der Zentralteil sind auf allen vier Sohlen verbunden. Zwischen Südostfeld und Zentralteil bestehen mehrere Verbindungen, deren Zahl und Lage im Hinblick auf die Langzeitsicherheit jedoch nicht von Bedeutung sind.

Lösungszutritte in Grubenbaue der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie werden an einzelnen Orten beobachtet [BGR 1998d]. Der einzige Lösungszutritt, der als solcher aus dem Hutgestein interpretiert wird, ist jener in das Lager H des Grubengebäudes Marie, wo das Kaliflöz Staßfurt bis etwa 40 m unter den Salzspiegel abgebaut wurde. Der Durchschnittswert der Zutrittsrate der letzten 25 Jahre beträgt hier rund  $15 \text{ m}^3$  pro Jahr. Die übrigen Lösungszutritte werden als solche aus Restlösungsreservoirs im Zechstein interpretiert. Sie befinden sich im Abbau 1A auf der ersten Sohle des Zentralteils, in der Abbaustrecke 5 auf der ersten Sohle im Nordfeld (Grubengebäude Bartensleben) sowie in der Bunten Firste und im Bremsbergfuß im Grubengebäude Marie. Das langjährige Mittel der Zutrittsrate in den Abbau 1A beträgt  $1,8 \text{ m}^3/\text{a}$ , die Zutrittsraten an den anderen Stellen sind deutlich geringer.

### 2.3.2 Einlagerungsorte

Die Einlagerungsorte der radioaktiven Abfälle befinden sich in der Grube Bartensleben im Westfeld, im Südfeld, im Ostfeld, im Zentralteil und im Nordfeld. Abbildung 2-3 zeigt die Einlagerungsorte in einer Darstellung der Grubenbaue auf der 4. Sohle, der 4a-Sohle (-346-m-Sohle) und der 5a-Sohle (-395-m-Sohle).

Im Westfeld sind die radioaktiven Abfälle in den Abbauen 1, 2/3, 4/5, der nördlichen Richtstrecke sowie dem Westgesenk auf der 4. Sohle eingelagert. Die Einlagerungshohlräume im Westfeld sind weitgehend mit Abfällen gefüllt.

Die Einlagerungsorte des Südfeldes sind die Abbaue 1, 2 und 3 auf dem Niveau der 5a-Sohle. Die Volumenanteile der Abfälle in diesen Einlagerungskammern betragen im Mittel etwa 10 % des jeweiligen ursprünglich aufgefahrenen Kammervolumens. Die Resthohlräume sind mit Salzgrus und Braunkohlenfilterasche verfüllt.

Im Ostfeld befinden sich die Abfälle im Abbau 2 auf der 4. Sohle. Die Abfallgebände sind in drei Ebenen gestapelt, die Stapel Ebenen sind durch Salzgruslagen voneinander getrennt. In einem Sohlenbohrloch, das aus einem speziell aufgefahrenen Streckenstummel am östlichen Ende des Hauptquerschlags auf der 4. Sohle abgeteuft wurde, ist zudem ein zylindrischer Betonbehälter mit Radiumabfällen (Radium-VBA) gelagert. Das Sohlenbohrloch ist mit einer verlorenen Schalung aus Betonringen ausgebaut, welche gegen den Gebirgsdruck ausgelegt ist. Der Streckenstummel befindet sich im intakten Steinsalz und wird im Zuge der Verfüllung des Ostfeldes bis auf Firstniveau des Ostquerschlags mit Salzbeton verfüllt.

# NORDFELD

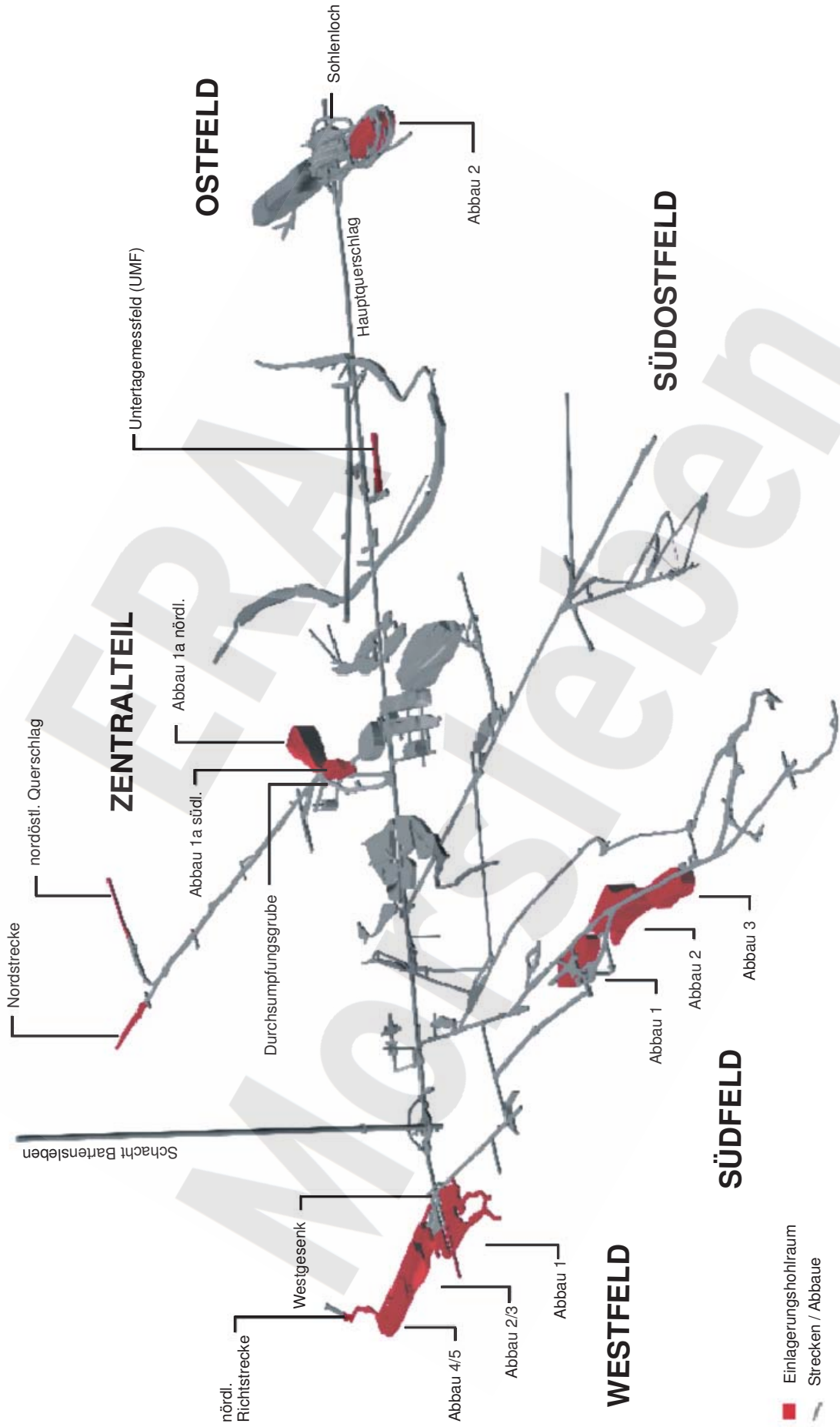


Abbildung 2-3: Einlagerungshohlräume auf der 4. Sohle (-372 mNN), der 4a-Sohle (-346 mNN), der 5a-Sohle (-395 mNN).

Geringe Mengen an radioaktiven Abfällen wurden in die Abbaue 1a südlich und 1a nördlich des Zentralteils auf der 4a-Sohle sowie in die Durchsumpfungsrube in der Nordstrecke des Zentralteils auf der 4. Sohle verbracht. Im Untertage-Messfeld (UMF) auf der 4. Sohle südlich des Hauptquerschlags zwischen Zentralteil und Ostfeld sind in zwei Sohlenbohrlöchern zudem sieben Spezialcontainer mit überwiegend <sup>60</sup>Co-Strahlenquellen gelagert.

Im Nordfeld sind radioaktive Abfälle in den Endbereichen der Nordstrecke und des nordöstlichen Querschlags auf der 4. Sohle endgelagert. Beide Einlagerungshohlräume sind weitgehend mit Abfällen gefüllt, sie wurden mit Mauern gegen die übrige Grube abgeschlossen.

Die Volumen der in die verschiedenen Einlagerungshohlräume eingelagerten radioaktiven Abfälle sind in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tabelle 2-1: Volumen der in die verschiedenen Einlagerungshohlräume eingelagerten radioaktiven Abfälle.

Einlagerungs- bereich	Sohle	Einlagerungshohlraum	Abfallvolumen in m <sup>3</sup>
Westfeld	4	Abbau 1, 2/3 (Westfeld 2)	12 327
Westfeld	4	Abbau 4/5 (Westfeld 1), nördliche Richtstrecke	6 249
Westfeld	4	Westgesenk	61
Südfeld	5a	Abbau 1	1 013
Südfeld	5a	Abbau 2	1 498
Südfeld	5a	Abbau 3	7 608
Ostfeld	4	Abbau 2 und Streckenstummel	6 140
Zentralteil	4a	Abbaue 1a südlich und 1a nördlich	133
Zentralteil	4	Durchsumpfungsrube	24
Zentralteil	4	UMF Sohlenbohrlöcher	ca. 0,03
Nordfeld	4	Enden Nordstrecke und nordöstlicher Querschlag	1 701

### 2.3.3 Eingelagerte Abfälle

Im ERAM sind niedrig- und mittelradioaktive Abfälle mit überwiegend kurzlebigen Radionukliden aus

- dem Betrieb von Kernkraftwerken,
- der Stilllegung von kerntechnischen Anlagen,
- der kerntechnischen Industrie,
- Forschungseinrichtungen,
- Landessammelstellen bzw. direkt von Kleinverursachern und



- dem Umgang sonstiger Anwender (z. B. Bundeswehr)

endgelagert. Weiterhin sind bereits radioaktive Betriebsabfälle des ERAM endgelagert worden. Auch die während der Stilllegung des ERAM noch anfallenden radioaktiven Betriebsabfälle verbleiben im ERAM.

Die endgelagerten festen radioaktiven Abfälle sind in der Regel in standardisierten Behältern, z. B. 200-l- bis 570-l-Fässern und zylindrischen Betonbehältern, verpackt. Die Abfälle wurden überwiegend verpresst oder zementiert, weniger häufig auch in Bitumen konditioniert. Bestimmte Abfälle, wie z. B. sperrige Abfälle oder Filter, sind in Sonderverpackungen endgelagert. Zu einem geringen Teil sind die Abfälle unverpackt. Weiterhin wurden flüssige radioaktive Abfälle endgelagert. Einen detaillierteren Überblick über die endgelagerten radioaktiven Abfälle gibt [BfS 2007d], weitere Angaben enthalten die dort zitierten Berichte.

Je nach Beschaffenheit des Abfalls wurden verschiedene Einlagerungstechniken angewendet. Die wichtigsten sind:

- Niedrigradioaktive feste Abfälle wurden in Fässern oder in zylindrischen Betonbehältern in Einlagerungshohlräumen auf der 4. Sohle gestapelt.
- Niedrig- und mittelradioaktive feste Abfälle sowie umschlossene Strahlenquellen wurden im Südfeld von der 4. Sohle aus in darunter liegende Abbaue der 5a-Sohle verstrützt.
- Ebenfalls im Südfeld wurden von der 4. Sohle aus niedrigradioaktive flüssige Abfälle in die Abbaue 2 und 3 eingebracht und mit Braunkohlefilterasche verfestigt. Die gleiche Technik kam auch in der Durchsumpfungsrube des Zentralteils zur Anwendung.
- Umschlossene Strahlenquellen und geringe Mengen fester mittelradioaktiver Abfälle wurden in Spezialcontainern (Stahlzylinder) in Sohlenbohrlöchern im UMF eingelagert.
- In einem Sohlenbohrloch, das aus einem speziell aufgefahrenen Streckenstummel im Ostfeld abgeteuft wurde, lagert ein 280-l-Fass mit <sup>226</sup>Ra-Abfällen in einem Betonbehälter (Radium-VBA).

Es wurden 8 258 m<sup>3</sup> Abfall flüssig eingebracht und am Einlagerungsort mit Braunkohlefilterasche (BFA) verfestigt. Dazu wurden anfangs Abfall und BFA vor der Ablagerung in einer Mischschnecke vermengt (Mischschneckenverfahren), und später wurde der Abfall über eine zuvor eingebrachte Schicht BFA versprüht (Durchsumpfungungsverfahren).

Im ERAM sind insgesamt 36 754 m<sup>3</sup> niedrig- und mittelradioaktive Abfälle und einige 100 m<sup>3</sup> Betriebsabfälle des Endlagers eingelagert. Die Gesamtaktivität der eingelagerten radioaktiven Abfälle beträgt weniger als 6·10<sup>14</sup> Bq, die Aktivität der Alpha-Strahler liegt in der Größenordnung von 10<sup>11</sup> Bq (per 30.06.2005).

Das radionuklidspezifische Inventar der Abfälle, differenziert nach dem Ort der Einlagerung, enthält Tabelle 2-2.

Das Gefährdungspotenzial der Radionuklide in den eingelagerten Abfällen lässt sich durch einen Toxizitätsindikator TI charakterisieren, der sich durch das Radionuklidinventar und die Dosiskoeffizienten für Ingestion der einzelnen Radionuklide<sup>3</sup> ergibt. Durch die Dosiskoeffizienten werden die Aktivitätsinventare der verschiedenen Radionuklide entsprechend ihrer radiologischen Auswirkung bei einer hypothetischen Aufnahme durch einen Menschen mit der Nahrung gewichtet. Der Toxizitätsindikator TI bewertet lediglich den Abfall und berücksichtigt nicht die Einschlussfunktion des Endlagers, d. h. die Wirksamkeit von dessen Barriersystem. Der Toxizitätsindikator TI der im ERAM eingelagerten Abfälle, die Beiträge der dominierenden Radionuklide sowie ihre zeitliche Entwicklung sind in der Abbildung 2-4 wiedergegeben.

<sup>3</sup> einschließlich ihrer nicht in der Tabelle 2-2 aufgeführten, d. h. explizit berücksichtigten kurzlebigen Zerfallsprodukte (z. B. enthält der Beitrag von <sup>210</sup>Pb jenen von <sup>210</sup>Po)

Tabelle 2-2: Inventar der potenziell langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide sowie von  $^3\text{H}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  und  $^{137}\text{Cs}$  in den Abfällen an den verschiedenen Einlagerungsorten, angegeben als Aktivität in Bq, bezogen auf den 30.06.2005. ([BfS 2007d] und dort zitierte Literatur).

Radio-nuklid	Aktivitätsinventar in Bq						
	Westfeld	Südfeld	Ostfeld	Zentralteil <sup>†</sup>	UMF	Nordfeld	Gesamt
$^3\text{H}$	$1,2 \cdot 10^{12}$	$7,6 \cdot 10^{11}$	$1,0 \cdot 10^{11}$	$7,7 \cdot 10^8$	0	$1,1 \cdot 10^{12}$	$3,2 \cdot 10^{12}$
$^{14}\text{C}$	$7,7 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^{12}$	$1,2 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^9$	0	$5,8 \cdot 10^{10}$	$3,4 \cdot 10^{12}$
$^{36}\text{Cl}$	$2,2 \cdot 10^9$	$7,7 \cdot 10^8$	$8,3 \cdot 10^8$	$5,2 \cdot 10^6$	0	$1,7 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^9$
$^{41}\text{Ca}$	$3,7 \cdot 10^7$	$3,0 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^6$	$4,8 \cdot 10^4$	0	$2,4 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^7$
$^{60}\text{Co}$	$2,6 \cdot 10^{12}$	$8,4 \cdot 10^{12}$	$2,4 \cdot 10^{12}$	$3,0 \cdot 10^{12}$	$2,3 \cdot 10^{14}$	$9,2 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{14}$
$^{59}\text{Ni}$	$3,7 \cdot 10^{10}$	$8,9 \cdot 10^{10}$	$4,9 \cdot 10^{10}$	$2,1 \cdot 10^8$	0	$3,8 \cdot 10^8$	$1,8 \cdot 10^{11}$
$^{63}\text{Ni}$	$2,3 \cdot 10^{12}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$2,8 \cdot 10^{12}$	$1,7 \cdot 10^{10}$	0	$1,2 \cdot 10^{10}$	$1,8 \cdot 10^{13}$
$^{79}\text{Se}$	$3,9 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^8$	$2,5 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^5$	0	$6,4 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^8$
$^{87}\text{Rb}$	$1,8 \cdot 10^7$	$4,6 \cdot 10^3$	$8,2 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^5$	0	$1,2 \cdot 10^6$	$2,8 \cdot 10^7$
$^{90}\text{Sr}$	$2,2 \cdot 10^{12}$	$3,3 \cdot 10^{12}$	$4,1 \cdot 10^{11}$	$1,2 \cdot 10^9$	0	$9,3 \cdot 10^9$	$5,9 \cdot 10^{12}$
$^{93}\text{Zr}$	$4,4 \cdot 10^9$	$4,1 \cdot 10^9$	$7,9 \cdot 10^8$	$6,3 \cdot 10^6$	0	$2,7 \cdot 10^6$	$9,3 \cdot 10^9$
$^{94}\text{Nb}$	$9,4 \cdot 10^9$	$8,2 \cdot 10^9$	$9,5 \cdot 10^9$	$3,5 \cdot 10^7$	0	$8,5 \cdot 10^7$	$2,7 \cdot 10^{10}$
$^{93}\text{Mo}$	$1,4 \cdot 10^8$	$8,7 \cdot 10^7$	$2,2 \cdot 10^7$	$4,3 \cdot 10^5$	0	$1,4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^8$
$^{99}\text{Tc}$	$3,0 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^{10}$	$2,7 \cdot 10^{10}$	$2,2 \cdot 10^8$	0	$8,3 \cdot 10^8$	$1,0 \cdot 10^{11}$
$^{107}\text{Pd}$	$5,4 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^4$	0	$4,1 \cdot 10^3$	$6,7 \cdot 10^7$
$^{126}\text{Sn}$	$9,0 \cdot 10^7$	$1,0 \cdot 10^8$	$5,0 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^5$	0	$7,4 \cdot 10^5$	$2,4 \cdot 10^8$
$^{129}\text{I}$	$2,0 \cdot 10^8$	$9,1 \cdot 10^6$	$8,6 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^4$	0	$6,7 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^8$
$^{135}\text{Cs}$	$5,5 \cdot 10^7$	$2,6 \cdot 10^8$	$5,7 \cdot 10^7$	$3,8 \cdot 10^5$	0	$8,4 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^8$
$^{137}\text{Cs}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$5,9 \cdot 10^{13}$	$4,9 \cdot 10^{12}$	$1,6 \cdot 10^{11}$	$6,1 \cdot 10^{13}$	$5,6 \cdot 10^{11}$	$1,4 \cdot 10^{14}$
$^{151}\text{Sm}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	$8,1 \cdot 10^{10}$	$4,7 \cdot 10^{10}$	$1,2 \cdot 10^8$	0	$4,5 \cdot 10^8$	$2,7 \cdot 10^{11}$
$^{248}\text{Cm}$	$2,2 \cdot 10^7$	0	$3,4 \cdot 10^2$	0	0	0	$2,2 \cdot 10^7$
$^{244}\text{Pu}$	$2,0 \cdot 10^4$	$<3 \cdot 10^0$	$7,8 \cdot 10^2$	$<2 \cdot 10^0$	0	$<1 \cdot 10^0$	$2,1 \cdot 10^4$
$^{244}\text{Cm}$	$4,0 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^9$	$4,4 \cdot 10^5$	0	$1,8 \cdot 10^6$	$6,6 \cdot 10^9$
$^{240}\text{Pu}$	$6,2 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^9$	$2,3 \cdot 10^6$	0	$9,5 \cdot 10^6$	$6,5 \cdot 10^{10}$
$^{236}\text{U}$	$1,1 \cdot 10^7$	$8,2 \cdot 10^6$	$3,0 \cdot 10^7$	$1,9 \cdot 10^4$	0	$7,4 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^7$
$^{232}\text{Th}$	$4,6 \cdot 10^6$	$3,8 \cdot 10^5$	$8,0 \cdot 10^5$	0	0	0	$5,8 \cdot 10^6$
$^{228}\text{Ra}$	$5,7 \cdot 10^6$	$8,2 \cdot 10^8$	$5,6 \cdot 10^5$	0	0	0	$8,3 \cdot 10^8$
$^{228}\text{Th}$	$5,1 \cdot 10^7$	$1,2 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^6$	$1,7 \cdot 10^3$	0	$6,1 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^9$
$^{245}\text{Cm}$	$1,4 \cdot 10^6$	$5,0 \cdot 10^5$	$3,6 \cdot 10^5$	$1,9 \cdot 10^2$	0	$8,3 \cdot 10^2$	$2,3 \cdot 10^6$
$^{241}\text{Pu}$	$9,4 \cdot 10^{11}$	$2,9 \cdot 10^{11}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$1,6 \cdot 10^8$	0	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{12}$
$^{241}\text{Am}$	$1,1 \cdot 10^{11}$	$9,4 \cdot 10^{10}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	$2,3 \cdot 10^7$	0	$5,8 \cdot 10^8$	$2,2 \cdot 10^{11}$
$^{237}\text{Np}$	$1,6 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^7$	$5,4 \cdot 10^7$	$3,1 \cdot 10^4$	0	$1,2 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^7$
$^{233}\text{U}$	$4,0 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^3$	$9,6 \cdot 10^5$	$4,6 \cdot 10^3$	0	$2,0 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^6$
$^{229}\text{Th}$	$3,8 \cdot 10^5$	$2,7 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^3$	0	$2,0 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^5$



Radio-nuklid	Aktivitätsinventar in Bq						
	Westfeld	Südfeld	Ostfeld	Zentralteil <sup>‡</sup>	UMF	Nordfeld	Gesamt
<sup>246</sup> Cm	2,5·10 <sup>6</sup>	1,2·10 <sup>5</sup>	6,9·10 <sup>4</sup>	3,0·10 <sup>0</sup>	0	0	2,7·10 <sup>6</sup>
<sup>242</sup> Pu	6,6·10 <sup>7</sup>	1,7·10 <sup>7</sup>	3,5·10 <sup>7</sup>	2,9·10 <sup>4</sup>	0	1,3·10 <sup>5</sup>	1,2·10 <sup>8</sup>
<sup>238</sup> U	3,1·10 <sup>8</sup>	2,0·10 <sup>7</sup>	1,0·10 <sup>8</sup>	3,4·10 <sup>4</sup>	0	1,3·10 <sup>5</sup>	4,3·10 <sup>8</sup>
<sup>234</sup> U	7,4·10 <sup>8</sup>	7,2·10 <sup>7</sup>	3,2·10 <sup>8</sup>	7,5·10 <sup>4</sup>	0	3,0·10 <sup>5</sup>	1,1·10 <sup>9</sup>
<sup>230</sup> Th	6,2·10 <sup>5</sup>	6,9·10 <sup>5</sup>	4,1·10 <sup>5</sup>	9,4·10 <sup>0</sup>	0	3,8·10 <sup>1</sup>	1,7·10 <sup>6</sup>
<sup>226</sup> Ra	1,2·10 <sup>10</sup>	1,1·10 <sup>10</sup>	3,7·10 <sup>11</sup> §	0	0	0	3,9·10 <sup>11</sup> §
<sup>210</sup> Pb	1,1·10 <sup>8</sup>	1,7·10 <sup>7</sup>	2,7·10 <sup>6</sup>	0	0	0	1,3·10 <sup>8</sup>
<sup>247</sup> Cm	2,6·10 <sup>4</sup>	0	3,4·10 <sup>2</sup>	0	0	0	2,6·10 <sup>4</sup>
<sup>243</sup> Am	5,9·10 <sup>7</sup>	2,2·10 <sup>7</sup>	1,4·10 <sup>7</sup>	8,9·10 <sup>3</sup>	0	3,5·10 <sup>4</sup>	9,5·10 <sup>7</sup>
<sup>239</sup> Pu	6,5·10 <sup>10</sup>	1,1·10 <sup>9</sup>	1,7·10 <sup>9</sup>	1,9·10 <sup>6</sup>	0	8,4·10 <sup>6</sup>	6,8·10 <sup>10</sup>
<sup>235</sup> U	6,0·10 <sup>7</sup>	2,0·10 <sup>6</sup>	2,0·10 <sup>7</sup>	8,5·10 <sup>3</sup>	0	3,7·10 <sup>4</sup>	8,2·10 <sup>7</sup>
<sup>231</sup> Pa	1,5·10 <sup>6</sup>	4,8·10 <sup>4</sup>	3,9·10 <sup>4</sup>	2,5·10 <sup>0</sup>	0	1,1·10 <sup>1</sup>	1,6·10 <sup>6</sup>
<sup>227</sup> Ac	7,6·10 <sup>6</sup>	1,3·10 <sup>4</sup>	2,0·10 <sup>4</sup>	0	0	0	7,6·10 <sup>6</sup>

‡ ohne UMF

§ Die Radium-VBA weist ein <sup>226</sup>Ra-Inventar von 3,7·10<sup>11</sup> Bq auf. Das <sup>226</sup>Ra-Inventar der übrigen Abfälle im Ostfeld beträgt 1,0·10<sup>7</sup> Bq.

Zu frühen Zeitpunkten ( $t < 100$  a) bestimmen die Radionuklide <sup>137</sup>Cs, <sup>60</sup>Co und <sup>210</sup>Pb die Höhe des Toxizitätsindicators, von ca. 100 a bis ca. 4 000 a <sup>226</sup>Ra und <sup>210</sup>Pb, während zu späteren Zeitpunkten ( $t > 10 000$  a) die Radionuklide <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu und <sup>210</sup>Pb (letzteres aus dem Zerfall von <sup>234</sup>U) maßgeblich sind. Der Toxizitätsindikator für die im ERAM eingelagerten Abfälle verringert sich in den ersten 10 000 Jahren um den Faktor 100 auf etwas mehr als 1% des Werts per 30.06.2005.

In der Abbildung 2-5 sind die Toxizitätsindikatoren TI der Abfälle und deren zeitliche Entwicklungen für die einzelnen Einlagerungsbereiche wiedergegeben. Die Abbildung zeigt, dass die Abfälle im Nordfeld und im Zentralteil (ohne UMF) einen geringen Anteil der eingelagerten Toxizität aufweisen und dass dieser Anteil mit der Zeit noch abnimmt. Die anfängliche (auf den 30.06.2005 bezogene) Toxizität der Abfälle im UMF ist hoch, sie übersteigt jene aller anderen Einlagerungsbereiche. Die UMF-Abfälle enthalten jedoch nur kurzlebige Radionuklide, so dass die Toxizität innerhalb weniger 100 Jahre auf einen sehr geringen Wert abfällt.

Ab einigen 10 Jahren und bis rund 10 000 Jahren wird die Toxizität der Abfälle im ERAM durch die Radium-VBA im Ostfeld dominiert, die gesondert in einem Sohlenbohrloch in einem speziell aufgefahrenen Streckenstummel eingelagert ist (vgl. Kapitel 2.3.2). Die Toxizität dieses Abfalls steigt in den kommenden Dekaden noch um rund einen Faktor 6 an, da durch radioaktiven Zerfall das Inventar des Zerfallsprodukts <sup>210</sup>Pb, welches einen hohen Dosiskoeffizienten aufweist, noch anwächst (Abbildung 2-4). Erst mit dem Zerfall des Mutternuklids <sup>226</sup>Ra sinkt die Toxizität der Radium-VBA auf geringe Werte ab. Danach, ab etwa 10 000 Jahren, dominieren die Abfälle im Westfeld. Die Toxizität der Abfälle im Einlagerungsbereich Ostfeld (ohne Radium-VBA) ist bis rund 10 000 Jahre deutlich geringer als jene der Abfälle im Westfeld und auch als jene der Abfälle im Südfeld. Ab knapp 20 000 Jahre übersteigt sie die Toxizität der Abfälle im Südfeld, bleibt aber bis zum Ende des Betrachtungszeitraums unterhalb der Toxizität der Abfälle im Westfeld.

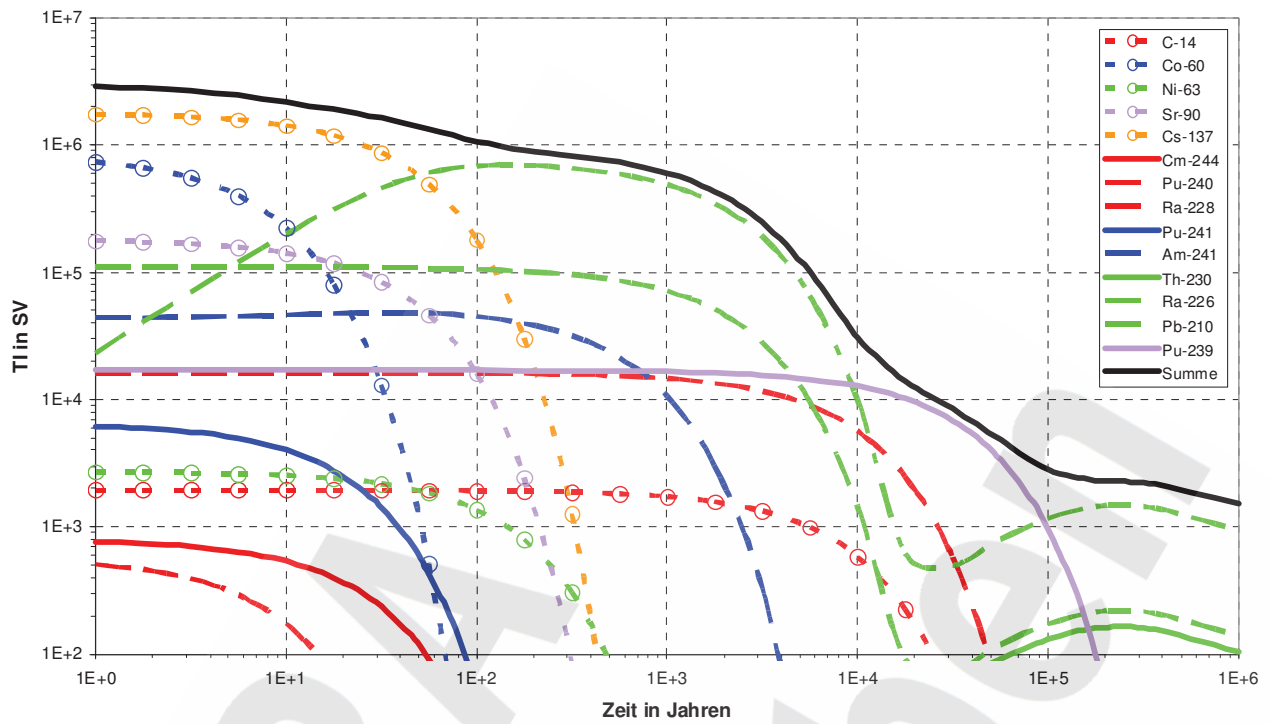


Abbildung 2-4: Toxizitätsindikator TI der im ERAM eingelagerten radioaktiven Abfälle und maßgebliche Radionuklide als Funktion der Zeit.

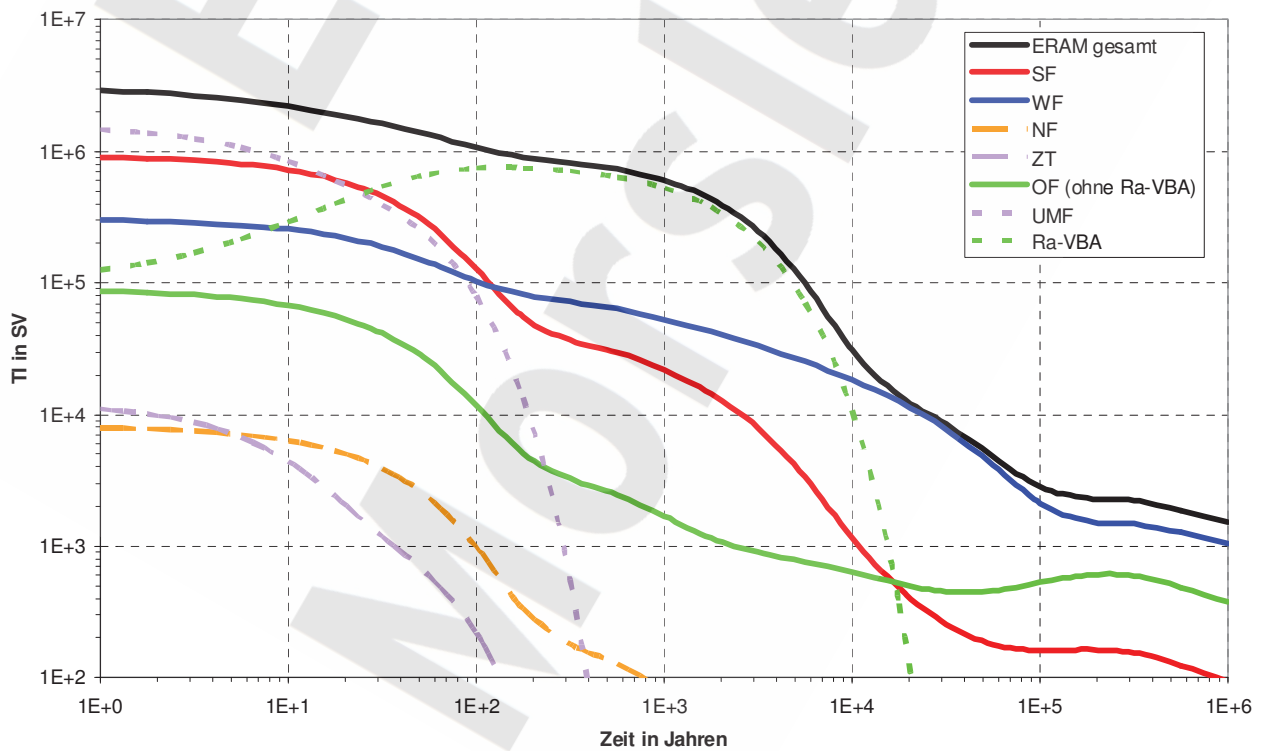


Abbildung 2-5: Toxizitätsindikator TI der in den einzelnen Einlagerungsbereichen eingelagerten Abfälle als Funktion der Zeit im Vergleich.

## 2.4 GEBIRGSMECHANISCHE VERHÄLTNISSE

Die beiden Grubengebäude der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie bilden ein Schweben-/Pfeilersystem mit geringen Konvergenzraten der Abbaue. Ursache dafür ist die enge und steilstehende interne Faltung des Zechsteins mit großem Anteil von Hauptanhydrit sowie das mächtige Hutgestein. Das Hutgestein, der Hauptanhydrit sowie die Anhydrite des Anhydritmittelsalzes weisen bis zum Bruch fast ausschließlich elastisches Materialverhalten auf, während die eigentlichen Salzgesteine (Steinsalz, Kalisalz) durch ausgeprägtes zeitabhängiges Verformungsverhalten gekennzeichnet sind. Im Gebirge hat sich seit Einstellung des Bergbaubetriebs ein zeitlich nahezu konstanter Spannungszustand mit den erwähnten geringen Konvergenzraten der Abbaue eingestellt.

Örtlich ist das Steinsalz in den Schweben und Pfeilern zwischen Grubenbauen gebirgsmechanisch stark beansprucht. Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit ist eine wesentliche Folge, dass innerhalb der Grubenfelder zwischen den Abbauen hydraulische Wegsamkeiten bestehen oder zu unterstellen sind. Dies ist insbesondere im Südfeld, im Zentralteil und im Nordfeld der Fall. Messungen und Modellrechnungen zeigen jedoch, dass das Salzgebirge sowohl zwischen dem Südfeld und dem Zentralteil als auch zwischen dem Zentralteil und dem Ostfeld gebirgsmechanisch nur begrenzt, deutlich unterhalb der Dilatanzgrenze, beansprucht ist und – abgesehen von eventuellen hydraulischen Wegsamkeiten entlang des Hauptanhydrit zum Ostfeld – als hydraulisch dicht einzustufen ist [BGR 2000c].

Die Steinsalz-Barriere zwischen den Grubengebäuden und dem Salzspiegel ist nachweislich an einer Stelle gestört (Lager H im Grubengebäude Marie, vgl. Kapitel 2.3.1). Diese Verletzung der Steinsalz-Barriere wird als geogene Störung im Salinar infolge starker salztektonischer Beanspruchung interpretiert [BGR 2002]. Langfristig und ohne Ergreifen von Maßnahmen, d. h. wenn die Grubengebäude im jetzigen Zustand belassen würden, wären an anderen Stellen zwischen hoch liegenden Abbauen und dem Salzspiegel bergbaubedingte Verformungen des Gebirges mit Desintegration der Steinsalz-Barriere möglich, so dass es auch dort zu hydraulischen Wegsamkeiten kommen könnte [BGR 1999a]. Mit den vorgesehenen Maßnahmen zum Verfüllen der Grubenbaue (vgl. Kapitel 3.3.2) werden solche Verformungen ausgeschlossen. Gleichzeitig stoppen sie die weitere Ausdehnung der Auflockerungszonen zwischen Abbauen und Hauptanhydritschollen und unterstützen deren Rückbildung. [BGR 2002] kommt zu folgendem Fazit: *Das verfüllte Grubenfeld Bartensleben ist potenziell ausschließlich durch Deckgebirgsässer, deren Fließwege vom Hutgestein über den Hauptanhydrit an der Westflanke der Hauptmulde führen, gefährdet. Im Grubenfeld Marie kommen dazu noch die Gefährdungen über nicht ausschließbare geogene Wegsamkeiten im Salz in einigen exponierten Auffahrungen, zu denen auch das aktuelle Salzlösungsvorkommen im Lagerteil H gehört.*

Die Konvergenzraten der Abbaue in den verschiedenen Grubenfeldern sind zwar unterschiedlich, jedoch durchweg sehr gering und liegen heute – angegeben als relative Volumenkonvergenzrate unverfüllter Hohlräume – im Bereich von rund 0,004 % bis etwa 0,055 % pro Jahr. Die Werte wurden einerseits an verschiedenen Orten im Grubengebäude mit Verformungsmessungen erhoben und andererseits durch gebirgsmechanische Modellrechnungen nachvollzogen und dadurch zu einem Gesamtbild der gebirgsmechanischen Verhältnisse im Grubengebäude zusammengefügt [BGR 2001a]. Die geomechanischen Modelle basieren auf den geologischen Gegebenheiten, der Geometrie der Grubenbaue und den ermittelten geomechanischen Daten aus den durchgeführten Labormessungen und In-situ-Messungen im Rahmen von Erkundungsprogrammen. Sie bilden die Verhältnisse im Jahr 2000 ab und gelten damit für das unverfüllte Grubengebäude.

Tieferegehende Darstellungen der gebirgsmechanischen Verhältnisse am Standort und insbesondere der für den Nachweis der Langzeitsicherheit wichtigen Integrität der Steinsalz-Barriere um die Grubenfelder Westfeld, Südfeld und Ostfeld sowie der Konvergenzraten finden sich in [BGR 2000c], [BGR 2001a] und [BGR 2001b].

## 3 SICHERHEITS-, VERSCHLUSS- UND NACHWEISKONZEPT

### 3.1 SCHUTZZIELE

Aus dem „Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle“<sup>4</sup> vom 5. September 1997, den Empfehlungen der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEA), insbesondere [IAEA 2006], und den Empfehlungen der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) ergeben sich folgende Sicherheitsprinzipien im Hinblick auf die radiologische Sicherheit eines Endlagers<sup>5</sup>, die bei der Planung und Realisierung eines Endlagers zu befolgen sind:

- Radioaktive Abfälle müssen so gehandhabt und eingelagert werden, dass Mensch und Umwelt in allen Phasen der Endlagerentwicklung geschützt sind.
- Die Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen hat die Isolation<sup>6</sup> der radioaktiven Abfälle im Endlagersystem über lange Zeiten sicherzustellen, um damit
  - langfristig Mensch und Umwelt vor den potenziell schädlichen Auswirkungen der eingelagerten radioaktiven Abfälle zu schützen und
  - zu verhindern, dass zukünftigen Generationen unzumutbare Lasten und Verpflichtungen auferlegt werden. Insbesondere darf sich die Sicherheit des Endlagers in der Phase nach Verschluss des Endlagers nicht auf aktive Maßnahmen nach dem Verschluss abstützen.
- Die aus der dauerhaften Aufbewahrung resultierenden potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt dürfen auch in Zukunft das Maß heute akzeptierter Auswirkungen nicht übersteigen.
- Die potenziellen Auswirkungen für Mensch und Umwelt aus der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland dürfen außerhalb der Grenzen Deutschlands nicht größer sein als innerhalb zulässig.
- Jede Strahlenexposition und Kontamination von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung des Standes von Wissenschaft und Technik und unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls auch unterhalb der Grenzwerte so gering wie möglich zu halten.
- Die aus der dauerhaften Aufbewahrung resultierende Strahlenexposition für Mensch und Umwelt soll im Vergleich zur natürlichen Strahlung niedrig sein.
- Die erforderlichen Sicherheitsnachweise sind nach dem Stand von Wissenschaft und Technik zu führen.

In Deutschland sind die Schutzziele für ein Endlager für radioaktive Abfälle in den *Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk* festgelegt, die vom damals zuständigen Bundesinnenminister (BMI) am 20.04.1983 per Rundschreiben veröffentlicht wurden [BMI 1983]. Diese Sicherheitskriterien enthalten – mindestens im Grundsatz – sämtliche der oben aufgeführten Sicherheitsprinzipien. Die Schutzziele sind in Punkt 2 der Sicherheitskriterien wie folgt formuliert:

*Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in Bergwerken soll den Schutz von Mensch und Umwelt vor der Schädigung durch ionisierende Strahlung dieser Abfälle gewährleisten. Um diese Schutzziele zu erreichen, sind bestimmte Anforderungen einzuhalten.*

*Die für den Betrieb eines Endlagerbergwerkes geltenden Schutzziele werden durch das Atomgesetz und die Strahlenschutzverordnung vorgegeben. Darüber hinaus sind alle übrigen einschlägigen Vorschriften zu beachten.*

---

<sup>4</sup> Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management

<sup>5</sup> in nicht offizieller, zusammenfassender Formulierung

<sup>6</sup> Der Begriff „Isolation“ hat im Sinne der Sicherheitsprinzipien nicht die Bedeutung eines vollständigen Einschlusses, der auch kleinste Freisetzungen von Radionukliden ausschließt. Isolation bedeutet im Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle, den Transport radioaktiver Stoffe so zu behindern, dass die vorgegebenen Schutzziele innerhalb des Nachweiszeitraums eingehalten werden.



*Nach Beendigung der Betriebsphase muß das gesamte Endlager sicher gegen die Biosphäre abgeschlossen werden. Auch nach der Stilllegung dürfen Radionuklide, die als Folge von nicht vollständig ausschließbaren Transportvorgängen aus einem verschlossenen Endlager in die Biosphäre gelangen könnten, nicht zu Individualdosen führen, die die Werte des §45 (heute § 47, Anm. der Autoren) der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) überschreiten.*

Die einzuhaltenden Anforderungen sind in den Kapiteln 3 bis 10 der Sicherheitskriterien konkretisiert [BMI 1983].

Der in § 47 der StrlSchV angeführte Wert für die effektive Dosis beträgt 0,3 mSv pro Jahr. Dieser Wert für das quantitative Schutzziel ist ein Bruchteil der mittleren effektiven Dosis, die die Bevölkerung der Bundesrepublik Deutschland aufgrund der natürlichen Umweltradioaktivität und aufgrund zivilisatorisch bedingter Strahlenexpositionen aufnimmt. Diese beträgt als Folge von natürlichen Strahlenexpositionen im Mittel ca. 2,1 mSv pro Jahr und als Folge von zivilisatorisch bedingten Strahlenexpositionen (zum überwiegenden Teil durch die Anwendung radioaktiver Stoffe und ionisierender Strahlen in der Medizin) im Mittel ca. 1,8 mSv pro Jahr, insgesamt also rund 4 mSv pro Jahr [BMU 2006].

Für die Bewertung der Langzeitsicherheit des ERAM wird als quantitatives radiologisches Schutzziel für den Menschen der Wert von 0,3 mSv pro Jahr für die effektive Dosis entsprechend § 47 StrlSchV herangezogen. Dieser Wert ist in Übereinstimmung mit jüngeren Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) [ICRP 2000] und der IAEA [IAEA 2006]. So empfiehlt [ICRP 2000] zur Bewertung der radiologischen Auswirkungen der Endlagerung radioaktiver Abfälle als Maßstab eine Individualdosis von 0,3 mSv pro Jahr oder ein entsprechendes Risikoäquivalent.

Die möglichen künftigen radiologischen Auswirkungen des ERAM werden mit Modellrechnungen ermittelt. Diese unterstellen jeweils eine der möglichen zukünftigen Entwicklungen des Systems und decken eine Zeitspanne bis weit in die Zukunft ab. Jede der mit einer Modellrechnung analysierten möglichen künftigen Entwicklungen ist unvermeidlich mit Ungewissheiten verbunden. Diese betreffen einerseits die Verhältnisse im Untergrund, andererseits und insbesondere aber auch die künftigen Veränderungen an der Geländeoberfläche und die Lebensgewohnheiten der Menschen, die in der Zukunft in der Umgebung des ERAM leben werden. Es entspricht deshalb international anerkanntem Vorgehen, die mit Modellrechnungen ermittelten künftigen Auswirkungen als Indikatoren für die Bewertung der Langzeitsicherheit und nicht als eigentliche Prognose der tatsächlichen künftigen Strahlenexposition einzustufen. Dazu ist die Strahlenexposition für einen durchschnittlichen Angehörigen einer Personengruppe zu ermitteln, für die angenommen wird, dass sie am Ort der stärksten Auswirkungen lebt, sich ausschließlich von lokal erzeugten Landwirtschaftsprodukten ernährt und ähnliche Lebensgewohnheiten wie jene der heutigen Gesellschaft hat. Die Verhältnisse an der Geländeoberfläche sind für die Berechnung in Anlehnung an die heutigen Verhältnisse vereinfacht anzusetzen<sup>7</sup>.

Die möglichen zukünftigen Entwicklungen des Systems werden Szenarien genannt. Gewisse Szenarien sind wahrscheinlicher, d. h. sie beschreiben im Rahmen der bestehenden Ungewissheiten mit höherer Plausibilität die tatsächliche künftige Entwicklung des Systems „Endlager Morsleben“, als andere Szenarien. Die Wahrscheinlichkeiten von Szenarien können jedoch nicht quantitativ ermittelt werden, sie lassen sich höchstens auf der Basis von Bewertungen durch Experten qualitativ ansprechen.

Vor diesem Hintergrund haben die Strahlenschutzkommission (SSK) und die Reaktor-Sicherheitskommission (RSK) in ihrer gemeinsamen Stellungnahme aus dem Jahre 2002 im Hinblick auf die Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien empfohlen, als radiologische Schutzziele für ein Endlager nur Richtwerte für die Individualdosis und keine Grenzwerte vorzugeben [RSK/SSK 2002]. Für wahrscheinliche Szenarien schlagen sie einen Dosisrichtwert von 0,1 mSv pro Jahr und für weniger wahrscheinliche Szenarien (Eintrittswahrscheinlichkeit kleiner  $10^{-1}$  während des Betrachtungszeitraums) einen Dosisrichtwert von 1 mSv pro Jahr vor. Eine zusätzliche Bewertung anhand der Kollektivdosis wird von SSK und RSK nicht empfohlen.

---

<sup>7</sup> Das hier umschriebene Vorgehen entspricht der Anwendung von stilisierten Modellen (stylized approach).

Für die Bewertung der Langzeitsicherheit des ERAM wird basierend auf den genannten internationalen Empfehlungen, den deutschen Sicherheitskriterien und den Empfehlungen der SSK und der RSK davon ausgegangen, dass das radiologische Schutzziel eingehalten ist, wenn die als Indikator berechnete maximale Strahlenexposition für alle im Rahmen der praktischen Vernunft denkbaren künftigen Systementwicklungen unter dem Wert des § 47 StrlSchV von 0,3 mSv pro Jahr für die effektive Dosis für eine erwachsene Einzelperson liegt. Zusätzlich werden zur Bewertung auch die in Anlage VII, Teil B StrlSchV genannten Altersgruppen herangezogen. Das von SSK und RSK empfohlene Konzept der Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers anhand eines Richtwertes wird für die Analyse der Langzeitsicherheit des ERAM so interpretiert, dass im Rahmen der durchgeführten probabilistischen Modellrechnungen auch vereinzelte Überschreitungen der Bewertungsgröße von 0,3 mSv/a akzeptiert werden können, wenn 90 % der Ergebnisse mit einem Vertrauensgrad von 90 % unterhalb dieses Wertes liegen.

Für den radiologischen Schutz der Umwelt sind weder in Deutschland noch in internationalen Empfehlungen spezielle Kriterien formuliert. Nach Einschätzung der ICRP ist durch die Kriterien für den Schutz des Menschen auch der Schutz der Umwelt gewährleistet [ICRP 2000].

Zusätzlich zum quantitativen Schutzziel fordern die internationalen Empfehlungen, dass die Auslegung, der Betrieb und der Verschluss eines Endlagers in einem Prozess erfolgen, der in strukturierter Weise die Optimierung der Langzeitsicherheit bewirkt<sup>8</sup> [ICRP 2000], [IAEA 2006]. Die Optimierung erfolgt dabei auf eine im Wesentlichen qualitative Weise unter Berücksichtigung der Schutzziele und der für ihre Einhaltung wesentlichen wissenschaftlich-technischen Grundlagen und Planungs- und Managementprinzipien wie auch anderer, z. B. sozialer und ökonomischer Faktoren.

Ein weiteres Schutzziel betrifft die Gewährleistung der Unterkritikalität: Es ist sicherzustellen, dass sich in der Phase nach Verschluss des Endlagers keine eingelagerten spaltbaren Radionuklide durch Transport- und Akkumulationsprozesse in einer Konfiguration ansammeln können, die zu einer spontanen, sich selbst erhaltenden Kettenreaktion führt.

## 3.2 SICHERHEITSKONZEPT

Die Einhaltung der radiologischen Schutzziele erfordert den Einschluss der mit den Abfällen in das Endlager eingebrachten Radionuklide im Endlager (genauer im einschlusswirksamen Gebirgsbereich des Endlagers) oder wenigstens die Begrenzung ihrer Freisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und in die Biosphäre auf unbedenkliche Raten.

Das Sicherheitskonzept beschreibt und legt fest, in welcher Weise das Gesamtsystem des stillgelegten Endlagers den dauerhaften Einschluss der Radionuklide bzw. die Begrenzung ihrer Freisetzung bewirkt. Das Sicherheitskonzept nennt dazu die maßgebenden Prozesse für die Rückhaltung der Radionuklide, führt die relevanten Eigenschaften am Standort an, bezeichnet die Art der Maßnahmen für das Verfüllen und Verschießen des Endlagers und legt qualitativ deren Ziele fest.

Einleitend werden nachfolgend die sicherheitsrelevanten Prozesse kurz aufgezählt, soweit dies für die Begründung des Sicherheitskonzeptes erforderlich ist. Eine ausführliche Diskussion der für den Nachweis der Langzeitsicherheit zu betrachtenden Prozesse folgt in Kapitel 4.

---

<sup>8</sup> Der hier angesprochene Prozess wird in den internationalen Empfehlungen mit „constrained optimization“ bezeichnet.



### 3.2.1 Mögliche sicherheitsrelevante Prozesse und Standorteigenschaften

Im Hinblick auf das Sicherheitskonzept sind die folgenden Prozesse von potenzieller Bedeutung:

- Konvergenz von unverfüllten oder mit komprimierbarem Versatz verfüllten Hohlräumen des Endlagers, Stützwirkung durch die sich im Versatz aufbauende Spannung und durch den Druck der Fluide in den Hohlräumen (Luft/Gas und ggf. Lösung). Die Konvergenz der Hohlräume des Grubengebäudes führt zu Verformungen in der Salzstruktur und dadurch auch im Deckgebirge.
- Gasbildung durch Korrosion von Metallen, mikrobielle Umsetzung von organischen Stoffen und Radiolyse durch radioaktive Stoffe im Endlager. Gasbildung setzt die Anwesenheit von Wasser bzw. Lösung voraus. Aufgrund der bestehenden Restfeuchte bei den genannten Stoffen setzt die Gasbildung auch ohne den Zutritt von Lösung aus dem Deckgebirge in das Endlager ein.
- Lösungszutritt aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude. Wie in Kapitel 2.3.1 und 2.4 dargelegt wurde, besteht bereits heute ein Lösungszutritt in das Lager H des Grubengebäudes Marie, und die Entstehung von weiteren Lösungszutritten entlang des Hauptanhydrit an der Westflanke der Hauptmulde – auch in das Grubengebäude Bartensleben – während der Phase nach Verschluss des Endlagers kann nicht vollständig ausgeschlossen werden.
- Bei einer zunehmenden Rate des Lösungszutritts (im Vergleich mit der heute geringen Zutrittsrate in das Lager H) ist eine abnehmende Sättigung der zutretenden Lösung an NaCl möglich. In diesem Fall führt der Lösungszutritt zu Auflösungen des Halit im anstehenden Steinsalz oder im Versatz bis zur Sättigung der Lösung. Umlösungen finden in jedem Fall an Kalisalzen statt. Da diese aber nicht großflächig in Grubenbauen aufgeschlossen sind und bei der Umlösung zudem Sperrschichten aus Umlösungsrückständen entstehen können („Inertisierung“), kann nicht überall von einer Umlösung an Kalisalzen bis zur Sättigung (invarianter Punkt IP21 oder sogar IP19 im hexären System) ausgegangen werden. Dadurch werden in der Grube Lösungen mit örtlich unterschiedlicher Zusammensetzung und Dichte entstehen.
- Sofern Lösung in größeren Mengen zu den Abfällen gelangt, können die Schadstoffe aus den Abfällen mobilisiert werden und in die Lösung übertreten. Maßgebende Prozesse sind dabei Diffusion und die Zersetzung der Abfälle. Dabei ändert sich die chemische Zusammensetzung der Lösung in den Einlagerungsgrubenbauen.
- Konvergenz von Hohlräumen und örtliche Akkumulation von gebildetem Gas haben Lösungsbewegungen im Grubengebäude und das Auspressen von Lösung aus der Grube in das Hutgestein/Deckgebirge zur Folge. Dadurch kann auch kontaminierte Lösung in das Hutgestein/Deckgebirge gelangen.
- Die in das Hutgestein/Deckgebirge übergetretene Lösung breitet sich aus, angetrieben einerseits durch die natürliche Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge, andererseits durch den hydraulischen Überdruck an der Übertrittsstelle aus dem Salinar, der durch das Auspressen von Lösung aus der Grube verursacht wird. Wie in Kapitel 2.2.2 dargelegt wurde, ist die natürliche Grundwasserbewegung im Hutgestein sehr gering. Die Ausbreitung von Grubenlösung bis in oberflächennahe Bereiche wird durch Dichteeffekte zusätzlich behindert.
- Die Ausbreitung der meisten Radionuklide, die mit der aus dem Salinar austretenden Lösung in das Hutgestein gelangen, wird im Hutgestein und Deckgebirge durch Sorption erheblich verzögert. Zahlreiche Radionuklide werden durch diesen Prozess vollständig im Hutgestein/Deckgebirge zurückgehalten.
- Radionuklide, die nach dem Transport durch das Hutgestein und das Deckgebirge in oberflächennahes, genutztes Grundwasser übertreten, erfahren dort eine erhebliche Verdünnung. Bezogen auf die Radionuklidkonzentration in der aus dem Salinar austretenden Lösung muss die Verdünnung mindestens etwa den Faktor 500 betragen, damit der Salzgehalt des mit Grubenlösung vermischten Grundwassers dessen intensive Nutzung als Trinkwasser und in der Landwirtschaft erlaubt.
- Gewisse Radionuklide können bei der Mobilisierung aus den Abfällen in gasförmige Spezies übergehen und sich dann in der Gasphase ausbreiten. Sofern das im Endlager gebildete Gas in das Deckgebirge übertritt, kann es radioaktive Spezies enthalten.

- Durch unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager oder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich können zusätzliche Wegsamkeiten geschaffen werden, die zu einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre führen.
- Durch die Mobilisierung von spaltbaren Radionukliden, die Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie Ausfäll- und Sorptionsprozesse kann sich lokal spaltbares Material akkumulieren. Dies ist im Hinblick auf die Sicherstellung der Unterkritikalität zu bedenken.

Die für die Langzeitsicherheit des ERAM wichtigen Standorteigenschaften wurden in Kapitel 2 dargelegt. Für das Sicherheitskonzept wichtig sind:

- die intakte Steinsalz-Barriere (Hangendschutzschicht) zwischen den Grubenfeldern Westfeld, Südfeld und Ostfeld einerseits und dem Hutgestein bzw. Deck-/Nebengebirge andererseits,
- die intakte Steinsalz-Barriere zwischen dem Südfeld und dem Zentralteil sowie zwischen dem Westfeld und dem Südfeld (abgesehen von einer begrenzten Zahl von Auffahrungen),
- die intakte Steinsalz-Barriere zwischen dem Ostfeld und dem Zentralteil (abgesehen von zwei Auffahrungen und evtl. Wegsamkeiten entlang des Hauptanhydrit),
- die bestehenden hydraulischen Wegsamkeiten zwischen Abbauen innerhalb der Grubenfelder als Folge von gebirgsmechanisch stark beanspruchten Pfeilern und Schweben,
- die lokal desintegrierte Steinsalz-Barriere im Grubengebäude Marie (Lager H) und die Möglichkeit des Lösungszutritts entlang des Hauptanhydrit an der Westflanke der Hauptmulde Bartensleben sowie – in der Grube Marie – entlang geogener Wegsamkeiten im Salz. In der Grube Bartensleben ist damit die Möglichkeit eines künftigen Lösungszutritts im Nordfeld, im Zentralteil und im Südostfeld nicht auszuschließen.
- das Vorkommen von Kalilagern in der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie, insbesondere die zahlreichen Aufschlüsse von Kalilagern im Grubengebäude Bartensleben infolge enger, steilstehender Faltung des Salzgebirges westlich der Hauptmulde,
- die geringen Konvergenzraten von unverfüllten Hohlräumen,
- das gering durchlässige Hutgestein, das Fehlen von Hinweisen auf die Existenz von ausgedehnten geo-mechanischen Schwäche-zonen. Die Struktur mit der größten hydraulischen Durchlässigkeit, welche das Hutgestein durchquert, ist die in Blöcke zerbrochene Schichtenfolge DGL.
- das Deckgebirge, bestehend aus gering durchlässigen, tonigen Schichten und erhöht durchlässigen Schichten in flacher Wechsellagerung,
- die geringe natürliche Bewegung des Grundwassers im Hutgestein mit tendenziell abwärts gerichteter Bewegungsrichtung in der Schichtenfolge DGL und
- die geringe Bewegung des Grundwassers im Deckgebirge nahe der Flanken der Salzstruktur, damit sowohl am Salzspiegel als auch an der Flanke sehr geringe Subrosion.

### 3.2.2 Konzept für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit

Das Konzept für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit (einschließlich der im vorliegenden Bericht nicht behandelten chemotoxischen Langzeitsicherheit und der Sicherheit vor unzulässigen Senkungen an der Geländeoberfläche, vgl. Kapitel 1.2) beschreibt die tragenden Pfeiler der Langzeitsicherheit und legt die übergeordneten Zielsetzungen für Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen der Grubengebäude fest. Das Konzept leitet sich aus den Schutzzielen und den in Kapitel 3.2.1 dargelegten Sachverhalten ab. Es lässt es sich wie folgt zusammenfassen:

- (1) Schutz der Tagesoberfläche durch Begrenzen der Verformungen, gemittelt über größere Bereiche der Grube, durch Verfüllen der Hohlräume in den Grubengebäuden Bartensleben und Marie
- (2) Sicherstellen der gebirgsmechanischen Stabilität des Grubengebäudes Bartensleben durch Verfüllen derart, dass die intakten Steinsalz-Barrieren um die Grubenfelder Westfeld, Südfeld und Ostfeld auch langfristig intakt bleiben
- (3) Sicherstellen der gebirgsmechanischen Stabilität der Grubengebäude durch Verfüllen derart, dass die Entstehung von weiteren Lösungszutritten aus dem Hutgestein in die Grubengebäude Bartensleben und Marie behindert bzw. verzögert wird
- (4) Begrenzen des Potenzials für Auflösung von Halit und Umlösungen an Kalilagern durch Verminderung des unversetzten Hohlraums und damit des maximal möglichen Volumens von zutretenden Lösungen
- (5) gezieltes Behindern des Lösungszutritts zu den Abfällen sowie des Austritts von kontaminierter Lösung und Gas aus den Einlagerungskammern und deren Nahbereich in die Restgrube durch Verschließen von ausgewählten Auffahrungen (mit qualifizierter Anforderung bezüglich hydraulischem Widerstand – Abdichtungen)
- (6) Behindern der Lösungsbewegung und damit auch des Transports von gelösten Schadstoffen in der Grube durch weitgehendes Verfüllen der Grube mit strömungshemmendem Versatz (ohne qualifizierte Anforderung bezüglich des lokal zu erreichenden hydraulischen Widerstands)
- (7) Begrenzen der Lösungsauspressung aus der Grube in das Hutgestein durch weitgehendes Verfüllen der Grube mit stützendem Versatz

Naturgegeben und durch Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen der Grubengebäude nicht beeinflusst sind die folgenden tragenden Pfeiler der Langzeitsicherheit:

- (8) Mechanischer und hydraulischer Schutz des Systems „Grubengebäude – Salzstruktur“ durch das Hutgestein und Deckgebirge
- (9) Verzögerung des Schadstofftransports im Hutgestein und Deckgebirge durch die geringe natürliche Bewegung des Grundwassers und durch Sorption
- (10) Verdünnung von aus dem Salinar ausgepresster, potenziell schadstoffhaltiger Lösung im Hutgestein und Deckgebirge

Aufgrund des geringen Inventars an spaltbaren Radionukliden im Endlager sind besondere Maßnahmen in Bezug auf die Sicherstellung der Unterkritikalität nicht erforderlich (vgl. Kapitel 6.9).

### **3.3 VERFÜLL- UND VERSCHLUSSKONZEPT**

#### **3.3.1 Entwicklung des Konzeptes für das Verfüllen und Verschließen**

Basierend auf den in Kapitel 3.2.1 dargelegten Sachverhalten wurden im Mai 1993 die Arbeiten zur Entwicklung eines Stilllegungskonzeptes für das ERAM aufgenommen. Parallel zu den Planungen sind seit 1994 begleitende Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt worden, um die Wirksamkeit verschiedener Verfüll- und Verschlussmaßnahmen zu untersuchen bzw. zu bewerten. Entsprechend den damals aktuellen Absichten hinsichtlich einer weiteren Einlagerung von Abfällen wurden zu Beginn zudem Variationen von Abfallvolumen und Gesamtaktivität der eingelagerten Abfälle in die Planungen und Analysen einbezogen. Die Notwendigkeit der Berücksichtigung einzelner Effekte wie Gasbildung und Auf- bzw. Umlösevorgänge ergab

sich mit wachsendem Kenntnisstand. Konkret wurden die nachfolgend aufgeführten Stilllegungskonzepte bzw. -maßnahmen untersucht.

## **Modellrechnungen zum offenen Grubengebäude**

Im Jahr 1996 wurden Modellrechnungen mit verschiedenen Einlagerungsstrategien (Inventare und Abfallvolumen) für ein vollgelaufenes, offenes Grubengebäude durchgeführt. Bei einer Variante, für die ein Abfallvolumen von 52 000 m<sup>3</sup> – d. h. 40 % mehr als sich nun bei der Stilllegung im ERAM befindet – und die Ausschöpfung der Garantiewerte der Endlagerungsbedingungen unterstellt wurden, überstieg die berechnete maximale Strahlenexposition den Wert nach § 47 StrlSchV für die effektive Dosis lediglich um knapp einen Faktor 3. Dies ist ein erster Hinweis, dass bei der Umsetzung von Maßnahmen im Grubengebäude und unter Berücksichtigung des tatsächlichen Inventars im ERAM das radiologische Schutzziel eingehalten wird, selbst wenn die Maßnahmen nur gering wirksam sind.

## **Vorläufiges Stilllegungskonzept**

Das vorläufige Stilllegungskonzept von 1996 beinhaltete die folgenden Maßnahmen:

- Die Einlagerungsbereiche, d. h. die Einlagerungshohlräume und ausgewählte benachbarte Auffahrungen, werden unter Verwendung von gering durchlässigem und vollständig stützendem Versatz (DYWIDAG-Mineralgemisch) eingekapselt.
- Die Verfüllung des restlichen Grubengebäudes erfolgt überwiegend mit einem ebenfalls vollständig stützenden Versatzmaterial.
- Einzelne Streckenabschnitte im Grubengebäude sind mit Salzgrus verfüllt, um zutretender Lösung eine Nachsättigung zu ermöglichen.
- Potenzielle Lösungszutrittsstellen, insbesondere jene im Bereich der ersten Sohle, werden abgedichtet, um die Wahrscheinlichkeit für einen Lösungszutritt zu reduzieren.

Die begleitenden Langzeitsicherheitsanalysen beruhten auf der pessimistischen Annahme eines Lösungszuflusses in die Restgrube kurz nach Verschluss des Endlagers. Effekte von Auf- und Umlösungen wurden nicht, solche der Gasbildung nur zum Teil berücksichtigt. Sie zeigten, dass die Endlagerungsbedingungen (Stand September 1993) hinsichtlich der Aktivitätskonzentrationen der darin genannten langzeitsicherheitsrelevanten Radionuklide nicht revidiert zu werden brauchten. Sie zeigten jedoch auch, dass weitere Radionuklide als potenziell langzeitsicherheitsrelevant in die Endlagerungsbedingungen aufzunehmen waren.

## **Einkapselungskonzept mit Abdichtbauwerken aus hochverdichtetem Bentonit**

Die Entwicklung dieses Stilllegungskonzepts basierte anfänglich auf einem einzulagernden Abfallvolumen von 150 000 m<sup>3</sup> mit einer Gesamtaktivität von ca. 10<sup>18</sup> Bq. Für diese Abfallmenge und dieses Aktivitätsinventar erschien ein Sicherheitsnachweis nur erfolgreich zu führen, wenn die Einlagerungsbereiche kleinräumig eingekapselt werden und der Zutritt von Lösungen in die Einlagerungsbereiche für sehr lange Zeit verhindert wird. Die Arbeiten zeigten frühzeitig, dass hierzu neuartige, im Bergbau bislang nicht erprobte Bauwerke zur Einkapselung der Einlagerungsbereiche zu entwickeln waren. Dieses Konzept beinhaltete die folgenden Maßnahmen:

- Die Einlagerungsbereiche werden mit Bauwerken aus hochverdichteten Bentonitformsteinen abgedichtet, die eine definierte Dichtwirkung durch Quellen bei einer gezielten Bewässerung mit einer Salzlösung erreichen.
- Innerhalb der Einlagerungsbereiche sind große, mit stützendem porösem Versatz gefüllte Hohlräume bereitzustellen, welche die Korrosionsgase und die Gase aus der Zersetzung der organischen Stoffe aus den Abfällen aufnehmen.



- Potenzielle Lösungszutrittsstellen, insbesondere jene im Bereich der ersten Sohle, werden abgedichtet, um die Wahrscheinlichkeit für einen Lösungszutritt zu reduzieren.

Das Konzept verhindert eine Radionuklidfreisetzung praktisch vollständig.

An der Machbarkeit kamen im Verlauf der Bearbeitung Zweifel auf. Sie ergaben sich aus dem wachsenden Kenntnisstand über die geologische und bergbauliche Situation<sup>9</sup>, über die geomechanischen Verhältnisse<sup>10</sup> sowie über die hydraulische Charakterisierung des Hauptanhydrit als potenziell durchlässige Gesteinseinheit. Schwierig stellten sich auch die Verhältnisse bei der Einschätzung von Umlösungsprozessen an den Kalilagern dar. Die Zwischen- und Endprodukte der Wechselwirkungsreaktionen zwischen verschiedenen Salzlösungen und diesen Salzgesteinen lassen sich zwar mit Hilfe geochemischer Modelle bestimmen, Unsicherheiten bestehen jedoch über das Ausmaß von Geometrieänderungen am jeweiligen Ort durch diese Reaktionen. Auch bei der technischen Entwicklung des zentralen Abdichtelements des Einkapselungskonzepts, der sog. Querschnittsabdichtung (QSA), traten zunehmend neue Probleme auf.

Eine interne Bewertung dieses Stilllegungskonzepts im BfS führte im Februar 1999 zu der Entscheidung, dieses Konzept aus den aufgeführten Gründen nicht weiter zu verfolgen. Im Mai gab das BfS bekannt, dass der 1998 unterbrochene Einlagerungsbetrieb nicht wieder aufgenommen wird.

Vor dem Hintergrund, dass die Gesamtaktivität der Abfälle gegenüber den bis dahin bekannten Vorgaben für die Entwicklung des Einkapselungskonzeptes drastisch reduziert war und die Einstellung des Einlagerungsbetriebs feststand, bestand nun die Möglichkeit, auch Konzepte zu entwickeln, die zwar eine geringere nachweisbare Rückhaltung von Schadstoffen als das Einkapselungskonzept bei planmäßiger Umsetzung zur Folge haben, deren Umsetzung aber einfacher und damit robuster und weniger fehleranfällig ist.

## **Porenspeicherkonzept und Konzept mit Abdichtungsmaßnahmen**

Prinzipstudien zum so genannten Porenspeicherkonzept begannen bereits im Jahre 1993. Das Konzept selbst wurde im April 1998 in den Grundzügen festgelegt. Die Maßnahmen des Porenspeicherkonzepts sind nicht darauf ausgerichtet, den Kontakt von zugeflossenen Lösungen mit den Abfällen zu verhindern, sondern den Transport kontaminierter Lösungen aus den Einlagerungsbereichen in vorbestimmten Wegsamkeiten zu verzögern. Dies geschieht durch die Schaffung langer Transportwege mit großen Porenräumen (Verzögerungsstrecken).

Wegen bestehender Realisierungsrisiken und sich abzeichnender Probleme in der Nachweisführung, wie

- homogener firstbündiger Einbau von Kies/Schotter in die Verzögerungsstrecken,
- geometrische Auslegung weiterer benötigter Auffahrungen (Siphonbauwerke),
- nicht ausschließbare parallele Wegsamkeiten durch alte Bohrungen, Auflockerungszonen und Hauptanhydrit,
- Ausfällungen in den Siphonbauwerken und ggf. in den Verzögerungsstrecken,
- mehrfache Änderung der Konzeptionen insbesondere für das West- und Südfeld aufgrund des wachsenden Erkenntnisstandes und
- Notwendigkeit des Auffahrens der Verzögerungsstrecken ausschließlich im Steinsalz

wurde seit Mitte 1999 zusätzlich ein Konzept mit Abdichtmaßnahmen im weiteren Umfeld der Einlagerungshohlräume entwickelt, das sich an das nachfolgend skizzierte Konzept der weitgehenden Vollverfüllung anlehnte. Wie beim Konzept der weitgehenden Vollverfüllung ist ein hoher Verfüllgrad auch bei diesem Konzept eine Zielsetzung der Maßnahmen, um mögliche Auf- und Umlösungen im Fall eines nicht ausschließba-

<sup>9</sup> z. B. der genauen Lage und Verbreitung der Kalilager und ihrer faziellen Ausbildung bzw. der Unsicherheiten im Risswerk und der Unkenntnis der Lage und Teufe von Tastbohrungen

<sup>10</sup> z. B. die Erstreckung von Auflockerungszonen um Hohlräume und die damit verbundenen hydraulischen Gebirgseigenschaften



ren Lösungszutritts in das Grubengebäude zu beherrschen. Im Vergleich mit dem früher verfolgten Einkapselungskonzept waren die Anforderungen an die Abdichtelemente in diesem Konzept jedoch geringer.

Es konnte gezeigt werden, dass sowohl mit dem Porenspeicherkonzept als auch mit dem Konzept mit Abdichtmaßnahmen der Langzeitsicherheitsnachweis für das ERAM grundsätzlich geführt werden kann.

### **Konzept der weitgehenden Vollverfüllung**

Die Arbeiten zum Konzept der weitgehenden Vollverfüllung wurden im Juli 1998 in Form von Prinzipstudien aufgenommen. Die Entscheidung des BfS zur konzeptionellen Bearbeitung erfolgte im März 1999.

Das Konzept sieht eine weitgehende Verfüllung von Strecken und Abbaufeldern mit einem pumpfähigen, hydraulisch abbindenden Versatz mit folgenden Hauptzielsetzungen vor:

- Stabilisierung von Hohlräumen
- Hohlraumreduzierung zur Vermeidung von Auf- und Umlöseprozessen
- Verzögerung bzw. Behinderung von Transportprozessen für die Schadstoffe.

Das Konzept setzt zum einen ausschließlich auf bergbauerprobte Verfahren für das Einbringen des Versatzes und greift zum anderen auf eine Versatzart zurück, die im Bergbau Verwendung als Dammbaustoff findet. Im Konzept der weitgehenden Vollverfüllung werden die Einlagerungsbereiche vom übrigen Grubengebäude durch Abdichtmaßnahmen im weiteren Umfeld der Einlagerungsgrubenbaue abgetrennt.

Unsicherheiten und Unschärfen bestehen in diesem Konzept – wie auch in den anderen Konzepten – einerseits in Bezug auf die geologischen, hydraulischen, geochemischen, gebirgsmechanischen und bergbaulichen Gegebenheiten im Grubengebäude und andererseits auch hinsichtlich der Wirkung der zunächst nicht ortsspezifisch qualifizierten Versatzmaßnahmen. Diesen Unsicherheiten und Unschärfen wurde bei den für das ERAM untersuchten Konzepten hier erstmals mit einem probabilistischen Ansatz beim Nachweiskonzept und den zugehörigen Langzeitsicherheitsanalysen Rechnung getragen.

### **Bewertung und abschließende Festlegung des Stilllegungskonzepts**

Sowohl das Stilllegungskonzept mit Abdichtungsmaßnahmen im weiteren Umfeld der Einlagerungsgrubenbaue bzw. das Konzept der weitgehenden Vollverfüllung als auch das Porenspeicherkonzept hatten Anfang 2001 einen Entwicklungsstand erreicht, der eine Eingrenzung der Arbeiten und eine abschließende Festlegung des für das ERAM zweckmäßigen Stilllegungskonzepts ermöglichte.

Das Porenspeicherkonzept hat Vorteile bei Einlagerungsbereichen mit hohen Anteilen an Metallen und organischen Verbindungen und damit großen sich voraussichtlich bildenden Gasmengen. Dies trifft insbesondere für das Westfeld zu. Durchgeführte Langzeitsicherheitsanalysen zeigten, dass auch für das Abdichtungskonzept die Auswirkungen der Gasbildung nicht zu einer Verletzung der Schutzziele führen bzw. sich durch eine Konzeptvariante (gemeinsame Abdichtung von West- und Südfeld) beherrschen lassen.

Für das Abdichtungskonzept bzw. das Konzept der weitgehenden Vollverfüllung spricht, dass es mit weniger verschiedenartigen Komponenten auskommt und damit bezüglich der bautechnischen Umsetzung robuster ist. Das Porenspeicherkonzept enthält neben den ebenfalls notwendigen Abdichtelementen weitere Komponenten, wie Verzögerungsstrecken, Siphonbauwerke und eine mit Schotter zu verfüllende Strecke im Südfeld mit sensibler geometrischer Streckenführung. Für den Fall des Zutritts ungesättigter Lösungen kann überdies die Funktion des Konzepts nur durch weitere Strecken mit erforderlichen Längen von 2000 m bis 3000 m gewährleistet werden. Wegen der geforderten Lage dieser Komponenten im Grubengebäude können vorhandene Strecken nicht genutzt werden. Des Weiteren bestehen insbesondere wegen der Anforderung, dass die Verzögerungsstrecken im Steinsalz aufgefahren werden müssen, im Südfeld Realisierungsrisiken, die nur mit erheblichem Erkundungsaufwand abgeklärt werden können.

Aus den genannten Gründen entschied das BfS Anfang 2001, die konzeptionellen Arbeiten zum Porenspeicherkonzept auf dem erreichten Niveau abzuschließen und zu dokumentieren.

Da sich das Konzept der weitgehenden Vollverfüllung und das Abdichtungskonzept im Laufe der Bearbeitung infolge der durch das ERAM vorgegebenen Randbedingungen bezüglich der Verfüll- und Verschleißkomponenten sehr stark angenähert hatten, wurden beide Konzepte Ende 2000 zusammengeführt. Es entstand so das nachfolgend beschriebene Konzept für das Verfüllen und Verschließen als Grundlage des Antrags auf Planfeststellung zur Stilllegung des ERAM.

### 3.3.2 Beantragtes Konzept für das Verfüllen und Verschließen

Das beantragte Konzept für das Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie sieht vor,

- die unverfüllten Hohlräume und Resthohlräume in Kammern, Strecken und vertikalen Auffahrungen weitgehend und nach differenzierten Zielvorgaben mit einem Salzbeton zu verfüllen, der ein hohes Fließmaß aufweist,
- die Einlagerungsbereiche Westfeld, Südfeld und Ostfeld durch Abdichtungen von der Restgrube, für welche ein Lösungszutritt in der Zukunft nicht ausgeschlossen werden kann, hydraulisch zu trennen und
- die beiden Tagesschächte Bartensleben und Marie mit Verschlussbauwerken zu verschließen, die aus mehreren Dichtelementen und unterschiedlichen abdichtenden Materialien bestehen.

#### Abdichtungsbauwerke und Anforderungen an die Baustoffe

Das Ausmaß von Umlösungen an Kalilagern und damit die Zusammensetzung der Lösungen im Bereich der Abdichtungen kann nicht verlässlich vorhergesagt werden. Da es keine bergbauerprobten Abdichtungsmaterialien auf der Basis von Zement gibt, die sowohl in Kontakt mit NaCl-Lösung als auch Mg-reichen Lösungen chemisch stabil sind, wird als Baustoff für die meisten Abdichtungen der genannten Einlagerungsbereiche gegen die Restgrube und als sonstiges Versatzmaterial Salzbeton gewählt. Ausnahmen bilden die Baustoffe für die Schachtverschlüsse, die Abdichtung des Einlagerungsbereichs Ostfeld auf der 4. Sohle, die Abdichtung des Wetterrolllochs zwischen Südfeld und Zentralteil sowie der Versatz einzelner Bohrungen. Da die Abdichtung des Einlagerungsbereichs Ostfeld auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit errichtet werden muss und dieser – im Unterschied zum Steinsalz bei den anderen Abdichtungen – in der Phase nach Verschluss des Endlagers nicht auf das Abdichtbauwerk aufkriechen wird, wird diese Abdichtung (nach Entfernen der Auflockerungszone) aus einem Magnesiabeton erstellt. Dieser Baustoff hat die Eigenschaft, mit einer leichten Volumenzunahme abzubinden.

Mit der Verwendung von Salzbeton – wie auch mit jener von Magnesiabeton – wird die Möglichkeit einer langsamen chemischen Zersetzung in Kauf genommen (Korrosion von Salzbeton durch Mg-haltige Lösung, Korrosion von Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung<sup>11</sup>). Die Abdichtungen werden jedoch derart errichtet, dass eine rasche Korrosion ausgeschlossen ist. Zielgröße für die Auslegung der Abdichtungen aus Salzbeton ist deshalb die Zeitdauer, während der die Abdichtungen bei anstehender Mg-reicher Lösung einen erheblichen hydraulischen Widerstand darstellen. Diese Zeitdauer kann durch die Anfangspermeabilität der Abdichtungen und damit die Rate, mit der Lösung in die Abdichtungen eindringen kann, beeinflusst werden. Modellrechnungen zeigen, dass die Korrosion auch bei hohem Mg-Gehalt in der anstehenden Lösung ä-

---

<sup>11</sup> Magnesiabeton ist in Kontakt mit Mg-haltiger Lösung chemisch stabil, sofern deren Mg-Gehalt einen gewissen Schwellenwert übersteigt (ca. 12% des Werts von IP21-Lösung). Salzbeton wird durch Lösungen mit hohem Mg-Gehalt rascher, durch Lösungen mit niedrigem Mg-Gehalt langsamer korrodiert. Einen Schwellenwert für die chemische Stabilität von Salzbeton in Kontakt mit Mg-haltiger Lösung gibt es nicht. Die Korrosion der Abdichtbauwerke durch Grubenlösung ist Gegenstand von Kapitel 6.4.2.

berst langsam erfolgt, wenn die Anfangspermeabilität der Abdichtungen  $10^{-18} \text{ m}^2$  oder weniger beträgt (Kapitel 6.4.2 sowie [Colenco 2009], [GRS 2009b]). Analog wurde gezeigt, dass die Abdichtung aus Magnesiabeton bei anstehender Mg-arter Lösung äußerst langsam korrodiert, wenn ihre Anfangspermeabilität  $10^{-17} \text{ m}^2$  oder weniger beträgt.

Ein Abdichtungsbauwerk setzt sich je nach seiner Gesamtlänge aus einem oder mehreren, in der Regel ca. 25 m langen Segmenten aus Salzbeton bzw. Magnesiabeton zusammen.

Bei den Abdichtbauwerken aus Salzbeton sind die einzelnen Segmente durch plastische Dehnfugen voneinander getrennt, die aus Salzgrus bestehen. Das Betonieren der Segmente erfolgt nach Nachreißen der Streckenkontur firstbündig. Die Kontaktzone Streckensaum/Betonkörper wird nach der Herstellung des Segments mit einer Zementsuspension injiziert, um eine ausreichende sofortige Dichtheit der Kontaktzone zu gewährleisten. Der prinzipielle Aufbau der einzelnen Segmente der Abdichtungsbauwerke aus Salzbeton ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

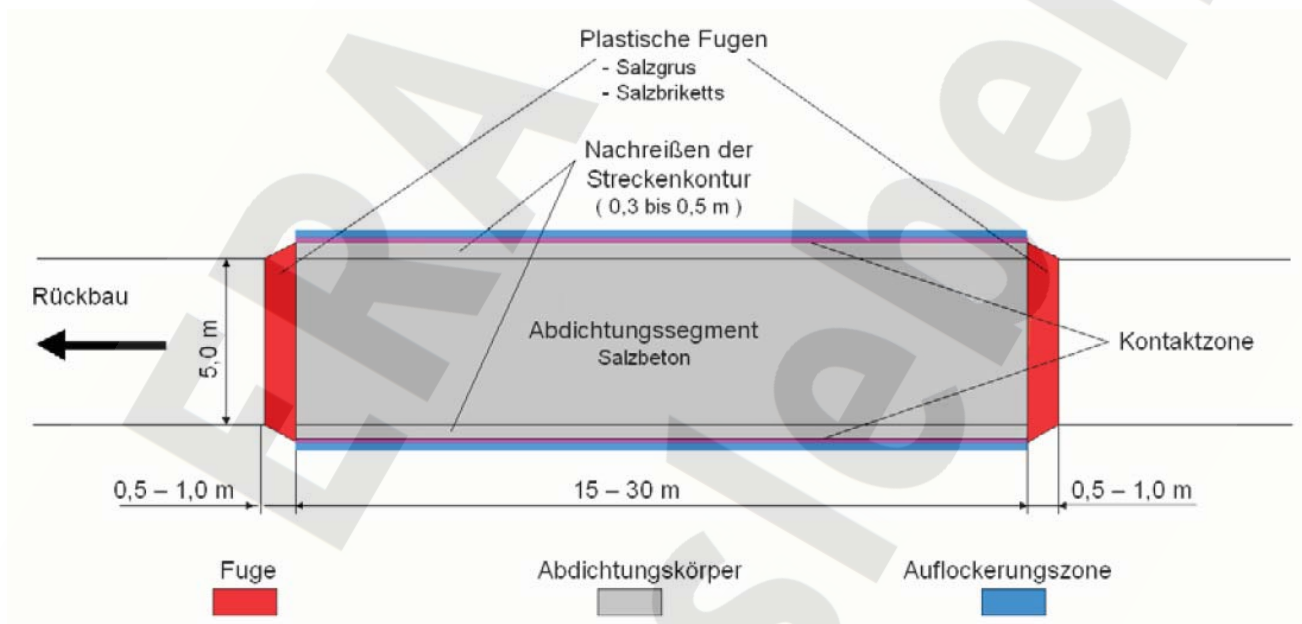


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung eines Abdichtungssegments aus Salzbeton.

Das Abdichtungsbauwerk aus Magnesiabeton besteht aus 4 Abdichtungssegmenten, die jeweils durch Widerlager voneinander getrennt sind. Die Widerlager sind 5 m lang, bestehen ebenfalls aus Magnesiabeton und dienen zur Gewährleistung des auch langfristig erforderlichen Quelldrucks innerhalb der Abdichtungssegmente.

### Nur teilweise Trennung von Westfeld und Südfeld

Bei einem Lösungszutritt in das Westfeld ist dort eine relativ hohe Gasbildung zu erwarten. Aufgrund der markscheiderischen Gegebenheiten und des hohen Durchbaungsgrades im Südfeld soll dieses auch für die Aufnahme des im Westfeld gebildeten Gases genutzt werden. Deshalb werden das Westfeld und das Südfeld gemeinsam und als Ganzes gegen die Restgrube abgedichtet (Einlagerungsbereich West-Südfeld, ELB WSF). Um einen Lösungsübertritt vom Südfeld in das Westfeld zusätzlich zu verzögern, werden die Strecken zwischen diesen beiden Feldern auf der 3. und 4. Sohle ebenfalls mit Abdichtungen versehen (Westquerschläge und Richtstrecke nach Süden bzw. Störreservelager). Weitere Verbindungen existieren derzeit zwischen Westfeld und Südfeld nicht. Damit sich im Westfeld kein hoher Gasdruck aufbauen kann, wird als gaspermeable Verbindung zwischen den beiden Feldesteilen ein Großbohrloch aufgeföhren, das im

Westfeld auf der dortigen obersten Sohle, der 3. Sohle, und im Südfeld auf der 1. Sohle anschließt und das mit Schotter versetzt wird (Abbildung 3-2).

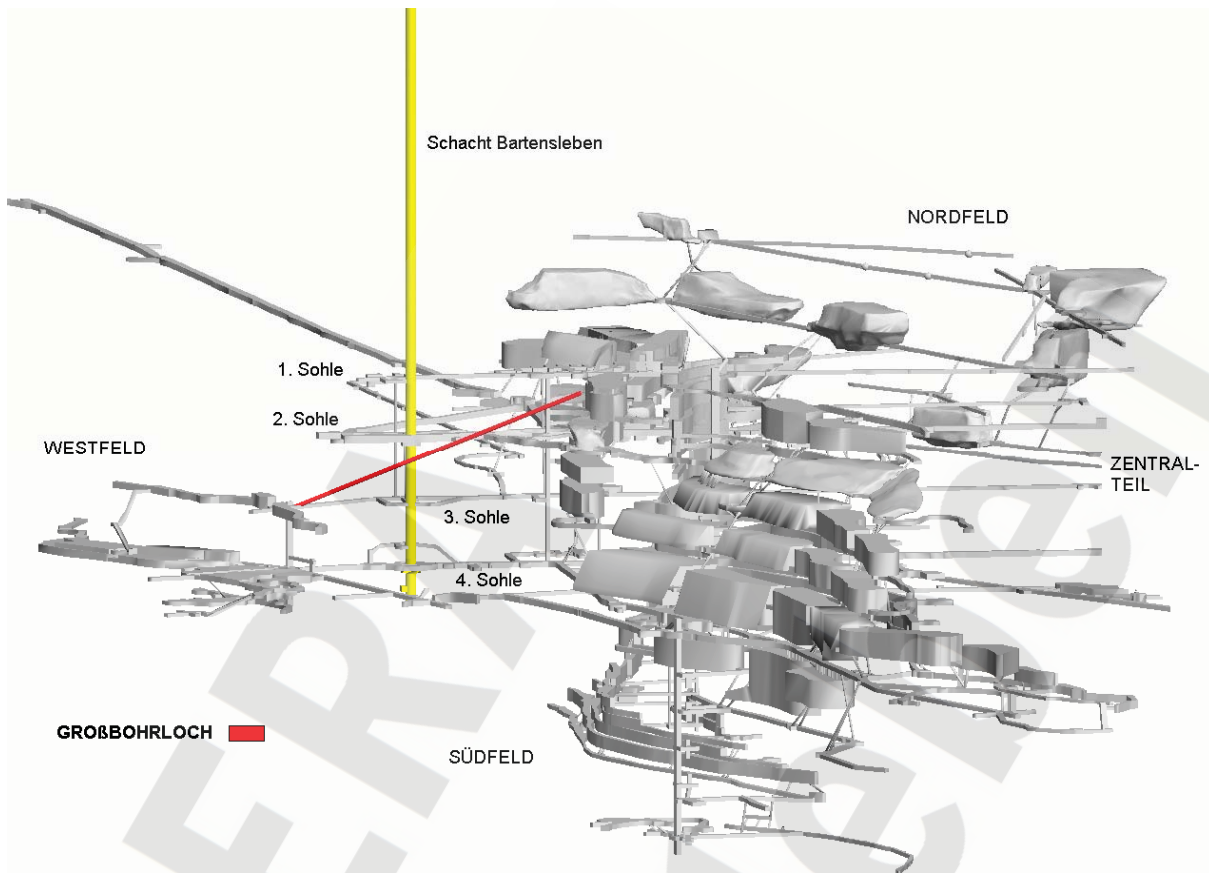


Abbildung 3-2: Aufzufahrendes Großbohrloch zwischen Westfeld (3. Sohle) und Südfeld (1. Sohle).

### Abdichtung des Einlagerungsbereichs West-Südfeld von der Restgrube

Das System der Abdichtungen des ELB WSF gegen die Restgrube (Zentralteil) besteht aus 13 Abdichtungen im Steinsalz in Strecken zwischen dem Kalilager B und dem Kalilager C auf den Sohlen 1 bis 4 mit Längen zwischen 26 m und 75 m sowie der Abdichtung des Wetterrolllochsystems im Bereich dieser Strecken. Hinzu kommen zwei ca. 200 m lange Abdichtungen in den beiden nördlichen Richtstrecken auf der 2. und 3. Sohle in Richtung des Grubenfeldes Marie.

Im Bereich der am weitesten südlich gelegenen Abdichtungen zwischen den Kalilagern B und C befindet sich das südliche Wetterrollloch, welches die vier Hauptsohlen verbindet. Zur Vereinfachung des Langzeitsicherheitsnachweises wird das Wetterrollloch qualitativ so verfüllt und abgedichtet, dass es keine hydraulische Relevanz besitzt. Deshalb muss der mögliche Lösungsfluss über die einzelnen Abschnitte des Wetterrolllochs im Vergleich zum potenziellen Lösungsfluss über die Streckenabdichtungen vernachlässigbar sein. Abbildung 3-3 veranschaulicht die geometrischen Verhältnisse und zeigt die prinzipielle Lage der Abdichtungselemente in den südlichen Verbindungsstrecken (grün) und im Wetterrollloch (schwarz).

Alle potenziellen Pfade zwischen den Kalilagern im Bereich des Wetterrolllochs umfassen drei Dichtelemente, entweder alle in den horizontalen Verbindungen oder mindestens eines im Wetterrollloch. Um die Forderung eines vernachlässigbaren vertikalen Lösungsflusses zu erfüllen, besitzen die Abdichtungselemente im Rollloch einen wesentlich höheren hydraulischen Widerstand als die in den horizontalen Verbindungen. Bau technisch wird das durch die Wahl von Bitumen als Abdichtungsmaterial im Vergleich zu Salzbeton bei den



Streckenabdichtungen erreicht. Bitumen ist als technisch dicht zu bezeichnen und in vertikalen Aufführungen gut einzubauen.

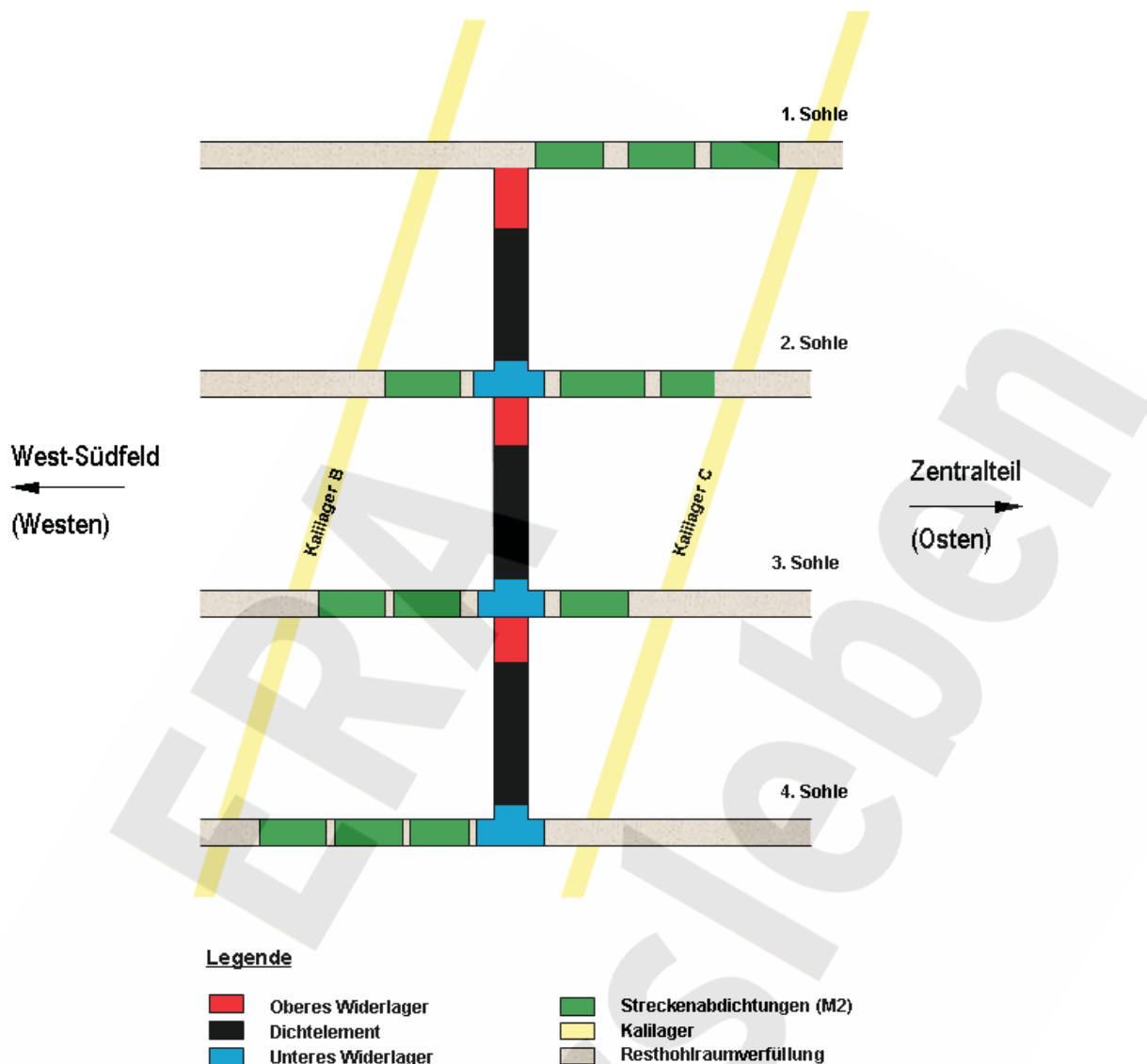


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung der Abdichtungen in den Verbindungsstrecken und dem südlichen Wetterrolllochsystem zwischen Südfeld und Zentralteil.

Alle drei Verfüllabschnitte des Wetterrolllochs werden auf die gleiche Weise abgedichtet. Das jeweils in der Mitte angeordnete Dichtelement, in der Abbildung schwarz, wird durch ein unteres Widerlager (blau) und ein oberes Widerlager (rot) lagestabil gehalten. Die Verfüllung erfolgt durchgehend mit setzungsarmem Hartgesteinsschotter, um die Standsicherheit der Verfüllsäule zu gewährleisten. Im Bereich des Dichtelements ist der Porenraum des Schotters mit Bitumen vergossen, im Bereich des oberen Widerlagers mit einer Zement-Flugasche-Suspension. Der Porenraum des unteren Widerlagers bleibt frei. Filterschichten zwischen dem Dichtelement und den benachbarten Widerlagern verhindern ein Auslaufen oder Aufschwimmen des Bitumens.

Im Rahmen der Bemessung der Abdichtung im Wetterrollloch wurde gezeigt, dass der Fluss über ein Dichtelement des Wetterrolllochs etwa eine Größenordnung, d. h. um den Faktor 10, geringer ist als der Fluss über ein Element der Streckenabdichtung. Zudem befinden sich zwischen den beiden Kalilagern weiter nördlich auch Streckenabdichtungen, die aus weniger als drei Dichtelementen bestehen, und allein aus diesem Grund eine größere hydraulische Relevanz besitzen.



## **Abdichtung des Einlagerungsbereichs Ostfeld von der Restgrube**

Die Segmente der Abdichtungen zwischen dem Ostfeld und der Restgrube befinden sich im Ostquerschlag auf der 2. Sohle im Steinsalz und im Ostquerschlag auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit. Ihre Längen betragen auf der 2. Sohle 150 m und auf der 4. Sohle 110 m. Die Wirksamkeit der Abdichtung des Ostfelds von der Restgrube in den Ostquerschlägen kann durch eventuell bestehende ausgedehnte hydraulische Wegsamkeiten im Hauptanhydrit, welche „in Parallelschaltung“ zu den Abdichtungen von der Restgrube in das Ostfeld führen können, beeinträchtigt sein.

## **Keine Abdichtung der Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil von der Restgrube**

Eine belastbare hydraulische Abdichtung der Einlagerungsbereiche Nordfeld und Zentralteil von der Restgrube ist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten mit vertretbarem Aufwand nicht möglich und – wie gezeigt werden wird – für die Langzeitsicherheit auch nicht notwendig.

## **Definition der Einlagerungsbereiche**

Mit der nun erfolgten Einführung der Abdichtungen bei der Beschreibung der Maßnahmen kann der bisher allgemein verwendete Begriff „Einlagerungsbereich“ definiert werden: Die Einlagerungsbereiche West-Südfeld (ELB WSF) und Ostfeld (ELB OF) sind die durch Abdichtungen gegen die Restgrube abgetrennten Grubenbereiche. Die Einlagerungsbereiche Nordfeld (ELB NF) und Zentralteil (ELB ZT) umfassen jeweils die Einlagerungsgrubenbaue in diesen beiden Grubenbereichen. Das Untertage-Messfeld (UMF) wird dem ELB ZT zugewiesen.

## **Spezielle Versatzmaßnahmen in der Restgrube**

Etwa 20 untertägige Bohrungen [BfS 2002], durch die ein sicherheitsrelevanter Lösungs- und Schadstofftransport innerhalb des Grubengebäudes erfolgen könnte, werden mit bergbauüblichen Spezialmörtel (Magnesiabinder) verfüllt. Die Rezeptur wurde speziell für das ERAM entwickelt und ist so gewählt, dass der Mörtel volumenstabil im Bohrloch abbindet und die erforderliche Dichtheit des Bohrlochs gewährleistet.

Die Verbindungsstrecken zwischen den Grubengebäuden Bartensleben und Marie werden ebenfalls mit erhöhtem technischem Aufwand verfüllt. Im Nachweis der Langzeitsicherheit wird davon allerdings nicht explizit und quantitativ Kredit genommen, die erwarteten Auswirkungen dieser Maßnahme gehen jedoch in qualitativer Weise in die Sicherheitsüberlegungen ein.

## **Schachtverschlüsse**

Die Verschlussysteme für die Schächte Bartensleben und Marie sind gestuft aufgebaut. Sie bestehen von oben nach unten aus folgenden Elementen (Abbildung 3-4): Dichtelement 1 (Ton), kombiniertes Widerlager-Dichtelement 2 (setzungsarmer Schotter mit Porenfüllung aus Asphalt), asphaltdichter Kern (abgestufte Kiese, Sande, Gussasphalt und Ton), kombiniertes Widerlager-Dichtelement 3 (wie Element 2). Die Dichtelementsysteme lagern auf einer Widerlagersäule aus setzungsarmem Schotter, deren Porenraum im obersten Bereich zusätzlich mit einer Sole-Zementstein-Suspension ausgefüllt ist. Im Schacht Bartensleben erstreckt sich das Dichtelementsystem vom Salinar oberhalb der obersten Sohle bis in den unteren Teil des Deckgebirges, im Schacht Marie bis in das Hutgestein. Aus den Modellrechnungen [Colenco 2009] und [GRS 2009b] leitet sich als Auslegungsanforderung an den Schachtverschluss Bartensleben, welcher Teil des Barrierensystems des ELB WSF ist, ein maximaler Lösungsfluss durch das Verschlussystem und die angrenzende Auflockerungszone von  $0,1 \text{ m}^3/\text{a}$  ab, der nach Verschluss des Endlagers langfristig (Nachweiszeitraum 30 000 Jahre) zu gewährleisten ist. Hydraulische Berechnungen, die im Rahmen der Konzeptpla-

nung für die Schachtverschlüsse durchgeführt wurden, haben für den Nachweiszeitraum Durchflussraten in der Größenordnung von mehreren 10 l pro Jahr ergeben [ERCOSPLAN 2003].

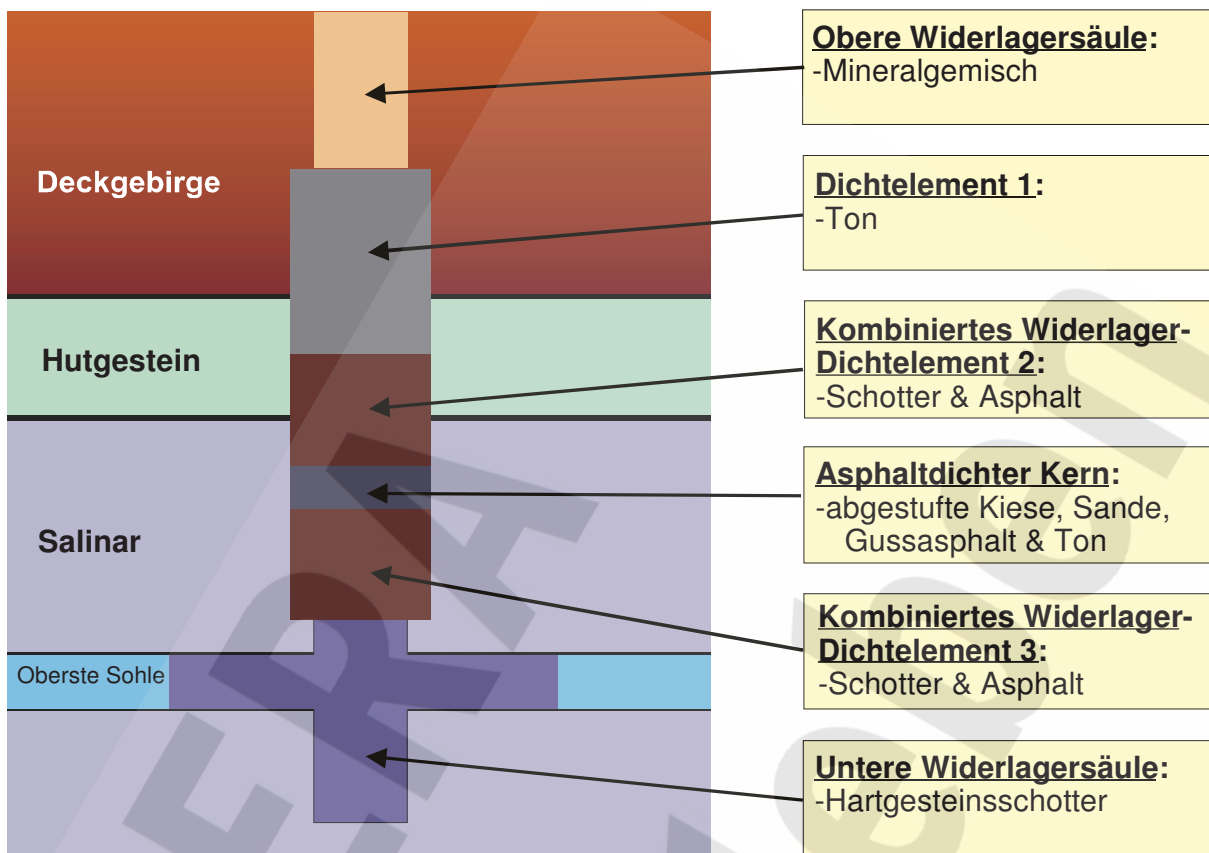


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung der Schachtverschlüsse von Schacht Bartensleben und Schacht Marie.

### Verfüllen der Restgrube und Verfüllkategorien

Für die weitgehende Verfüllung der Hohlräume und Resthohlräume der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie werden alle Grubenbaue einer von vier Verfüllkategorien zugewiesen und damit Anforderungen an den Verfüllgrad für jeden Grubenbau festgelegt. Diese richten sich nach der Funktion, die die Verfüllung in den versetzten Grubenbauen zu übernehmen hat (Abdichtung, Stabilisierung, Hohlraumreduzierung in Steinsalzabbauen und –strecken, Hohlraumreduzierung in Kalilabbauen, vgl. Kapitel 3.2.2).

Grubenbaue, die eine abdichtende Funktion zur Verzögerung des Zu- und Austrittes von Lösungen erfüllen müssen (Abdichtungen), sind in der Verfüllkategorie I „firstbündige Verfüllung“ zusammengefasst. Für diese Verfüllkategorie wird ein hydraulischer Widerstand mit einer integralen Anfangspermeabilität von  $10^{-18} \text{ m}^2$  des eingebrachten Versatzmaterials und des umgebenden Salinars gefordert. Hieraus leiten sich Anforderungen an die Materialeigenschaften des Versatzmaterials, an den Verfüllgrad (firstbündiges Einbringen) und die Dichtheit des umgebenden Streckensaumes ab. Je nach dem standortspezifischen Zustand der Streckenkonturen sind um die Strecken die Auflockerungszonen bergingsschonend zu entfernen und die Streckensäume zu injizieren.

Zur Gewährleistung der Standsicherheit wurden ausgesuchte Grubenbaue des Zentralteils der Grube Bartensleben im Rahmen der „Bergbaulichen Gefahrenabwehrmaßnahme im Zentralteil“ versetzt. Darüber hinaus sollen die in der Szenarienanalyse [BGR 1999a] für die fernere Zukunft als zutrittsgefährdet ausgewiesenen Grubenbaue so weitgehend verfüllt werden, dass ein Integritätsverlust der Steinsalz-Barriere in der

Umgebung solcher Abbaue ausgeschlossen werden kann. Diese Grubenbaue sind der Verfüllkategorie II zugeordnet. Die Maßnahme garantiert den Erhalt der Integrität der Salzbarriere auf dem heutigen Niveau. Realistischerweise ist sogar eine Verbesserung der Verhältnisse zu erwarten. Insbesondere reduziert sich dadurch die Anzahl der zutrittsgefährdeten Grubenbaue erheblich.

Zur Begrenzung des offenen Hohlraumvolumens bei Lösungszutritt ist ein mittlerer Verfüllgrad von 65 % je Feldesteil geplant. Der Verfüllgrad der einzelnen Abbaue kann dabei zwischen 0 % und 100 % variieren (Kategorie III). Zur Kategorie IV zählen alle Auffahrungen in den Kalilagern, sie werden möglichst vollständig verfüllt<sup>12</sup> um mögliche Umlöseprozesse zu minimieren.

## Versatzmaterial

Als Versatzmaterialien für bisher unverfüllte Hohlräume und für die Abdichtungen<sup>13</sup> ist ein im Wesentlichen aus Zement, Steinkohlenflugasche, Salzgrus-Zuschlag und Wasser bestehender Salzbeton vorgesehen<sup>14</sup>. Die aus den Standsicherheitsuntersuchungen abgeleiteten Anforderungen an die Materialparameter (E-Modul, Druck- und Zugfestigkeit) und die Ergebnisse der festigkeitsmechanischen Labor- und In-Situ-Versuche sind in [DBE 2006b] und [DBE 2006c] dargestellt, während die Nachweise des Langzeitverhaltens des Salzbetons in [GRS 2003] im Detail aufgeführt sind.

Das Abdichtungsbauwerk des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit wird aus Magnesiabeton hergestellt. Die wichtigsten Ausgangsstoffe, aus denen dieser hergestellt wird, sind Magnesiumoxid (MgO, ca. 10%), Quarzsand (rund 35%), Anhydrit (rund 30%) und eine Magnesiumchloridlösung (MgCl<sub>2</sub>-Lösung, rund 20%). Die Festigkeit des Magnesiabetons wird durch eine so genannte Sorelphase hervorgerufen, die sich beim Kontakt des MgO mit der MgCl<sub>2</sub>-Lösung bildet. Das chemische Langzeitverhalten des Abdichtbauwerks aus Magnesiabeton im Ostquerschlag auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit wird in [Colenco 2009] und [GRS 2009b] diskutiert.

## Räumliche Anordnungen

Die Verfüllung des Grubengebäudes Bartensleben, d. h. die Zuweisung der Grubenbaue zu den vier Verfüllkategorien in Bezug zu ihrer Lage in der Grube, zeigen beispielhaft Abbildung 3-5 und Abbildung 3-6 für einen schematisierten Sohlenriss der 4. Sohle und einen schematisierten Schnitt in West-Ost-Richtung entlang der Ostquerschläge. Eine vollständige Darstellung des Verfüllplans gibt [DBE 2005c]. Die Konzeptplanung für die Abdichtungen aus Salzbeton ist in [DBE 2004a], [BfS 2007b] und [BfS 2007c], für die Abdichtung aus Magnesiabeton in [K-UTEK 2008] und jene für die Schachtverschlüsse in [ERCOSPLAN 2004] und [BfS 2004a] dargelegt.

## Versatzmengen

Für die Verfüllung der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie werden insgesamt ca. 4 Mio. m<sup>3</sup> Salzbeton<sup>15</sup>, geringe Mengen Magnesiabinder und Magnesiabeton sowie geringe Mengen an anderen Baustoffen eingesetzt.

---

<sup>12</sup> Für die Sicherheitsanalyse wird im Allgemeinen ein Verfüllgrad von 50% des Volumens der derzeit offenen Auffahrungen in Kalilagern zu Grunde gelegt.

<sup>13</sup> mit Ausnahme der Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle

<sup>14</sup> Beispielsweise ist für den als Versatzmaterial für bisher unverfüllte Hohlräume zu verwendenden Salzbeton folgende Zusammensetzung vorgesehen: ca. 10 M-% Zement, ca. 23 M-% Steinkohleflugasche, ca. 54 M-% Salzgrus und ca. 13 M-% Wasser.

<sup>15</sup> bei einer 50%-Verfüllung der abgebauten Kalilager und ohne den mit den Maßnahmen zur bergbaulichen Gefahrenabwehr im Zentralteil eingebrachten Salzbeton

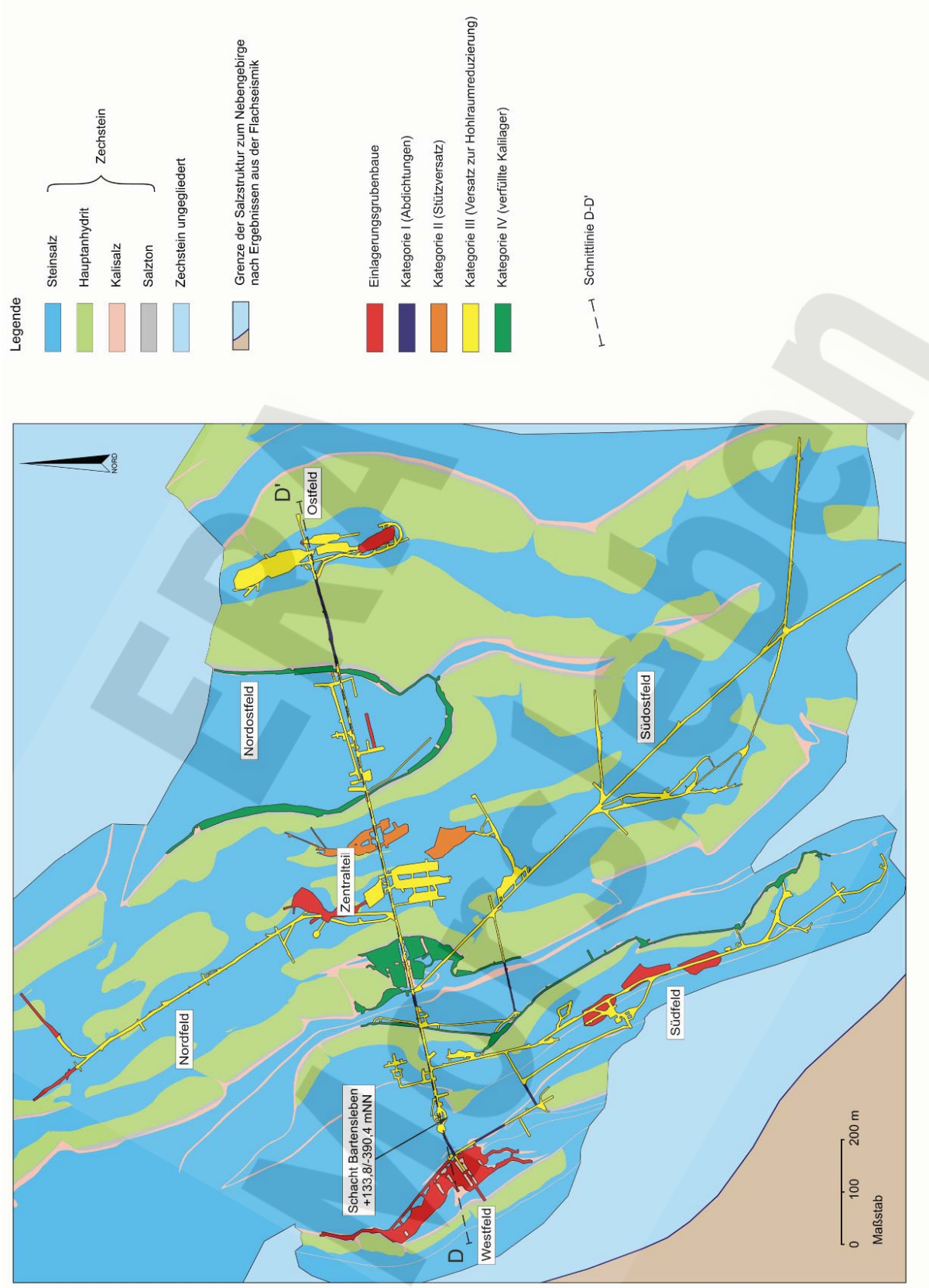


Abbildung 3-5: Verfülltes und verschlossenes Grubengebäude Bartensleben; schematisierter Sohlenriss der 4. Sohle (-372-m-Sohle) mit Einlagerungshohlräumen der 4a-, 4. und 5a-Sohle.



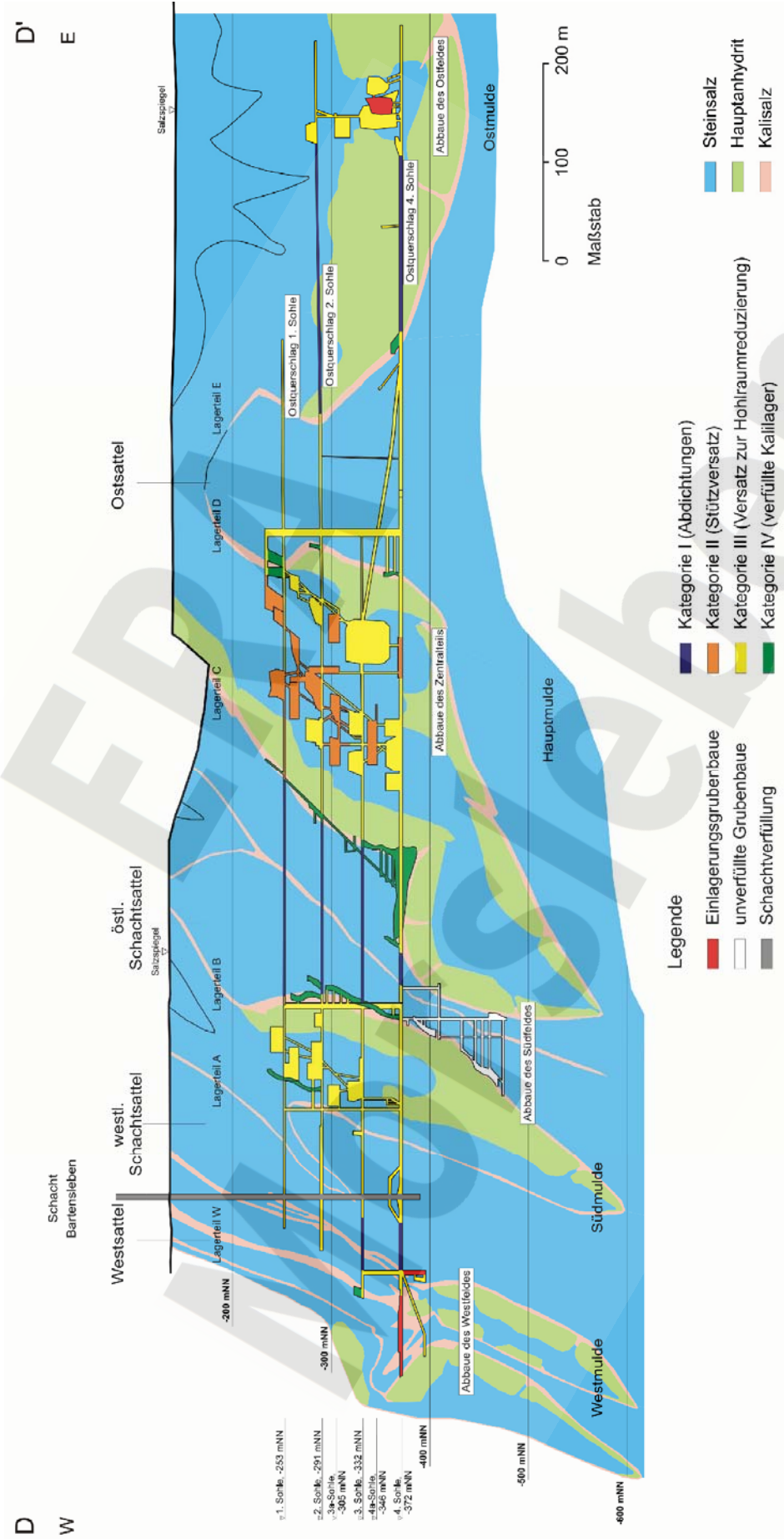


Abbildung 3-6: Verfülltes und verschlossenes Grubengebäude Bartsleben; schematisierter Schnitt entlang der Ostquerschläge mit Einlagerungshohlräumen im West- und Ostfeld.



### 3.4 KONZEPT FÜR DEN NACHWEIS DER RADIOLOGISCHEN LANGZEITSICHERHEIT

Entsprechend den internationalen Empfehlungen (z. B. [IAEA 2006]) und dem international anerkannten Vorgehen muss der Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit auf einem fundierten Verständnis des Endlagersystems und der darin ablaufenden, möglicherweise sicherheitsrelevanten Prozesse beruhen, die Schlüsselargumente hinsichtlich der Sicherheit des Endlagers aufzeigen sowie Aussagen zur Zuverlässigkeit des Nachweises und zu verbleibenden Ungewissheiten und deren Relevanz enthalten. Dazu sind geowissenschaftliche, geotechnische, radiologische, umweltchemische und technische Argumente, Analysen und ggf. Einzelnachweise zusammenzuführen. Basis des Sicherheitsnachweises sind die Erkenntnisse aus der Standortcharakterisierung, der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, der Prognose für die technischen Komponenten und der Langzeitsicherheitsanalyse. Letztere umfasst die Identifizierung der möglichen künftigen Entwicklungen des Endlagersystems (Szenariomentwicklung) und die quantitative Ermittlung der möglichen Auswirkungen bei diesen Systementwicklungen mit geeigneten Rechenmodellen (Konsequenzenanalyse). Die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsanalyse werden zum Nachweis der Einhaltung der Schutzziele herangezogen. Die Argumente und Analysen orientieren sich dabei am Sicherheitskonzept für das Endlager, das den Rahmen für dessen Planung, Realisierung, Verschluss und für den Sicherheitsnachweis liefert.

Alle diese Arbeiten wurden für das beantragte Verfüllen und Verschließen des ERAM und den dadurch entstehenden Zustand am Standort durchgeführt und das Vorgehen und die Ergebnisse in zahlreichen Verfahrensunterlagen beschrieben. Im vorliegenden Bericht werden die Zielsetzungen der verschiedenen Arbeiten erklärt, das Vorgehen skizziert, die Ergebnisse zusammenfassend wiedergegeben und zu einer gesamtheitlichen Darstellung der radiologischen Langzeitsicherheit zusammengeführt.

Sowohl der Zustand des Systems „Endlager Morsleben“, d. h. des Grubengebäudes, der Salzstruktur, des Hutgesteins und des Deckgebirges, zu Beginn der Phase nach Verschluss des Endlagers wie auch dessen künftige Entwicklung sind mit Ungewissheiten verbunden, die mit den durchgeführten Feld- und Laboruntersuchungen nicht ausgeräumt werden konnten und im Allgemeinen grundsätzlich auch mit weiteren speziellen Untersuchungen nicht mit vertretbarem Aufwand ausgeräumt werden können.

In der Phase nach Verschluss des Endlagers kann sich das System „Endlager Morsleben“ auf zwei grundsätzlich unterschiedliche Arten entwickeln:

(A) Systementwicklung „trockene Grube“

Bei der Systementwicklung „trockene Grube“ entstehen in der Phase nach Verschluss des Endlagers keine neuen, zusätzlichen Wegsamkeiten aus dem Hutgestein durch das Salinar in das Grubengebäude und die bestehende Wegsamkeit zwischen dem Hutgestein und dem Lager H bildet sich zurück. Insgesamt tritt dem Grubengebäude in der Phase nach Verschluss des Endlagers höchstens eine vernachlässigbar geringe Lösungsmenge zu.

(B) Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ in das Grubengebäude

Bei der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ treten in der Phase nach Verschluss des Endlagers der Grube in erheblicher Menge Lösungen aus dem Hutgestein zu, sei es über die bestehende Wegsamkeit in das Lager H der Grube Marie oder entlang einer oder mehrerer neu entstehender Wegsamkeiten.

Erheblich sind Lösungsmengen, wenn sie zu einer Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und zu einem Transport von Radionukliden aus dem Grubengebäude in das Hutgestein in Lösung führen können.

Die Entwicklung des Systems „Endlager Morsleben“ kann – unabhängig von den beiden oben genannten Arten – auch nach einem anderen Kriterium unterschieden werden:

(a) Natürliche Systementwicklung

Bei der natürlichen Systementwicklung erfolgt in der Phase nach Verschluss des Endlagers kein menschliches Eindringen in das Barrierensystem, das dieses in potenziell sicherheitsrelevanter Weise verletzt.

(b) Systementwicklung mit menschlichem Einwirken

Bei der Systementwicklung mit menschlichem Einwirken erfolgt in der Phase nach Verschluss des Endlagers, nachdem die Existenz des ERAM in Vergessenheit geraten ist, ein unbeabsichtigtes menschliches Einwirken im Barrierensystem, durch das dieses verletzt wird<sup>16</sup>.

Im Hinblick auf die Nachweisführung ist eine weitere Differenzierung zweckmäßig. Sie betrifft die zu untersuchende Art des Radionuklidtransports:

- (i) Radionuklidtransport in Lösung
- (ii) Radionuklidtransport in der Gasphase

Basierend auf diesen Differenzierungen nach grundsätzlichen Arten der Systementwicklung und des Radionuklidtransports werden Szenarien definiert und diese verschiedenen Szenariengruppen zugewiesen. Im vorliegenden Bericht wie auch in den Berichten zur Langzeitsicherheitsanalyse ([Colenco 2009], [GRS 2009b]) beschreiben die Szenarien dabei in qualitativer Weise einen möglichen Systemzustand nach Verschluss des Endlagers und eine mögliche anschließende Systementwicklung; sie bezeichnen zudem die für diesen Zustand und diese Entwicklung zu untersuchende Art des Radionuklidtransports.

Szenario: Klasse von möglichen Systemzuständen und Systementwicklungen, bei denen das Barrierensystem qualitativ gleich wirkt, mit Spezifikation der zu untersuchenden Art des Radionuklidtransports (in Lösung oder in der Gasphase)

Systemzustände und Systementwicklungen, welche dem gleichen Szenario angehören, können sich quantitativ unterscheiden. Bei der Entwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ betreffen solche quantitativen Unterschiede z. B. die Rate des Lösungszutritts (und damit die Dauer bis zum Volllaufen der Restgrube), die Gasbildungsrate in den verschiedenen Grubenbereichen oder die Konvergenzraten der Grubenbaue in den verschiedenen Grubenbereichen. Qualitativ gleiche, aber quantitativ unterschiedliche Systemzustände und Systementwicklungen werden mit Varianten eines Szenarios bezeichnet.

Variante: Systemzustand und Systementwicklung entsprechend einem bezeichneten Szenario mit zusätzlicher quantitativer Spezifikation aller Merkmale des Systemzustands und der Systementwicklung

Beim quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit werden für verschiedene Szenarien die potenziellen Auswirkungen von repräsentativen Varianten ermittelt. Deren Wahl erfolgt derart, dass die ermittelten Auswirkungen repräsentativ für das zugehörige Szenario sind. Da die Wahl der repräsentativen Variante im Allgemeinen von der zu untersuchenden Art des Radionuklidtransports abhängt, ist die oben dargelegte Definition des Begriffs „Szenario“ mit Spezifikation der zu untersuchenden Art des Radionuklidtransports zweckmäßig<sup>17</sup>.

Die in den Langzeitsicherheitsanalysen für das ERAM betrachteten Szenariengruppen sind folgende:

	„trockene Grube“	„mit relevantem Lösungszutritt“
Natürliche Entwicklung Radionuklidtransport in Lösung	—	☀
Natürliche Entwicklung Radionuklidtransport in Gasphase	☀	☀
Entwicklung mit menschlichem Einwirken Radionuklidtransport in Lösung und in Gasphase	☀	☀

<sup>16</sup> Ein beabsichtigtes menschliches Eindringen stünde – im Gegensatz zu einem unbeabsichtigten Eindringen – in der vollen Verantwortung der das Eindringen planenden und ausführenden Institutionen und ist deshalb nicht Gegenstand eines Langzeitsicherheitsnachweises.

<sup>17</sup> Die hier verwendete Definition des Begriffs „Szenario“ weicht durch die zusätzliche Festlegung der zu untersuchenden Art des Radionuklidtransports von der international gebräuchlichen Definition ab.

Das Referenzszenario und der Referenzfall sind in den Langzeitsicherheitsanalysen für das ERAM wie folgt definiert:

Referenzszenario: Szenario aus der Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung“, das den erwarteten Systemzustand und die erwartete Systementwicklung unter den die Szenariengruppe definierenden Voraussetzungen beschreibt

Referenzfall: Variante des Referenzszenarios mit den erwarteten quantitativen Merkmalen des Systemzustands und der Systementwicklung (Referenzwerte der Systemparameter)

Ungewissheiten in Bezug auf den Systemzustand, die künftige Systementwicklung und die quantitative Wirkung von Prozessen, welche nicht behoben werden konnten, werden durch Betrachtung von mehreren Szenarien und Varianten und die Ermittlung der entsprechenden potenziellen Auswirkungen des ERAM gewürdigt. Die entsprechenden Konsequenzanalysen können dabei folgendes zeigen:

- (1) Die Ungewissheit hat keinen oder höchstens einen geringen Einfluss auf die potenziellen Auswirkungen des ERAM und ist deshalb ohne Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN).
- (2) Szenarien bzw. Varianten, welche sich in Bezug auf einen ungewissen Sachverhalt, die ungewisse Wirksamkeit eines Prozesses oder eines Ereignisses bzw. eines ungewissen Parameterwertes unterscheiden, ergeben in systematischer Weise unterschiedliche potenzielle Auswirkungen des ERAM. Systematisch heißt hier, dass z. B. die starke Wirkung eines Prozesses bei jedem Szenario und bei jeder Variante zu einer Erhöhung der berechneten Strahlenexposition führt. Diese Ungewissheit wird – im Rahmen der praktischen Vernunft – durch eine ungünstige Annahme zum Sachverhalt, zur Wirksamkeit des Prozesses, zum Eintreten des Ereignisses bzw. zum Parameterwert im LZSN berücksichtigt.

Je nach der Plausibilität der ungünstigen Annahme und ihrer Auswirkung auf die berechneten Auswirkungen des ERAM wird die ungünstige Annahme für alle im LZSN betrachteten Szenarien bzw. Varianten getroffen oder nur für einen Teil davon.

- (3) Szenarien bzw. Varianten, welche sich in gleicher Weise wie unter (2) in Bezug auf eine Ungewissheit unterscheiden, ergeben zwar unterschiedliche potenzielle Auswirkungen des ERAM, jedoch nicht in systematischer Weise. Dieser Fall liegt z. B. vor, wenn die starke Wirksamkeit eines Prozesses in einer Variante zu einer Erhöhung der berechneten Strahlenexposition, in einer anderen Variante zu einer Erniedrigung der Strahlenexposition führt.

In diesem Fall wird die Ungewissheit im LZSN für jedes Szenario bzw. Variante durch weitere Fallunterscheidungen, d. h. die Betrachtung von entsprechenden zusätzlichen Szenarien bzw. Varianten, berücksichtigt. Im betrachteten Beispiel wird jede Variante durch eine weitere Variante ergänzt, wobei der Prozess mit ungewisser Wirksamkeit in der einen Variante als stark, in der anderen als schwach wirkend angenommen wird.

In den nachfolgenden Kapiteln wird das Konzept für die Sicherheitsanalysen spezifisch für die drei Gruppen von Szenariengruppen

- Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung
- Natürliche Entwicklung / trockene Grube oder mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Gasphase
- Entwicklung mit menschlichem Einwirken / trockene Grube oder mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung oder in Gasphase

dargelegt.

### 3.4.1 Freisetzung von Radionukliden in Lösung

Die radiologische Langzeitsicherheitsanalyse in Bezug auf den ausreichenden Einschluss der mit den Abfällen eingelagerten Radionuklide für die Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung“ erfolgt (i) durch eine Analyse der möglichen Zustände des Endlagersystems nach Verschluss des Endlagers und der möglichen Entwicklungen in der Phase nach Verschluss des Endlagers (Szenarienanalyse) sowie (ii) durch deterministische und probabilistische Modellrechnungen zur Mobilisierung und zum Transport von Radionukliden bis in die Biosphäre für verschiedene Szenarien (Konsequenzenanalyse). Die Modellrechnungen zum Radionuklidtransport bis in die Biosphäre wurden parallel und unabhängig voneinander mit zwei verschiedenen Modellen und Rechenprogrammen durchgeführt.

Die möglichen Lösungszutritte in das Grubengebäude, die möglichen Austrittspfade von Lösung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein und die möglichen Langzeitentwicklungen in der Geosphäre wurden in einer formellen und systematischen Szenarienanalyse für die Geosphäre dargestellt ([BGR 2002] und dort aufgeführte frühere Arbeiten). Basis für diese Arbeiten waren u. a. auch Listen mit Sachverhalten, Ereignissen und Prozessen (FEP).

Die Szenarienanalyse für das Teilsystem Grubengebäude und für den Radionuklidtransport vom Grubengebäude durch das Hutgestein und das Deckgebirge bis in die Biosphäre erfolgte auf der Basis einer Beschreibung des erwarteten Zustands des Systems und der erwarteten künftigen Systementwicklung durch Analyse der möglichen sicherheitsrelevanten Abweichungen von diesem Zustand und dieser Systementwicklung. Im Gegensatz zur Szenarienanalyse für die Geosphäre wurde dieser Prozess nicht formell und vorlaufend zur Konsequenzenanalyse, sondern parallel zu dieser durchgeführt. Die Vollständigkeit der Analyse wurde durch den Einbezug von zahlreichen Sachverständigen der unterschiedlichsten Fachdisziplinen mit Erfahrung auf dem Gebiet der Langzeitsicherheitsanalyse für Endlager erreicht. Das Ergebnis der Szenarienanalyse für das Grubengebäude und den Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge ist in den beiden Berichten zur Konsequenzenanalyse [Colenco 2009] und [GRS 2009b] dargelegt. Angesichts der relativ wenigen für den Nachweis der Langzeitsicherheit tatsächlich relevanten FEP wird dieses Vorgehen als angemessen beurteilt.

Die qualitative Beschreibung des erwarteten Zustands des Systems „Endlager Morsleben“ und dessen erwartete zukünftige Entwicklung unter den Voraussetzungen der betrachteten Szenariengruppe, d. h. des Referenzszenarios, und der zu betrachtenden Abweichungen vom Referenzszenario, d. h. der alternativen Szenarien dieser Szenariengruppe, bildet die Grundlage für die Konsequenzenanalyse im Hinblick auf die Radionuklidfreisetzung in Lösung. Für den quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit werden die relevanten Prozesse mit vereinfachten Algorithmen und Modellparametern mathematisch beschrieben und in Rechenmodellen zusammengefasst. Die Algorithmen müssen abdeckend sein, und die Parameter sollen messbar sein oder auf messbare Größen zurückgeführt werden können. Die beiden zur Anwendung gelangenden Modelle sind so konzipiert, dass möglichst wenig Hypothesen gemacht werden müssen (z. B. über den Zutrittsort der Wässer aus dem Hutgestein, die Reihenfolge des Volllaufens der verschiedenen Grubenteile, den Weg der kontaminierten Lösung von den Einlagerungsbereichen zum Austrittsort in das Hutgestein usw.). Dies bedingt einen hohen Grad an Abstraktion und die Vernachlässigung gewisser Prozesse, die Radionuklide zusätzlich zurückhalten oder deren Transport verzögern.

Die starke Abstraktion und die Vernachlässigung gewisser günstiger Prozesse ermöglicht es, trotz der Komplexität des Grubengebäudes die Zahl der explizit zu analysierenden Varianten zu begrenzen und eine Vielzahl von möglichen Entwicklungen – einschließlich alternativer Szenarien – als Parametervariation des Referenzfalls abdeckend zu analysieren.

Das Referenzszenario und die alternativen Szenarien werden mit deterministischen Modellrechnungen analysiert, d. h. für speziell gewählte Sätze von Systemparametern (Referenzfall und Varianten). Dabei werden auch charakteristische Abweichungen von den erwarteten quantitativen Systemzuständen und -entwicklungen untersucht. Probabilistische Modellrechnungen, d. h. Modellrechnungen mit stochastisch gewählten Systemparametern, ergänzen die deterministischen Rechnungen. Sie zeigen die Auswirkungen von simulta-



nen Variationen mehrerer Systemparameter und dadurch die Bedeutung von verschiedenen möglichen Zuständen und Entwicklungen des Endlagersystems sowie der noch verbleibenden Ungewissheiten in Bezug auf die maßgebenden Systemparameter.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen stellen keine Prognosen der tatsächlichen künftigen Auswirkungen des Endlagers dar, da

- die Modellrechnungen Szenarien und zugehörige Varianten betreffen, deren Eintreten unterstellt und zu deren Eintrittswahrscheinlichkeit keine Aussage gemacht wird,
- diese Szenarien und Varianten zudem auf verschiedenen ungünstigen und vereinfachenden Annahmen beruhen und immer zu einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre führen und
- die Modellrechnungen mit pessimistischen Vereinfachungen und Näherungen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen entsprechen vielmehr oberen Grenzen für die Auswirkungen der durch die Systemparameter charakterisierten Zustände und Entwicklungen des Systems „Endlager Morsleben“. Insbesondere entsprechen die probabilistischen Modellrechnungen nicht einer probabilistischen Sicherheitsanalyse im strengen Sinne. Die Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen sind Aussagen zur bedingten Wahrscheinlichkeit, mit der die mögliche, durch das ERAM verursachte Strahlenexposition einen vorgegebenen Wert, z. B. einen geringen Wert von 0,01 mSv/a oder das Schutzziel 0,3 mSv/a, überschreiten wird (d. h. die Wahrscheinlichkeit unter gewissen postulierten Voraussetzungen).

In den Modellrechnungen für die verschiedenen Szenarien und deren Varianten werden die Sachverhalte und Prozesse berücksichtigt, die mit den Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des ERAM angestrebt werden (vgl. Kapitel 3.2.2). Ausgenommen davon ist die generelle, nicht gezielte Behinderung der Lösungsbewegung und damit auch des Radionuklidtransports durch die weitgehende Vollverfüllung (Punkt (6) in Kapitel 3.2.2). Dies ist einer der günstigen Prozesse, die beim Nachweis der Langzeitsicherheit unberücksichtigt bleiben. Abstrahierend wird angenommen, dass kontaminierte Lösung aus den Einlagerungsbereichen (bei den abgedichteten Einlagerungsbereichen nach Überwinden der Abdichtungen) mit lediglich geringer zeitlicher Verzögerung in das Hutgestein übertritt. Mit dieser ungünstigen Annahme sind sämtliche möglichen Transportpfade von den Einlagerungsbereichen durch das Grubengebäude zu jedem möglichen Austrittsort abdeckend berücksichtigt.

Ein in den Modellrechnungen berücksichtigter Prozess, der gemäß Kapitel 3.2.2 nicht Bestandteil des Sicherheitskonzepts ist, ist die Verdünnung von kontaminierter Lösung im Grubengebäude mit nicht kontaminierter Lösung. In den Modellen erfolgt diese Verdünnung in Grubenbauen nahe der exemplarisch unterstellten Austrittsstelle, durch die auch die Lösung fließt, die aus der übrigen Grube in das Hutgestein ausgepresst wird. Diese Grubenbaue werden zusammenfassend mit dem Begriff „Mischungsbereich“ bezeichnet. Weitere in den Modellrechnungen berücksichtigte Prozesse sind der Radionuklidtransport durch das Hutgestein und Deckgebirge mit Rückhaltung durch Sorption sowie die Verdünnung der aus der Tiefe in Oberflächennähe gelangenden radionuklidhaltigen Grundwässer im oberflächennahen Grundwasser. Die Verdünnung durch Grundwässer in größerer Tiefe während des Radionuklidtransports durch Hutgestein und Deckgebirge wird dabei implizit ebenfalls berücksichtigt.

In den Modellrechnungen und damit beim quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit vernachlässigt werden – mit zwei Ausnahmen – die Begrenzung der Mobilisierung der Radionuklide und die Verzögerung bei deren Transport durch das Grubengebäude, die als Folge von Löslichkeitsgrenzen in den Einlagerungsgrubenbauen und von Sorption an Eisenkorrosionsprodukten, Braunkohlefilteraschen-Komponenten und am Versatzmaterial stattfinden werden. Diese Prozesse werden zwar den Übertritt von gewissen Radionukliden aus dem Grubengebäude in das Hutgestein stark begrenzen und verzögern, sie können wegen der erheblichen Bandbreite des möglichen chemischen Milieus in den Einlagerungskammern und entlang der Transportpfade jedoch nicht in belastbarer Weise quantifiziert werden. Die eine Ausnahme bildet das radioaktive Kohlenstoff-Isotop  $^{14}\text{C}$ , da die Löslichkeitsgrenze des Kohlenstoffs für die im ERAM möglichen chemischen Milieus annähernd konstant ist und nichtradioaktiver Kohlenstoff in erheblichen Mengen im Endlager vorliegt. Die zweite Ausnahme bildet  $^{226}\text{Ra}$  in der Radium-VBA. Dieses ist in einem Sohlenbohrloch eingelagert, welches aus einem speziell aufgefahrenen Streckenstummel im Steinsalz am Ende des Ostquerschlags auf der



4. Sohle im ELB OF abgeteuft wurde. Der Streckenstummel wird mit Salzbeton verfüllt. Unter diesen Bedingungen sind die geochemischen Verhältnisse im Sohlenbohrloch und im Streckenstummel prognostizierbar, und die Begrenzung der Mobilisierung und des Transports von  $^{226}\text{Ra}$  durch Sorption kann bei der Sicherheitsanalyse berücksichtigt werden.

Nach Mobilisierung und chemischer Umsetzung kann  $^{14}\text{C}$  in zwei chemischen Formen vorliegen:  $^{14}\text{CO}_2$  und  $^{14}\text{CH}_4$ . Das Methan und damit auch das radioaktive Methan  $^{14}\text{CH}_4$  ist wie alle Gase in begrenzter Menge wasserlöslich; im Unterschied zu Kohlendioxid handelt es sich dabei um eine rein physikalische Löslichkeit. Sie wird durch das Henry'sche Gesetz beschrieben, d. h. die gelöste Konzentration eines Gases ist proportional zu seinem Partialdruck in der Gasphase. Im chemischen Milieu im Endlager wird das Kohlendioxid und damit auch das radioaktive Kohlendioxid  $^{14}\text{CO}_2$  in Lösung mit Hydrogencarbonat und Carbonat im Gleichgewicht stehen und zum überwiegenden Anteil in ausgefällter, zu einem sehr geringen Anteil in gelöster Form vorliegen. Der in der Gasphase verbleibende Anteil von  $^{14}\text{CO}_2$  wird gegenüber dem  $^{14}\text{CH}_4$  in der Gasphase vernachlässigbar gering sein. In Bezug auf den Transport des gelösten  $^{14}\text{CH}_4$  bis in die Biosphäre verfolgen [Colenco 2009] und [GRS 2009b] zwar das gleiche Nachweiskonzept, setzen dieses aber in unterschiedlicher Weise um. [Colenco 2009] ermittelt die Konzentration des gelösten  $^{14}\text{CH}_4$  in den Einlagerungsbereichen und behandelt diese Spezies anschließend wie die anderen Radionuklide. Entsprechend wird sein Beitrag zur potenziellen Strahlenexposition nach Ausbreitung auf dem Lösungspfad gemeinsam mit jenem der anderen Radionuklide ausgewiesen. In [GRS 2009b] wird der Transport des gelösten  $^{14}\text{CH}_4$  vom Einlagerungsbereich bis in die Biosphäre demgegenüber in einer gesonderten Modellrechnung behandelt („Ausbreitung gasförmiger Radionuklide – Methanpfad“). Der Beitrag zur potenziellen Strahlenexposition ist deshalb in den Ergebnissen von [GRS 2009b] zum Lösungspfad nicht eingeschlossen, weder in den deterministischen noch in den probabilistischen Modellrechnungen.

Die Auswahl der Radionuklide, die in den Modellrechnungen explizit berücksichtigt wurden, erfolgte aufgrund ihrer Radiotoxizität zum betrachteten Stichtag 30.06.2005, ihrer Halbwertszeit und der für das Endlager angewendeten Annahmebedingungen für Abfälle. Radionuklide mit einer Halbwertszeit von weniger als 5,3 Jahren, der Halbwertszeit von  $^{60}\text{Co}$ , wurden generell nicht explizit modelliert. Sofern sie Glied einer Zerfallsreihe sind, liegen sie im oberflächennahen Grundwasser in guter Näherung im radioaktiven Zerfallsgleichgewicht mit ihrem Vorläuferradionuklid vor. Dies erlaubt den impliziten Einbezug ihrer radiologischen Wirkung. In gleicher Weise werden auch Tochternuklide mit längerer Halbwertszeit berücksichtigt, die nicht explizit in den Modellrechnungen behandelt werden (z. B.  $^{210}\text{Pb}$  als Tochter von  $^{226}\text{Ra}$ ). Langlebige Radionuklide, deren Radiotoxizität aufgrund ihres geringen Inventars weniger als 1% der Radiotoxizität eines Vergleichsnuklids beträgt, werden im Langzeitsicherheitsnachweis vernachlässigt. Ein Vergleichsnuklid zeichnet sich dadurch aus, dass es sich bei den Prozessen, welche zu einer Freisetzung in die Biosphäre führen, gleich oder ähnlich verhält wie das betrachtete Radionuklid.

Ausgehend von den mit den Modellrechnungen ermittelten Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser wird in einem letzten Schritt die zugehörige Strahlenexposition ermittelt. Diese Berechnung lehnt sich an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV an und erfolgt somit für stilisierte, nicht standortspezifische Verhältnisse in der Biosphäre [GSF 2002]. Die Verhältnisse in der Biosphäre sind deshalb nicht Gegenstand der Szenarienanalyse. Die ermittelte Strahlenexposition hat die Bedeutung eines Indikators. Die Langzeitsicherheit des ERAM wird durch den Vergleich der so ermittelten Strahlenexposition mit dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis bewertet.

### 3.4.2 Freisetzung von Radionukliden in der Gasphase

Gegenstand dieses Kapitels ist das Konzept für den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für die Szenariengruppen „Natürliche Entwicklung / trockene Grube oder mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Gasphase“.

Ein Transport in der Gasphase kann nur für Radionuklide stattfinden, die in volatiler Form vorliegen können. Da überdies Gas erst dann aus der Grube in das Hutgestein übertreten kann, wenn der Gasdruck in der

Grube auf den hydrostatischen Lösungsdruck im Hutgestein angestiegen ist, brauchen kurzlebige Radionuklide nicht betrachtet zu werden. In einem ersten Schritt kann deshalb die Langzeitsicherheitsanalyse in Bezug auf die Freisetzung von Radionukliden in der Gasphase aufgrund der Kriterien „chemisch ausreichend stabile volatile Verbindung“, „ausreichend lange Halbwertszeit“ und „potenziell relevante Radiotoxizität im Inventar“ auf eine einzige Verbindung,  $^{14}\text{CH}_4$ , reduziert werden.

Unter der Annahme einer raschen und weitgehenden Bildung von  $^{14}\text{CH}_4$  aus den  $^{14}\text{C}$ -haltigen organischen Abfällen wird in einem zweiten Schritt die  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration in der Gasphase berechnet.

Die Rate des Übertritts von Gas und damit von  $^{14}\text{CH}_4$  in das Hutgestein wird – in einem dritten Schritt – auf zwei unterschiedliche Arten abgeschätzt. Zum einen wird die Drosselung des Gasübertritts durch 2-Phasen-Effekte (Kapillardruck und relative, sättigungsabhängige Permeabilität) im Hutgestein mit einem Rechenprogramm für 2-Phasen-Flüsse berechnet. Dabei gelangt ein vereinfachtes Modell des Übergangsbereichs Grube-Hutgestein zur Anwendung, wobei die entsprechenden Parameter in einem weiten Bereich variiert werden. Zum anderen und als einfache Kontrolle wird die Übertrittsrate von Gas in das Hutgestein der Gasbildungsrate in den Einlagerungsbereichen gleichgesetzt.

Bei der letztgenannten Kontrollrechnung werden zudem die Transportverzögerung während des Gasanstiegs durch Hutgestein und Deckgebirge und die dabei auftretende Abnahme der  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration durch radioaktiven Zerfall und durch Lösung im Porenwasser vernachlässigt. Die berechnete Freisetzungsrate von  $^{14}\text{CH}_4$  in die Biosphäre entspricht damit der Übertrittsrate aus der Grube in das Hutgestein.

Für die Abschätzung der potenziellen resultierenden Strahlenexposition wird angenommen, dass das  $^{14}\text{CH}_4$  in der ungesättigten Bodenschicht durch mikrobielle Oxidation vollständig in  $^{14}\text{CO}_2$  umgewandelt wird. Ein Expositionspfad führt dann über die Luft, entweder über die Inhalation von  $^{14}\text{CO}_2$ -haltiger Luft oder über Lebensmittelpfade und Pflanzen, welche  $^{14}\text{CO}_2$  assimiliert haben. Neben dem Szenario, bei dem die Freisetzung von  $^{14}\text{CH}_4$  in einer landwirtschaftlich genutzten Fläche stattfindet, wird auch ein extremes Szenario untersucht, bei dem der Aufstieg des Gases in geringer Teufe im Untergrund kanalisiert wird und in den Naturkeller eines Wohnhauses gelangt. In den Modellrechnungen von [GRS 2009b] wird als weiterer Expositionspfad die Wiederauflösung des oberflächennah durch mikrobielle Oxidation gebildeten  $^{14}\text{CO}_2$  im genutzten Grundwasser und dessen Verwendung als Trinkwasser und zur Lebensmittelerzeugung betrachtet.

Die Bewertung der Ergebnisse für die potenzielle Strahlenexposition geschieht wie für die Szenarien mit Radionuklidfreisetzung in Lösung durch Vergleich mit dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Dabei hat auch in diesem Fall die ermittelte Strahlenexposition die Bedeutung eines Indikators.

### 3.4.3 Menschliches Eindringen

Als Bestandteil des Nachweises der Langzeitsicherheit eines Endlagers sind auch die potenziellen Folgen eines unbeabsichtigten<sup>16</sup> menschlichen Eindringens darzulegen und zu bewerten. Da es grundsätzlich nicht möglich ist, die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft über einen Zeitraum von Jahrhunderten bis Jahrtausenden zu prognostizieren oder auch nur einzugrenzen, werden dabei – in Übereinstimmung mit dem von der Fachwelt empfohlenen Vorgehen – heutige Verhältnisse unterstellt und ausgewählte plausible, d. h. zu begründende Szenarien analysiert [AK Szenarien 2008]. Die heutigen Verhältnisse in Bezug auf die menschliche Gesellschaft betreffen deren Motivation für ein Eindringen in das Endlager oder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich, die Technik des Eindringens, die Möglichkeit des Erkennens der „Altlast“, den Abschluss von Tätigkeiten im tiefen Untergrund (z. B. Verfüllen von Bohrungen) bis hin zum Ergreifen von Gegenmaßnahmen beim Erkennen der „Altlast“. Eine systematische Analyse aller bei unbeabsichtigtem menschlichen Eindringen denkbaren FEP, d. h. eine systematische Szenarientwicklung, ist wegen des hohen spekulativen Charakters nicht möglich.

Entsprechend diesem empfohlenen Vorgehen werden in einem ersten Schritt die am Standort des ERAM möglichen menschlichen Aktivitäten mit potenziellem Einfluss auf das Endlager und dessen Auswirkungen

beschrieben und hinsichtlich ihrer Plausibilität bewertet. In einem zweiten Schritt wird anschließend für die plausiblen menschlichen Aktivitäten untersucht, ob und ggf. unter welchen Bedingungen diese zu einer nennenswerten Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager in die Biosphäre führen können.

Die Analyse ergibt, dass am Standort des ERAM lediglich das Abteufen einer Bohrung in einen abgedichteten Einlagerungsbereich sowohl als plausible Möglichkeit zu betrachten ist als auch – unter sehr ungünstigen Annahmen – zu einer untersuchungswürdigen Freisetzung von Radionukliden führen kann, allerdings erst nach der Aufgabe und dem Verfüllen der Bohrung. Weiter ergibt die Analyse, dass die Tätigkeiten plausiblerweise mit Explorationsbohrungen beginnen, dass dabei die Existenz einer Altlast erkannt und folglich auf weitere Erkundungen bzw. die ursprünglich beabsichtigte Nutzung verzichtet wird. Im ungünstigsten Fall trifft die Explorationsbohrung den abgedichteten Einlagerungsbereich West-Südfeld. Für diesen Fall werden entsprechende Bedingungen gewählt und die radiologischen Auswirkungen unter ungünstigen, stark vereinfachenden Annahmen quantitativ ermittelt. Da die Auswirkungen selbst für die getroffenen ungünstigen Annahmen sehr gering sind, reicht die Ermittlung und Bewertung der resultierenden Kollektivdosis, wodurch keine Annahmen zu den Verhältnissen in der Biosphäre notwendig sind. Die Bewertung wird ergänzt durch die Berechnung und Bewertung der potenziellen Strahlenexposition einer Einzelperson für einen einfachen Expositionspfad (Individualdosis).

Bei der Bewertung der potenziellen Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens ist zu berücksichtigen, dass gerade der beabsichtigte wirksame Einschluss der Radionuklide dazu führt, dass die Radionuklidkonzentration im Endlager bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich – abgesehen von der Abnahme durch radioaktiven Zerfall – über lange Zeiten hoch bleibt. Bei einem Eindringen werden deshalb unvermeidlich hohe Radionuklidkonzentrationen angetroffen.

#### **3.4.4 Gewährleistung der Unterkritikalität**

Die Gewährleistung der anhaltenden Unterkritikalität des spaltbaren Materials in der Phase nach Verschluss des Endlagers kann wegen des geringen Inventars der spaltbaren Radionuklide im ERAM sehr einfach über das Inventar und dessen Vergleich mit den radionuklidspezifischen kleinsten kritischen Massen nachgewiesen werden.

## 4 MÖGLICHE SYSTEMENTWICKLUNGEN UND RELEVANTE PROZESSE

### 4.1 ZUSTAND DES SYSTEMS „ENDLAGER MORSLEBEN“ NACH ABSCHLUSS DER VERSCHLUSSMAßNAHMEN

Der Zustand des Systems „Endlager Morsleben“ unmittelbar nach Verschluss des Endlagers ergibt sich, ausgehend vom heutigen, in Kapitel 2.3 dargelegten Zustand der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, durch das Umsetzen der in Kapitel 3.3.2 beschriebenen Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen der Anlage. Er lässt sich im Hinblick auf die Langzeitsicherheit wie folgt charakterisieren:

Die beiden Grubengebäude Bartensleben und Marie sind durch den weitgehenden Versatz mit Salzbeton gebirgsmechanisch stabilisiert.

Durch die errichteten Abdichtungen wird die Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie hydraulisch in drei Teile unterteilt, den Einlagerungsbereich West-Südfeld (ELB WSF), den Einlagerungsbereich Ostfeld (ELB OF) und die Restgrube. Die beiden genannten Einlagerungsbereiche enthalten die meisten Abfälle und die größten langzeitrelevanten Radionuklidinventare (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.3, speziell Abbildung 2-5). In der Restgrube sind radioaktive Abfälle in geringeren Mengen im Nordfeld und in sehr geringen Mengen im Zentralteil eingelagert. Diese Abfälle sind von den übrigen Grubenbauen der Restgrube nicht in hydraulisch relevanter Weise getrennt. Die beiden Einlagerungsgrubenbaue im Nordfeld werden zusammenfassend mit Einlagerungsbereich Nordfeld (ELB NF), die Einlagerungshohlräume im Zentralteil mit Einlagerungsbereich Zentralteil (ELB ZT) bezeichnet. Die Restgrube ohne die beiden Einlagerungsbereiche NF und ZT wird – wo die Unterscheidung von Bedeutung ist – mit „übrige Grube“ (in [GRS 2009b] mit „sonstige Restgrube“) bezeichnet.

Der Porenraum der Abdichtbauwerke wie auch jener der verbliebenen Auflockerungszone um die Abdichtbauwerke sind lösungsgefüllt. Solange die Druckdifferenz über eine Abdichtung niedriger ist als der Gaseindringdruck von Abdichtbauwerk oder Auflockerungszone, ist die Abdichtung für Gas undurchlässig.

Der Schacht Bartensleben führt in den ELB WSF, der Schacht Marie in die Restgrube (Grubengebäude Marie). Die beiden Schächte sind mit Verschlussbauwerken versehen. Dichtelemente und verbliebene Auflockerungszone sind ebenfalls lösungs gesättigt<sup>18</sup>.

Die Steinsalz-Barriere zwischen dem ELB WSF und dem Hutgestein/Deckgebirge zum einen und der Restgrube zum anderen ist – abgesehen von dem verschlossenen Schacht Bartensleben und dem abgedichteten System aus Verbindungsstrecken und Wetterrolllöchern – intakt und damit dicht. Die Steinsalz-Barriere zwischen dem ELB OF und dem Hutgestein/Deckgebirge ist ebenfalls intakt und dicht. Die vollständige hydraulische Trennung des ELB OF von der Restgrube durch eine undurchlässige Salinar-Barriere kann nicht nachgewiesen werden. Obgleich wenig wahrscheinlich, ist nicht auszuschließen, dass entlang des Hauptanhydrit eine hydraulisch wirksame Wegsamkeit vom ELB OF in die Restgrube führt (Abbildung 3-6).

Über den Lösungszutritt in das Lager H fließt dem Grubengebäude Marie (Restgrube) heute – und wahrscheinlich auch noch nach Verschluss des Endlagers – mit geringer Rate Lösung zu. Die Strecken zwischen den beiden Grubengebäuden Bartensleben und Marie sind mit erhöhtem technischen Aufwand verfüllt. Eine hydraulische Trennung wie jene zwischen dem ELB WSF und der Restgrube kann aufgrund der geologischen und bergbaulichen Gegebenheiten jedoch nicht garantiert werden. Die dem Grubengebäude Marie zutretende Lösung dringt aber nicht zwangsläufig bis in die Grube Bartensleben vor. Der ELB NF liegt – obwohl zum Grubengebäude Bartensleben gehörend – nördlich der mit erhöhtem Aufwand verfüllten Strecken zwischen Bartensleben und Marie, d. h. auf der Seite Marie. Der ELB ZT liegt südlich dieser Strecken, d. h. auf der Seite Bartensleben.

<sup>18</sup> In Bezug auf die Auflockerungszone trifft diese Aussage zumindest im Hutgestein zu.



Trotz der Verfüllmaßnahmen kann das Entstehen von einem oder mehreren weiteren Lösungszutritten aus dem Hutgestein in die Restgrube während der Phase nach Verschluss des Endlagers nicht ausgeschlossen werden. In der Grube Bartensleben besteht die Möglichkeit eines künftigen, neu entstehenden Lösungszutritts dort, wo die Auflockerungszone der Grubenbaue und der Hauptanhydrit an der Westflanke der Hauptmulde in hydraulischem Kontakt stehen (Abbildung 3-6). Mögliche Zutrittsorte lassen sich allerdings nicht noch genauer eingrenzen. Die genannte Bedingung für einen Lösungszutritt ist für die abgedichteten Einlagerungsbereiche nicht erfüllt. Ein direkter Lösungszutritt aus dem Hutgestein oder über die Flanke aus dem Deckgebirge in einen der abgedichteten Einlagerungsbereiche kann deshalb ausgeschlossen werden.

Auf der 3. und 4. Sohle sind die beiden Feldesteile Westfeld und Südfeld, welche zusammen den ELB WSF bilden, durch Abdichtungen getrennt. Zwischen den beiden Feldesteilen besteht allerdings eine hydraulisch gut durchlässige Verbindung (mit Schotter verfülltes Großbohrloch), welches von der 3. Sohle im Westfeld ansteigend zur 1. Sohle des Südfeldes führt (Abbildung 3-2). Entlang dieses Großbohrlochs kann Gas, das im Westfeld gebildet wird, in das Südfeld entweichen.

Durch die weitgehende Verfüllung der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie mit Salzbeton wurde das unverfüllte Hohlraumvolumen in allen Grubenbereichen erheblich verringert. Da der früher eingebrachte Altversatz in den Gruben belassen wird, besteht der Versatz z. T. auch aus Salzversatz (Salzgrus). Während der Salzbeton praktisch als nicht kompaktierbar betrachtet werden kann, ist Salzversatz kompaktierbar. Die eingelagerten Abfälle sind teilweise kompaktierbar, teilweise nicht kompaktierbar. In den Modellrechnungen zum LZSN wird das Abfallvolumen dem mit Salzversatz verfüllten Volumen zugerechnet. Unverfüllte Hohlräume und mit Salzversatz verfüllte Bereiche von Grubenbauen unterliegen der Konvergenz. Tabelle 4-1 enthält die Konturvolumen<sup>19</sup>, d. h. die kumulierten Gesamtvolumen aller Grubenbaue, sowie die prozentualen Volumenanteile mit unterschiedlichem Versatz in den verschiedenen Grubenteilen.

Tabelle 4-1: Konturvolumen und Volumenanteile mit unterschiedlichem Versatz in den verschiedenen Grubenteilen, wobei die Abfälle dem kompaktierbaren Versatz zugerechnet sind.

	Kontur- volumen in m <sup>3</sup>	Volumenanteile in %		
		unverfüllt	kompaktierbar verfüllt	mit Salzbeton verfüllt
ELB WSF, gesamt	1,34 Mio.	23	38	39
- Westfeld	82 000	3	72	25
- Südfeld	1,26 Mio.	25	36	39
ELB OF	307 000	21	19	60
ELB ZT	66 000	5	49	46
ELB NF	2 100	20	80	0,24
Übrige Grube, gesamt	7,01 Mio.	16	27	57
- Übrige Grube Bartensleben	4,41 Mio.	18	8	74
- Übrige Grube Marie	2,60 Mio.	12	58	30
Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie insgesamt	8,72 Mio	17	29	54

<sup>19</sup> Das Konturvolumen eines Grubenbaus ist das aktuelle geometrische Volumen, das durch die Sohle, die Stöße und die Firste des Gubenbaus eingeschlossen wird. Es ist das aufgefahrene und das durch Nachschnitt geschaffene Hohlraumvolumen abzüglich des in der Vergangenheit durch Konvergenz „verschwundenen“ Volumens.

Der Porenraum des Salzbetons ist lösungsgesättigt. Die Lösung im Porenvolumen des Salzbetons ist wenig mobil, da intakter Salzbeton eine geringe Permeabilität aufweist. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Salzbetonversatz in den einzelnen Grubenbauen in relativ großen Blöcken vorliegt, die höchstens von wenigen mäßig permeablen Rissen und Fugen durchzogen sind.

Mit dem Salzbetonversatz kann auch eine gewisse Menge an Überschusslösung in die Grube eingebracht werden. Diese sammelt sich in unverfüllten Hohlräumen und im Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes. Zusammen mit der Feuchte, welche vor dem Einbringen des Salzbetons in der Grube vorhanden ist, bestimmt sie den Lösungsgehalt in den unverfüllten Hohlräumen und im kompaktierbaren Versatz unmittelbar nach Verschluss des Endlagers. Da der Altversatz und die Abfälle vor dem Umsetzen der Verfüllmaßnahmen eine geringe Feuchte aufweisen und der Salzbeton so eingebracht wird, dass höchstens geringe Mengen an Überschusslösung entstehen, liegt die anfängliche Lösungsmenge im Bereich von wenigen Prozent des Porenvolumens im kompaktierbaren Versatz. Die Porosität des kompaktierbaren Versatzes ist unmittelbar nach Verschluss des Endlagers örtlich unterschiedlich und im Mittel relativ hoch (rund 40 %).

Unmittelbar nach Verschluss des Endlagers weisen sowohl die Restgrube (übrige Grube + ELB ZT + ELB NF) als auch die abgedichteten Einlagerungsbereiche WSF und OF große luftgefüllte Volumen in den unverfüllten Bereichen und im Porenraum des kompaktierbaren Versatzes auf. Diese mit Luft gefüllten Volumina betragen rund

Restgrube	2,2 Mio. m <sup>3</sup>
Einlagerungsbereich WSF	540 000 m <sup>3</sup>
Einlagerungsbereich OF	87 000 m <sup>3</sup>

Unmittelbar nach Verschluss des Endlagers entspricht der Druck der in diesen Volumina eingeschlossenen Luft dem Atmosphärendruck. Er ist damit erheblich niedriger als der Grundwasserdruck im Hutgestein, mit Ausnahme vom Grundwasserdruck im Hutgestein in Schachtnähe während einiger Zeit nach Einbau der Schachtverschlüsse.

Innerhalb der drei Teile der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, Restgrube, ELB WSF und ELB OF, können vielerorts hydraulische Verbindungen zwischen benachbarten Grubenbauen über aufgelockerte Pfeiler und Schweben bestehen. Der weitgehende Versatz mit Salzbeton, der örtlich auch außerhalb der Abdichtungen firstbündig ausfallen wird, bewirkt in Verbindung mit den bestehenden Auflockerungszonen im Salzgebirge, dass in den drei genannten Grubenteilen in nicht prognostizierbarer Weise hydraulische Wegsamkeiten zu unterstellen sind, wobei diese Wegsamkeiten allerdings über größere Distanzen nennenswerte hydraulische Widerstände aufweisen dürften. Ein belastbarer Nachweis für großräumige Fließwiderstände innerhalb der Restgrube und innerhalb der beiden abgedichteten Einlagerungsbereiche ist jedoch nicht möglich. Der quantitative Nachweis der Langzeitsicherheit stützt sich deshalb nicht auf diesen Fließwiderständen ab. Die einzigen, im quantitativen Langzeitsicherheitsnachweis belasteten Fließwiderstände im Grubengebäude sind jene der Schachtverschlüsse (streng genommen nur jener des Schachtes Bartensleben), der Abdichtungen zwischen den abgedichteten Einlagerungsbereichen WSF bzw. OF und der Restgrube sowie der eventuellen Wegsamkeiten im Hauptanhydrit zwischen dem ELB OF und der Restgrube.

## **4.2 SYSTEMENTWICKLUNG BEI ANNAHME UNVERÄNDERT FORTBESTEHENDER ÄUßERER RANDBEDINGUNGEN**

### **4.2.1 Systementwicklung „trockene Grube“**

Unter der Bezeichnung „trockene Grube“ werden hier die möglichen Systementwicklungen zusammengefasst, bei denen sich aufgrund der Verfüllmaßnahmen keine weitere hydraulische Wegsamkeit aus dem Hutgestein in die Restgrube bildet und der bestehende Lösungszutritt in das Lager H der Grube Marie abnimmt

und schließlich endet. In [GRS 2009b] werden diese möglichen Systementwicklungen als ungestörte Entwicklungen bezeichnet.

Durch Korrosion von Metallen und mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen bildet sich in den Einlagerungsbereichen und in der übrigen Grube Gas, vorwiegend Wasserstoff ( $H_2$ ), Kohlendioxid ( $CO_2$ ) und Methan ( $CH_4$ ). Beide Gas bildenden Prozesse setzen die Anwesenheit von Wasser entweder in flüssiger Phase (Lösung) oder in Gasphase (feuchte Atmosphäre) voraus. Die Gasbildung hält so lange an, bis die Gas bildenden Stoffe aufgebraucht sind oder die Feuchte am Ort der Gas bildenden Stoffe zu stark abgesunken ist.

Durch Konvergenz der Grubenbaue verringern sich deren Konturvolumen. Dadurch nehmen die Volumen der unverfüllten Hohlräume und die Porenvolumen der kompaktierbar verfüllten Bereiche in den Grubenbaue ab. Durch den Lösungszutritt in das Lager H verringert sich das gaszugängliche Volumen in der Restgrube (Marie) zusätzlich. Als Folge der Gasbildung und der abnehmenden gaszugänglichen Volumen steigt der Druck der Gasphase an, aufgrund der Gaseindringdrücke der Abdichtungen (vgl. Kapitel 4.1) mindestens während einer gewissen Zeit nach Verschluss des Endlagers unabhängig in den drei Grubenteilen Restgrube, ELB WSF und ELB OF. Erst wenn der Druckunterschied zwischen zwei Teilen den Gaseindringdruck einer der trennenden Abdichtungen übersteigt, kann ein Gasfluss zwischen den beiden Teilen einsetzen. Aufgrund der vollständigen Lösungssättigung des Schachtverschlusses nach Verschluss des Endlagers (vgl. Kapitel 4.1) kann auch kein Gas entlang des verschlossenen Schachts entweichen, obwohl der Grundwasserdruck im Hutgestein nahe des Schachts während einiger Zeit nach Verschluss des Endlagers noch niedrig ist.

Mit abnehmender Porosität übt der kompaktierbare Versatz eine zunehmende Stützwirkung aus. Dies und der ansteigende Gasdruck verlangsamen die Konvergenz der Grubenbaue.

Der ansteigende Gasdruck in der Restgrube (Grube Marie) verringert auch den Lösungszutritt in das Lager H. Sofern der Lösungszutritt nicht schon vorher durch eine Rückbildung der Wegsamkeit in der Steinsalz-Barriere als Folge der Konvergenz und der Verfüllung der Abbaue in der Nähe vollständig aufgehört hat, endet er, sobald der Gasdruck in der Restgrube den Wert des hydrostatischen Lösungsdrucks an der Basis des Hutgesteins erreicht. Mit den Referenzwerten der maßgebenden Parameter und bei gegenüber heute unveränderten Randbedingungen dauert die Entwicklung bis zu diesem Zeitpunkt länger als 30 000 Jahre.

Je nach Wirksamkeit der Verfüllung zwischen den Gruben Marie und Bartensleben (vgl. Kapitel 4.1) bleibt die während dieser Zeit aus dem Deckgebirge über das Lager H zugetretene Lösung zu einem mehr oder weniger großen Anteil in der Grube Marie. Sowohl in der Grube Marie als auch in der Restgrube Bartensleben sind die obersten Bereiche zu diesem Zeitpunkt mit einem Grubenluft-Gas-Gemisch<sup>20</sup> gefüllt.

Als Folge der fortschreitenden Konvergenz steigt der Gasdruck in der Restgrube weiter an. Sofern die Wegsamkeit vom Lager H in das Hutgestein noch besteht, setzt nach Überschreiten des Gaseindringdrucks der Wegsamkeit im Salinar und im Hutgestein der Austritt von Gas aus der Restgrube ein. Falls sich die Wegsamkeit vom Lager H in das Hutgestein zurückgebildet hat, bleibt das Gas weiterhin eingeschlossen und der Druckanstieg in der Restgrube hält weiter an, wegen der abnehmenden Rate der Konvergenz aber immer langsamer.

Wenn der Gasdruck in der Restgrube oder in den abgedichteten Einlagerungsbereichen über den örtlichen Gebirgsdruck im obersten Bereich der jeweiligen Grubenteile ansteigt, wird es dort zur Bildung von Gaswegsamkeiten kommen. Diese können als ausgedehntes System von Mikrorissen mit relativ geringer, gegenüber dem intakten Steinsalz jedoch erhöhter Permeabilität, oder als einzelne makroskopische Risse mit hoher Transmissibilität (Frac) ausgebildet sein. Über diese Wegsamkeiten fließt dann Gas aus dem Grubenteil ab, wobei der Druckanstieg endet. Der Wissensstand über die Bildung von Gaswegsamkeiten im Steinsalz ist noch nicht ausreichend, um die Frac-Bildung mit Sicherheit auszuschließen, stattdessen die Mikroriss-Bildung nachzuweisen und in einem Sicherheitsnachweis zu unterstellen. Es kann heute lediglich plausibel begründet werden, dass bei einem langsamen Druckanstieg die Mikroriss-Bildung, bei einem schnellen<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> Das Gas-Luft-Gemisch wird nachfolgend vereinfachend mit dem Begriff „Gas“ bezeichnet.

<sup>21</sup> im ERAM nicht möglichen

Druckanstieg die Frac-Bildung wahrscheinlicher ist [Popp 2007]. Da die Frac-Bildung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit ungünstigere Auswirkungen hat, wird diese in den Modellrechnungen trotz der geringeren Plausibilität in den Fällen unterstellt, bei denen ein entsprechender Druckanstieg eintritt.

Bei der Systementwicklung „trockene Grube“ gelangen definitionsgemäß keine relevanten Lösungsmengen mit den Abfällen in Kontakt. Eine Mobilisierung von Radionukliden in Lösung erfolgt unter diesen Bedingungen nicht. Ein Austritt von Radionukliden aus dem Endlager kann höchstens in der Gasphase erfolgen. Dies setzt jedoch die Bildung von Gaswegsamkeiten vom Grubengebäude in das Hutgestein voraus. Im Zusammenhang mit der Entwicklung „trockene Grube“ ist deshalb ein entsprechender Druckanstieg im Grubengebäude und die Bildung eines Systems von Mikrorissen oder die wenig plausible Frac-Bildung Voraussetzung für einen Übertritt von Radionukliden aus dem Grubengebäude in das Hutgestein. In Kapitel 3.4.2 wurde ausgeführt, dass im Zusammenhang mit dem Gaspfad nur das radioaktive Methan ( $^{14}\text{CH}_4$ ) zu betrachten ist.

Die Entstehung von Gaswegsamkeiten im Steinsalz in Form von Mikroriss-Systemen ist reversibel [Popp 2007]: Sobald der Gasdruck wieder abfällt, verschließen sich die Mikrorisse wieder und verheilen nach einiger Zeit sogar. Bei der in der Langzeitsicherheitsanalyse unterstellten Frac-Bildung wird Reversibilität nicht angenommen. Es wird unterstellt, dass eine durch Frac-Bildung entstehende hydraulische Wegsamkeit zwischen dem Grubengebäude und dem Hutgestein nach dem Druckabfall im Grubengebäude einen Lösungszutritt in das Grubengebäude ermöglicht. Bei einer Frac-Bildung geht die Systementwicklung „trockene Grube“ nach einiger Zeit in die Entwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ (Kapitel 4.2.2) über<sup>22</sup>.

Die Lasten, denen die beiden Schachtverschlüsse bei der Systementwicklung „trockene Grube“ ausgesetzt sind, sind der Gebirgsdruck durch das auflaufende Gebirge, die chemische Beeinflussung durch das Grundwasser im Hutgestein (und beim Schacht Bartensleben im Deckgebirge) sowie die Differenz der Fluiddrücke auf der Grubenseite einerseits und an der Grenze zum Hutgestein/Deckgebirge andererseits. Diese Druckdifferenz wechselt im Verlauf der Phase nach Verschluss des Endlagers das Vorzeichen; zuerst ist der Druck im Hutgestein größer, später jener im Grubengebäude. Wie die Modellrechnungen zeigen, kann sie mehrere MPa erreichen (vgl. Kapitel 6.5). Gleichbleibend ist, dass auf der Grubenseite Gas ansteht, an der Grenze zu Hutgestein/Deckgebirge Lösung.

## 4.2.2 Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“

Unter dem Begriff „mit relevantem Lösungszutritt“ werden die Systementwicklungen zusammengefasst, bei denen der Lösungszutritt in das Lager H der Grube Marie andauert, höchstens gebremst durch den ansteigenden Fluiddruck in der Grube, und/oder bei denen durch gebirgsmechanische Verformungen eine neue Wegsamkeit zwischen Hutgestein und Grubengebäude entsteht, entlang der Lösung in erheblicher Menge in das Grubengebäude zutritt. Die Prozesse, die bei diesen Entwicklungen auftreten und die die Entwicklungen bestimmen, sind ausführlich in [Colenco 2009] und [GRS 2009b] beschrieben.

### Lösungszutritt in die Restgrube

Lösungszutritte sind nur in die Restgrube und – in der Grube Bartensleben – nur in Grubenbaue möglich, die keine intakte Steinsalz-Barriere zum Hauptanhydrit an der Westflanke der Hauptmulde aufweisen (vgl. Kapitel 4.1). Ein direkter Lösungszutritt aus dem Hutgestein in einen der abgedichteten Einlagerungsbereiche

---

<sup>22</sup> Nach den Modellrechnungen zum Druckanstieg im Grubengebäude (vgl. Kapitel 6.5) ist eine Frac-Bildung frühestens nach 100 000 Jahren möglich und ein dafür erforderlicher Druckanstieg im ELB OF sehr unwahrscheinlich. Für diese späte Zeit sind bei einer Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ die Abdichtungen zwischen der Restgrube und dem ELB WSF in den Modellrechnungen zur Langzeitsicherheitsanalyse meistens, jene zum ELB OF manchmal vollständig korrodiert. Selbst eine Frac-Bildung, durch welche eine hydraulische Wegsamkeit zwischen einem abgedichteten Einlagerungsbereich und dem Hutgestein entsteht, würde damit zu einer Situation führen, die durch die Modellrechnungen zur Entwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ abgedeckt ist.



WSF und OF kann ausgeschlossen werden. Eine weitere Eingrenzung der potenziellen Zutrittsorte ist nicht möglich.

Die Rate eines Lösungszutritts ist einerseits abhängig von der hydraulischen Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Salzstruktur, d. h. im Hauptanhydrit und ggf. im desintegrierten Steinsalz zwischen diesem und dem Grubenbau, und andererseits von der Permeabilität des Hutgesteins in der Umgebung der Wegsamkeit durch das Salinar. Von Bedeutung ist auch die Ausbildung der Grenze zwischen Salzstruktur und Hutgestein, z. B. das Fehlen oder die Existenz einer Subrosionsrinne an der Basis des Hutgesteins. Modellrechnungen haben ergeben, dass die Rate eines Lösungszutritts unter wahrscheinlichen Verhältnissen im Hutgestein und an der Grenze Hutgestein/Salzstruktur sowie bei einer sehr hohen, ungünstigen Leitfähigkeit der Wegsamkeit in der Salzstruktur einige  $10 \text{ m}^3/\text{a}$ , bei ungünstigen Bedingungen an der Grenze Hutgestein/Salzstruktur höchstens einige  $100 \text{ m}^3/\text{a}$  betragen kann (vgl. Kapitel 6.2). Diese Werte wurden unter Annahme von Atmosphärendruck in der Restgrube ermittelt. Bei höherem Gasdruck in der Grube ist die Rate des Lösungszutritts entsprechend der niedrigeren Druckdifferenz zwischen Hutgestein und Grube geringer. Bei den Modellrechnungen wurde berücksichtigt, dass sich die hydraulischen Bedingungen an der Grenze zwischen Salzstruktur und Hutgestein durch Lösungsprozesse verändern können, welche durch das eventuelle Vordringen von an NaCl untersättigter Lösung zum Salzspiegel als Folge des Lösungszutritts in das Grubengebäude (s. u.) ausgelöst werden.

Bei den genannten Zutrittsraten dauert es deutlich mehr als 1000 Jahre bis wenige 10 000 Jahre, bis die Restgrube vollgelaufen ist. Diese Angabe der Zeitspanne berücksichtigt auch die bestehenden Ungewissheiten in Bezug auf die Konvergenzrate der Grubenbaue. Sofern die mit erhöhtem technischen Aufwand verfüllten Strecken zwischen den Gruben Bartensleben und Marie (vgl. Kapitel 3.3.2) hydraulisch wirksam sind, dauert das Volllaufen von jenem Grubenteil, in den keine Lösung aus dem Hutgestein zutritt, noch länger. Nach dem Volllaufen entspricht der Lösungsdruck in der Restgrube dem hydrostatischen Druck bezogen auf den Grundwasserspiegel an der Geländeoberfläche. Auf der 3. Sohle beträgt der Lösungsdruck damit knapp 5 MPa.

Zu Beginn des Lösungszutritts wird die in die Wegsamkeit in der Salzstruktur übertretende Lösung die chemische Zusammensetzung des Grundwassers im Hutgestein nahe dem Salzspiegel aufweisen und somit an NaCl gesättigt sein. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass mit der Zeit die NaCl-Sättigung der aus dem Hutgestein in die Salzstruktur übertretenden Lösung abnimmt. Aus Modellrechnungen für die Lösungsbewegung im Hutgestein bei einem Lösungszutritt in die Restgrube, bei denen allerdings keine Nachlösung am Salzspiegel berücksichtigt wurde, lässt sich eine mit der Zeit abnehmende NaCl-Sättigung der aus dem Hutgestein übertretenden Lösung ableiten [Colenco 2001b].

Wenn die in die Salzstruktur übertretende Lösung an NaCl untersättigt ist, sättigt sie sich in Kontakt mit Steinsalz auf, wobei neue Hohlräume entstehen. Der Ort der Aufsättigung und damit der entstehenden Hohlräume hängt vom Verlauf der Wegsamkeit in der Salzstruktur und dann in der Restgrube sowie den dabei wirksamen Strömungswiderständen ab. Aufgrund der weitgehenden Verfüllung im Grubengebäude, insbesondere der Grubenbaue im Bereich der potenziellen Zutrittsstellen und der vertikalen Verbindungen zwischen den Sohlen, ist davon auszugehen, dass die Fließwiderstände im Grubengebäude zum Zeitpunkt des Übertritts von ungesättigter Lösung in die Salzstruktur größer sind als im Zuflussbereich. Dies bewirkt einen „Rückstau“ der eindringenden Lösung im Bereich des Lösungszutritts in das Grubengebäude. Durch die sich ausbildende dichtebedingte Schichtung der Lösung im „Rückstau“ und den sich am Boden des Lösungsraumes bildenden Bodenkörper aus angesammelten Lösungsrückständen erfolgt die Hohlraumbildung in erster Linie nur im Bereich oberhalb und seitlich der Zutrittsstelle in das Grubengebäude. Dieser Lösungsprozess wurde mit speziellen Modellrechnungen nachgebildet, wobei allerdings aus modelltechnischen Gründen von Beginn an der Zutritt von Süßwasser und eine unrealistisch hohe Zutrittsrate angenommen werden mussten sowie weitere Vereinfachungen notwendig waren [Grüschow & Ranft 2003]. Diese Überlegungen und die Interpretation der Modellergebnisse lassen den Schluss zu, dass ein Vordringen von an NaCl untersättigten Lösungen bis zu den Abdichtungen der Einlagerungsbereiche WSF und OF sehr unwahrscheinlich und deshalb in den Modellrechnungen nicht zu unterstellen ist.

Beim Kontakt von NaCl-Lösung mit Kalilagern (Carnallit oder Hartsalz) finden weitere Löseprozesse statt. Dabei lösen sich die Kalisalze auf, zugleich werden andere Mineralien ausgefällt („Umlösung“). Dieser Pro-

zess läuft so lange ab, bis die Lösung mit den verfügbaren Mineralen der Kalisalze lokal im Gleichgewicht steht oder die nicht im Gleichgewicht mit der Lösung stehenden Minerale im Kalilager hydraulisch nicht mehr zugänglich sind. Die Entwicklung der Lösung ist komplex und hängt stark von der Zusammensetzung des Salzgesteins und seiner räumlichen Verteilung ab. Bei der Umlösung an Kalilagern steigen die Dichte und die Viskosität der Lösung über die entsprechenden Werte von gesättigter NaCl-Lösung an.

Durch Umlösungen an Kalilagern erhöht sich auch die Konzentration an Magnesium-Ionen in der Lösung. Die für den Massenversatz und für die Errichtung der meisten Abdichtungen vorgesehenen Salzbetone sind in Kontakt mit Mg-haltiger Lösung chemisch nicht stabil. Die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit verliert ihre Stabilität in Kontakt mit Mg-armer Lösung. Dies wird weiter unten, im Zusammenhang mit dem Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche, diskutiert. Für den Massenversatz kann angenommen werden, dass dieser nicht in nennenswertem Ausmaß durch Mg-haltige Lösung zersetzt wird, da im Allgemeinen keine ausreichenden hydraulischen Kräfte auftreten, die das Porenwasser im Innern der großen Versatzkörper verdrängen und durch Mg-haltige Lösung ersetzen.

Die bei Nachlösung am Steinsalz und Umlösung an Kalilagern entstehenden Hohlräume wirken gebirgsmechanisch und hydraulisch wie unverfüllte bzw. wie mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Grubenbaue und sind beim Nachweis der Langzeitsicherheit entsprechend zu berücksichtigen. Bei der Umlösung von 1 m<sup>3</sup> gesättigter NaCl-Lösung bis zum invarianten Punkt IP21 an Carnallit mit einer Zusammensetzung, die im ERAM vorkommt, entstehen z. B. rund 1,4 m<sup>3</sup> beeinflusstes Gebirgsvolumen mit einem Feststoffinhalt von rund 55 Vol%, d. h. einer mittleren Porosität von rund 45 %. Die gebirgsmechanischen Auswirkungen der entstehenden Hohlräume betreffen in erster Linie die Stabilität des Grubengebäudes und die Konvergenz seiner Hohlräume (Grubenbaue und Lösungshohlräume). Daneben sind auch die möglichen gebirgsmechanischen Auswirkungen auf das Hutgestein zu berücksichtigen. Hydraulisch können durch Nach- und Umlösung neue Wegsamkeiten in der Salzstruktur entstehen. Dies ist ein weiterer Grund, weshalb die hydraulischen Verhältnisse in der Restgrube beim quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit nicht belastet werden (vgl. Kapitel 3.4.1).

Nach einem Lösungszutritt in die Restgrube können die Abfälle in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen ZT und NF innerhalb kurzer Zeit mit Lösung in Kontakt gelangen. Die dadurch ausgelösten Prozesse sind die gleichen wie beim Lösungskontakt der Abfälle in den abgedichteten Einlagerungsbereichen, sie werden weiter unten angesprochen.

### **Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche**

Da das Ausmaß der Umlösung an Kalilagern in der Restgrube nicht prognostiziert werden kann, sind auch die chemische Zusammensetzung und insbesondere der Mg-Gehalt der Lösungen nicht bekannt, die in Kontakt zu den Abdichtungen gelangen. Wie in Kapitel 3.3.2 dargelegt wurde, bestehen die meisten Abdichtungen aus einem Material, das zwar in Kontakt mit NaCl-Lösung, nicht aber in Kontakt mit Mg-haltiger Lösung chemisch stabil ist. Bei der Wechselwirkung von Salzbeton mit Mg-haltiger Lösung entsteht eine Festphase mit geringerer Festigkeit, vergrößertem Porenraum und deutlich erhöhter Permeabilität. Die Wechselwirkung wird als Korrosion bezeichnet. Die Rate, mit der die Korrosion in den Salzbeton vordringt, hängt vom Nachschub von Mg-Ionen zur Korrosionsfront ab. Für die vollständige Korrosion von Salzbeton ist ein dreifacher Austausch der Porenlösung durch IP21-Lösung erforderlich. Bei geringerem Mg-Gehalt der Lösung ist ein entsprechend stärkerer Lösungsaustausch nötig. Die Korrosion von Salzbeton durch Mg-haltige Lösung wurde im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises durch geochemische Experimente und begleitende Modellrechnungen untersucht [GRS 2003], [GRS 2009a].

Sofern an einer Abdichtung aus Salzbeton Mg-haltige Lösung ansteht, dringen die Mg-Ionen diffusiv und ggf. advektiv zur Korrosionsfront vor und führen zu einem Fortschreiten der Korrosion. Der diffusive Transport ist angesichts der Ausdehnung der Abdichtungsbauwerke äußerst langsam. Ein advektiver Transport der Mg-Ionen zur Korrosionsfront, d. h. von der Restgrube in Richtung Einlagerungsbereich, kann nur stattfinden, solange der Gasdruck (bzw. Lösungsdruck) im abgedichteten Einlagerungsbereich niedriger ist als der Lösungsdruck am Ende der Abdichtung auf der Seite der Restgrube. Die Rate des Transports und damit die

Rate der Korrosion hängen neben dem Druckgefälle von der Permeabilität der Abdichtungen einschließlich der Kontaktzone zwischen Abdichtbauwerk und Salzgestein ab. Wegen der hochwertigen Ausführung der Abdichtungen ist der Korrosionsfortschritt langsam, was die ausreichend lange Wirksamkeit der Abdichtungen im Hinblick auf die Langzeitsicherheit gewährleistet.

Die einzige Streckenabdichtung, welche nicht aus Salzbeton besteht, ist jene aus Magnesiabeton des ELB OF auf der 4. Sohle (vgl. Kapitel 3.3.2). Magnesiabeton ist in Kontakt mit Lösung chemisch stabil, sofern deren Mg-Gehalt mindestens 12,2% des Mg-Gehalts von IP21-Lösung beträgt ([Colenco 2009], Anhang L). Bei geringerem Mg-Gehalt zerfällt die Sorelphase im Magnesiabeton, wobei Magnesium in Lösung geht und der Mg-Gehalt der Lösung ansteigt. Dieser Prozess läuft in einem Abdichtbauwerk aus Magnesiabeton ähnlich ab wie die Korrosion eines Abdichtbauwerks aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösung und wird ebenfalls als Korrosion bezeichnet: Der Prozess wird ebenfalls durch den diffusiven und ggf. advektiven Transport von Lösungsinhaltsstoffen im korrodierten Teil des Abdichtbauwerks gesteuert. Während die Korrosion von Salzbeton durch den Transport von Mg-Ionen zur Reaktionsfront bestimmt wird, hängt die Rate der Korrosion von Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung vom Abtransport der Mg-Ionen, die bei der Reaktion in Lösung gegangen sind, von der Reaktionsfront ab. Dies entspricht dem Nachschub von Mg-arter Lösung zur Reaktionsfront. Die Korrosion von Magnesiabeton erfolgt umso rascher, je höher die Rate ist, mit der die Mg-arme Lösung in das Abdichtbauwerk eindringt und je geringer deren Mg-Gehalt ist. Für die vollständige Korrosion von Magnesiabeton ist ein rund achtfacher Austausch der Porenlösung durch NaCl-gesättigte (Mg-freie) Lösung erforderlich.

Dem Lösungszutritt und damit auch dem Korrosionsfortschritt entgegen wirkt – wie erwähnt – der Fluiddruck im abgedichteten Einlagerungsbereich. Wie bei der Entwicklung „trockene Grube“ (Kapitel 4.2.1) steigt dieser durch Gasbildung und Konvergenz der Grubenbaue sowie zusätzlich durch das langsame Eindringen von Lösung in den Einlagerungsbereich an. Der Druckanstieg in den Einlagerungsbereichen ist dabei unterschiedlich, je nachdem ab welchem Zeitpunkt und mit welcher Rate Gas aus dem Einlagerungsbereich in die Restgrube entweichen kann.

Falls der Fluiddruck im Einlagerungsbereich den Lösungsdruck in der Restgrube erreicht, bevor die erste Abdichtung durchkorrodiert ist, endet der Korrosionsprozess. Mit dem weiter ansteigenden Druck im Einlagerungsbereich beginnt die Auspressphase, d. h. das Auspressen von Fluid (Gas und evtl. Lösung) aus dem Einlagerungsbereich. Dabei stellen die noch nicht korrodierten Teile der Abdichtungen nach wie vor einen hydraulischen Widerstand dar.

Solange keine der Abdichtungen eines abgedichteten Einlagerungsbereichs durchkorrodiert ist, bleibt die Rate des Lösungszutritts in den Einlagerungsbereich gering. Sobald eine der Abdichtungen (annähernd) durchkorrodiert ist, steigt die Zutrittsrate in den Einlagerungsbereich rasch auf einen deutlich höheren Wert. Der Lösungszutritt hält dann an, bis der Lösungsdruck im Einlagerungsbereich und in der Restgrube ausgeglichen ist. Je nach der zu diesem Zeitpunkt im Einlagerungsbereich vorhandenen Gasmenge steigt dabei der Lösungspegel dort mehr oder weniger hoch an. Durch den rasch ansteigenden Lösungszutritt entlang der Abdichtung, die den Prozess ausgelöst hat, korrodiert diese vollends durch. Während der anschließenden Auspressphase ist in diesem Fall mindestens eine der Abdichtungen durchkorrodiert und damit relativ permeabel.

In diesem Zusammenhang ist die mit den geplanten Maßnahmen zum Verfüllen des Endlagers vorgesehene hydraulische Trennung von Westfeld und Südfeld auf der 3. und 4. Sohle und das Auffahren eines Großbohrlochs für den Druckausgleich zwischen den beiden Feldesteilen von Bedeutung (vgl. Kapitel 3.3.2). Sofern Lösung in den ELB WSF Zutritt, gelangt sie zunächst in das Südfeld. In das Westfeld kann sie nur entlang der Abdichtungen zwischen Süd- und Westfeld auf der 3. und 4. Sohle oder über das mit Schotter verfüllte Großbohrloch vordringen. Da letzteres im Südfeld auf der 1. Sohle ansetzt, ist dafür ein Ansteigen des Lösungspegels bis zur 1. Sohle notwendig. Entlang der Abdichtungen auf der 3. und 4. Sohle ist der Lösungsfluss bei einem Lösungszutritt in das Südfeld gering, da die antreibende Differenz des Lösungsdrucks wegen des Gasdruckausgleichs über das Großbohrloch beschränkt bleibt. Der zusätzlich behinderte Lösungszutritt in das Westfeld ist im Hinblick auf die Langzeitsicherheit von Bedeutung, da die Radiotoxizität der Abfälle im Südfeld bereits nach einigen 100 Jahren deutlich unter jene der Abfälle im Westfeld abgeklungen ist (Abbildung 2-5).



Sofern eine hydraulische Wegsamkeit entlang des Hauptanhydrit vom Zentralteil (Restgrube) in den ELB OF führt, tritt Lösung auch entlang dieser Wegsamkeit dem Einlagerungsbereich zu. Die Rate hängt wie bei den Wegsamkeiten entlang der Abdichtungen vom Druckgefälle und dem hydraulischen Widerstand ab. Im Gegensatz zu den Abdichtungen kann für eine Wegsamkeit entlang des Hauptanhydrit – sofern sie existiert – ein zeitlich gleich bleibender Widerstand angenommen werden. Die gebirgsmechanischen Bewegungen sind in jenem Bereich der Salzstruktur sehr gering, und Lösungsprozesse treten nicht auf.

## **Konvergenz und Gasbildung**

Die Konvergenz eines Hohlraums in der Salzstruktur hängt von zahlreichen Faktoren, wie der örtlichen Gebirgsspannung, den rheologischen Eigenschaften der Gesteine in der Nähe, der Durchfeuchtung von Stoß, Sohle und Firste sowie ggf. des Salzversatzes, dem Druck des Fluids im Hohlraum und der Stützwirkung des Versatzes ab. Der Einfluss von Änderungen der Temperatur auf die Konvergenzrate kann vernachlässigt werden. Die Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz (vgl. Kapitel 4.1) setzt typischerweise bei einer Porosität des Versatzes von etwa 30 % ein, während der kompaktierbare Versatz bei Verschluss des Endlagers Porositätswerte im Bereich von 40 % aufweist. Der kompaktierbare Versatz übt damit erst nach einiger Zeit eine langsam ansteigende Stützwirkung aus. Da zudem die Konvergenzraten von unverfüllten Hohlräumen im ERAM überall niedrig sind, ist bei konstantem Fluiddruck eine langsame, lang anhaltende und zeitlich wenig veränderliche Abnahme der fluidzugänglichen Volumen im Endlager zu erwarten.

Gasbildung erfolgt – nach Verbrauch des eingeschlossenen Luftsauerstoffs durch aerobe Prozesse – durch anaerobe Korrosion von Metallen und anaerobe mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen. Beide Prozesse setzen die Anwesenheit von Wasser voraus. Bei ausbleibendem Nachschub von Wasser kommen die Prozesse zum Stillstand. Selbst bei einem Lösungszutritt in die Grube kann der Wassernachschub zu Gas bildenden Stoffen durch das lokale Zukriechen von Wegsamkeiten unterbunden werden. Ein vollständiger Umsatz der Gas bildenden Stoffe ist deshalb auch bei der hier betrachteten Entwicklung des Systems nicht zwingend. Bei der anaeroben Metallkorrosion entsteht Wasserstoff, bei der anaeroben Zersetzung von organischen Stoffen Methan, Wasserstoff und Kohlendioxid. Letzteres wird weitgehend durch die basischen Bestandteile der Versatzmaterialien als Carbonat gebunden und geht nicht in die Gasphase über. Radiolyse spielt wegen der geringen Gesamtaktivität der eingebrachten Abfälle keine Rolle. Eine ausführliche Diskussion der Gasbildung enthält [Colenco 2002c].

Gas bildende Stoffe sind in den eingelagerten Abfällen und den zurückgelassenen Reststoffen aus dem Betrieb der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie enthalten. Bei vollständiger Umsetzung der Gas bildenden Stoffe entsteht die größte Gasmenge im ELB WSF (und dort im Westfeld) und etwa vergleichbare Mengen im ELB OF und in der Restgrube. Die Gasbildung in der Restgrube ist aufgrund der Zusammensetzung der dort vorliegenden Gas bildenden Stoffe relativ früh, nach etwa 1000 Jahren, weitgehend beendet.

Konvergenz und Gasbildung führen zu einem Anstieg des Fluiddrucks in den abgedichteten Einlagerungsbereichen. Falls dieser den lithostatischen Gebirgsdruck auf der obersten Sohle des Einlagerungsbereichs übersteigt, kommt es zur Bildung von neuen Wegsamkeiten, über die Gas entweicht, und dadurch zu einem Ende des Druckanstiegs. Die damit zusammenhängenden Prozesse wurden bereits in Kapitel 4.2.1 diskutiert. Für die Modellrechnungen wird in diesem Fall als ungünstige Annahme die Bildung eines Fracs zur Druckentlastung unterstellt. Eine Frac-Bildung ausgehend von der Restgrube kann bei Systementwicklungen „mit relevantem Lösungszutritt“ ausgeschlossen werden, da in diesen Fällen eine hydraulisch wirksame Wegsamkeit ins Hutgestein existiert.

## **Mobilisierung von Radionukliden**

Die Abfälle liegen in der Regel in Form von Abfallgebinden vor, in denen die Radionuklide fixiert sind (zum großen Teil in Zement, seltener in Bitumen). Mit Ausnahme der Radionuklide, welche gasförmige Verbindungen bilden können – potenziell sicherheitsrelevant ist nur  $^{14}\text{C}$  –, ist eine Freisetzung von Radionukliden



nur in Lösung möglich. Der Übergang von der fixierten in die gelöste Form wird im Folgenden als Mobilisierung bezeichnet.

Die Mobilisierung setzt nach dem Kontakt von Lösung mit dem Abfall durch Zersetzung der Abfallmatrix und zusätzlich durch Radionuklid diffusion aus der Abfallmatrix ein. Für verschiedene Radionuklide dürfte der in Lösung gelangende Anteil durch die begrenzte Löslichkeit sowie durch Sorption an Versatzstoffen und an Bestandteilen des Abfalls begrenzt bleiben. Diese begrenzenden Prozesse hängen von zahlreichen Einflussgrößen ab, die in ihrem Wert oder ihrem Einfluss für die Einlagerungsgrubenbaue des ERAM i. a. nicht belastbar quantifiziert werden können. Aus diesem Grund wird für den Nachweis der Langzeitsicherheit – außer bezüglich  $^{14}\text{C}$  in allen Einlagerungsbereichen und  $^{226}\text{Ra}$  in der Radium-VBA – von der raschen und vollständigen Mobilisierung aller Radionuklide in den Einlagerungsgrubenbauen ausgegangen (inventarbestimmte Mobilisierung).

Radioaktiver Kohlenstoff  $^{14}\text{C}$  ist im Abfall in chemisch unterschiedlichen Formen vorhanden, in vielfältigen organischen Verbindungen (einschließlich Tierkadavern und Pflanzenresten), als Carbide und in anorganischen Verbindungen. Insgesamt überwiegt das organisch gebundene  $^{14}\text{C}$ ; der Anteil Carbide beträgt etwa 20 %, der anorganische Anteil etwa 13 %. Das meiste organisch gebundene  $^{14}\text{C}$  und das gesamte Carbide befinden sich im ELB WSF.

Mikrobielle Zersetzung der organischen Verbindungen führt zu den mobilen Spezies  $^{14}\text{CH}_4$  und  $^{14}\text{CO}_2$ . Bei der Zersetzung der sauerstofffreien aliphatischen Verbindungen beträgt das Verhältnis 3:1. Radioaktives Kohlendioxid ( $^{14}\text{CO}_2$ ) steht in der Lösung mit Hydrogencarbonat und Carbonat im Gleichgewicht (Carbonatisierung), wobei die Löslichkeit von Carbonat begrenzt ist. Die Löslichkeit von Carbonat ist dabei weitgehend unabhängig vom Mg-Gehalt der Lösung und von der Konzentration an Komplexbildnern. Die Konzentration von  $^{14}\text{CO}_2$  in Lösung ist zudem durch die große Menge an vorhandenem nichtradioaktivem Carbonat begrenzt. Die Löslichkeit von Methan ist rein physikalisch und durch das Henry'sche Gesetz beschrieben. Unter den sich in den Einlagerungsbereichen einstellenden chemischen Bedingungen wird der gelöste Anteil von  $^{14}\text{CH}_4$  größer sein als der letztendlich in Lösung verbleibende Anteil von  $^{14}\text{CO}_2$ . Für die sich nach Mobilisierung einstellende  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Gasphase ist der Unterschied noch ausgeprägter. Die Annahme eines hohen Anteils von  $^{14}\text{CH}_4$  als Ergebnis der mikrobiellen Zersetzung ist deshalb sowohl für die Freisetzung auf dem Lösungspfad als auch für die Freisetzung auf dem Gaspfad eine ungünstige Annahme. Da bei der anaeroben Zersetzung von nicht-aliphatischen Verbindungen ein niedrigeres  $^{14}\text{CH}_4$ : $^{14}\text{CO}_2$ -Verhältnis als der oben angeführte Wert von 3:1 entsteht, wird der letztgenannte Wert für den Nachweis der Langzeitsicherheit unterstellt. Niedermolekulare organische Verbindungen können zwar ohne mikrobielle Zersetzung in Lösung gehen und transportiert werden, sie sind jedoch auch besonders leicht mikrobiell abbaubar. Mikrobielle Zersetzung wird deshalb auch für niedermolekulare Verbindungen angenommen. Eine ausführliche Beschreibung der Prozesse, die zur Mobilisierung von organisch gebundenem  $^{14}\text{C}$  führen, sowie der Annahmen und Vereinfachungen für den Langzeitsicherheitsnachweis enthält [Colenco 2009]. In [GRS 2009b] werden als alternatives Szenario zusätzlich auch die Folgen einer ausbleibenden mikrobiellen Zersetzung von organischen Stoffen und des vollständigen Übertritts von organisch eingelagertem  $^{14}\text{C}$  in Lösung untersucht (Kapitel 4.5.2).

Beim Kontakt von Carbide mit Wasser entstehen gasförmige Kohlenwasserstoffe, hauptsächlich Methan. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit wird eine vollständige Umsetzung zu Methan angenommen. In Bezug auf die Mobilisierung des anorganisch gebundenen  $^{14}\text{C}$  wird ein Vorliegen bzw. eine Umwandlung in Carbonat unterstellt.

Die geochemischen Verhältnisse im Streckenstummel und im Sohlenbohrloch, in dem die Radium-VBA eingelagert ist (vgl. Kapitel 2.3.2), werden vom Salzbetonversatz des Streckenstummels bestimmt und unterliegen keinen störenden Einflüssen: Der Streckenstummel kann nicht durchströmt werden, im Ostfeld sind zudem keine Kalilager aufgeschlossen und die Radium-VBA selbst beeinflusst die geochemischen Verhältnisse nicht in signifikanter Weise. Unter diesen Verhältnissen können Sorption von  $^{226}\text{Ra}$  am Salzbeton und ein rein diffuser  $^{226}\text{Ra}$ -Transport von der Radium-VBA durch den Salzbetonversatz des Streckenstummels bis in durchströmbare Grubenbaue des ELB OF angenommen werden.

## Transport im Grubengebäude und Übertritt in das Hutgestein

Der Transport von gelösten Radionukliden geschieht im Grubengebäude zum einen diffusiv, zum andern advektiv/dispersiv mit bewegter Lösung. Lösungsbewegungen entstehen durch Lösungsverdrängung als Folge von Hohlraumkonvergenz und lokaler Gasspeicherung sowie durch dichtebedingte Konvektion. Sobald der Fluiddruck in einem abgedichteten Einlagerungsbereich den Druck in der übrigen Grube übersteigt<sup>23</sup>, wird Gas oder Lösung über jene Abdichtungen ausgepresst, bei denen die genannte Druckbedingung erfüllt ist. Grundsätzlich ist ein gleichzeitiger Lösungszutritt in den Einlagerungsbereich über eine Abdichtung und ein Gas- oder Lösungsaustritt über eine andere Abdichtung möglich. Eine detaillierte Analyse zeigt jedoch, dass die Auswirkungen eines solchen Prozesses auf die Langzeitsicherheit im Vergleich mit jenen der anderen Prozesse gering sind [Colenco 2009].

Das Auspressen von Gas oder Lösung aus einem abgedichteten Einlagerungsbereich führt dort zu einer Druckentlastung. Bei gleichem hydraulischem Widerstand und nach Überschreiten des Gaseindringdrucks der Abdichtung erfolgt der Druckausgleich rascher durch den Abfluss von Gas als durch den Abfluss von Lösung, da Gas eine deutlich niedrigere Viskosität aufweist. Sofern der Abfluss von Gas im oberen Bereich des ELB und der Abfluss von Lösung im unteren Bereich des ELB durch Abdichtungen mit vergleichbaren Widerständen behindert werden, wird der Austritt von Gas den Lösungsaustritt übertreffen. Bei einem großen Unterschied der hydraulischen Widerstände der Abdichtungen, z. B. wenn eine Abdichtung unterhalb des Lösungspegels im Einlagerungsbereich durchgehend korrodiert ist, kann die Rate des Lösungsaustritts jene des Gasaustritts jedoch übertreffen.

Sobald der Lösungsaustritt aus dem Einlagerungsbereich einsetzt, bewegt sich die Lösung im Einlagerungsbereich auf nicht näher eingrenzbaaren Wegen auf die maßgebende(n) Abdichtung(en) zu. Dabei mischen sich radionuklidhaltige Lösung aus den Einlagerungsgrubenbauen und Lösung aus anderen Bereichen des ELB. Da der Übertritt der Lösung aus dem Einlagerungsbereich in die übrige Grube nur über eine, höchstens jedoch wenige Abdichtungen erfolgt, ist die Mischung der Lösung aus den Einlagerungsgrubenbauen mit jener aus den anderen Teilen des Einlagerungsbereichs spätestens im Bereich der Abdichtung(en) intensiv. In guter Näherung kann von einer vollständigen Durchmischung aller gleichzeitig aus einem Einlagerungsbereich austretenden Lösungen nach dem Übertritt in die übrige Grube ausgegangen werden.

Der Radionuklidtransport im Einlagerungsbereich von den Abfällen bis zur Abdichtung (bzw. den Abdichtungen), über die der Übertritt in die übrige Grube stattfindet, wird durch Sorption am Versatzmaterial (vor allem Salzbeton) und durch Diffusion in den nicht durchströmten Porenraum des Salzbetons verzögert. Wegen der nicht belastbar zu beschreibenden Transportpfade, der breiten Variabilität der möglichen geochemischen Verhältnisse entlang der Transportpfade und mangels belastbarer Daten werden diese für die Langzeitsicherheit günstigen Prozesse im Nachweis jedoch nicht berücksichtigt<sup>24</sup>.

Vom Südfeld führt ein nur teilweise abgebautes Hartsalzflöz (Teil des Kalilagers C) aus den Unterwerksbauen nach oben zum Zentralteil (Abbildung 3-6). Dieses ist undurchlässig und daher hydraulisch dem intakten Steinsalz gleichzusetzen. Ein Durchlösen dieses Flözes und damit ein Kurzschließen des Abdichtsystems zum ELB WSF kann sowohl vom Zentralteil in Richtung Einlagerungsbereich als auch in umgekehrter Richtung ausgeschlossen werden, zumindest für ausreichend lange Zeiträume. Ein Durchlösen vom Zentralteil nach unten zum Südfeld ist aufgrund von Dichteeffekten und der Selbstabdichtung durch ausfallende Mineralphasen ausgeschlossen. Ein langzeitsicherheitsrelevantes Durchlösen in umgekehrter Richtung (vom Südfeld nach oben zum Zentralteil) setzt vor dem Durchkorrodieren der ersten Abdichtung des ELB WSF ein Ansteigen von Lösung in den Unterwerksbauen des Südfelds bis zur 4. Sohle voraus, wobei die Lösung mit dem anstehenden Hartsalz nicht ins Gleichgewicht gelangt. Aufgrund der geringen mobilen Lösungsmenge

<sup>23</sup> Der Gasfluss entlang einer Abdichtung setzt ein, wenn der Gasdruck im abgedichteten Einlagerungsbereich den Lösungsdruck in der Restgrube am Ort der Abdichtung um den Gaseindringdruck der Abdichtung (einschließlich der evtl. noch bestehenden Auflockerungszone) übersteigt.

<sup>24</sup> ausgenommen Rückhaltung des mobilisierten <sup>226</sup>Ra aus der Radium-VBA durch Sorption und rein diffusiver Transport im Salzbetonversatz des Streckenstummels am Ende des Ostquerschlags auf der 4. Sohle im ELB OF (vgl. Ausführungen dazu im vorangehenden Unterkapitel „Mobilisierung von Radionukliden“).

im Einlagerungsbereich unmittelbar nach Verschluss des Endlagers und des geringen Lösungszutritts durch die unkorrodierten Abdichtungen können diese Bedingungen frühestens zu späten Zeiten erfüllt sein.

Der Übertritt von Radionukliden aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen ZT und NF in die übrige Grube erfolgt aufgrund der gleichen Prozesse, nur viel rascher. Wegen der kürzeren Distanzen kann der diffusive Transport aus den Einlagerungsgrubenbauen in die übrige Grube für den Transport von Radionukliden in Lösung von Bedeutung sein.

Der Radionuklidtransport in der übrigen Grube, d. h. von den Abdichtungen der abgedichteten Einlagerungsbereiche bzw. den Einlagerungsgrubenbauen der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche zum Ort des Übertritts aus der Grube durch das Salinar in das Hutgestein, wird durch die gleichen Prozesse wie der Transport in den abgedichteten Einlagerungsbereichen bestimmt. Auch die Verhältnisse und Randbedingungen sind sehr ähnlich. Der gerichtete Transport zu der oder den Übertrittsstelle(n) setzt ein, wenn das Auspressen von Lösung aus der Grube durch das Salinar in das Hutgestein beginnt, d. h. wenn der Fluiddruck im Grubenhöchsten den (hydrostatischen) Lösungsdruck an der Basis des Hutgesteins übersteigt<sup>25</sup> und an (einer) der Übertrittsstelle(n) in der Grube Lösung ansteht. Der Transport in der Grube erfolgt wiederum entlang nicht prognostizierbarer Transportpfade zu der (den) Übertrittsstelle(n) in die Wegsamkeit durch das Salinar. Während des Transports in der übrigen Grube, spätestens im Bereich der Wegsamkeit durch das Salinar, vermischt sich die radionuklidhaltige Lösung aus den Einlagerungsbereichen mit dem gesamten Lösungsfluss aus der übrigen Grube. Sofern gleichzeitig mehrere Übertrittsstellen wirksam sind, kann die Verdünnung auch nur mit einem Teil der Lösung aus der übrigen Grube erfolgen. Wie beim Transport in den abgedichteten Einlagerungsbereichen wird auch hier die Transportverzögerung durch Sorption am Versatzmaterial und Diffusion in nicht durchströmten Porenraum für den Sicherheitsnachweis nicht belastet.

Das Gas aus den Einlagerungsbereichen steigt nach dem Übertritt in die übrige Grube dichtebedingt zum Grubenhöchsten auf. Dort vermischt es sich mit der eingeschlossenen Grubenluft und mit Gas, das in der übrigen Grube gebildet wurde. Dabei entstehen eine oder mehrere große Gasblase(n). Wenn die Übertrittsstelle aus der Grube in die Wegsamkeit durch das Salinar im Bereich einer dieser Gasblasen liegt, dann setzt der Übertritt von Gas in das Hutgestein ein, sobald der Gasdruck in der Gasblase die Summe aus (hydrostatischem) Lösungsdruck an der Basis des Hutgesteins und Gaseindringdruck einer Gaswegsamkeit durch das Hutgestein überschritten hat. Während des Übertritts von Gas in das Hutgestein ist ein Auspressen von Lösung aus der Grube über die gleiche Übertrittsstelle nicht möglich.

## **Transport durch Hutgestein und Deckgebirge**

Der Transport der aus dem Grubengebäude in das Hutgestein ausgepressten Lösung bis in die Biosphäre wird durch verschiedene Umstände und Prozesse beeinflusst. Je nachdem, wo die Auspressung stattfindet, stellt das Hutgestein einen mehr oder weniger starken hydraulischen Widerstand dar. Eine Struktur im Hutgestein mit relativ geringem hydraulischem Widerstand bildet die etwa 4 m mächtige Schichtenfolge DGL, die im Bereich der potenziellen Auspressstellen über dem Zentralteil und dem Nordfeld verläuft und schräg gegen Nordosten ansteigt.

Die ungestörte Bewegung von Grundwasser im Hutgestein, d. h. jene ohne Zutritt von Lösung in das Grubengebäude oder Auspressen von Lösung aus diesem, ist äußerst gering. Modellrechnungen ergeben unter Berücksichtigung von Dichteeffekten einen kleinen abwärtsgerichteten Fluss oberhalb der potenziellen Auspressstellen (vgl. Kapitel 2.2.2, 6.2 und [Colenco 2002b]). Eine nach oben gerichtete Bewegung in diesem Bereich des Hutgesteins, welche Voraussetzung für einen Radionuklidtransport in Lösung bis in die Biosphäre ist, entsteht erst durch das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude.

Modellrechnungen zur Ausbreitung von aus dem Grubengebäude ausgepresster Lösung im Hutgestein und Deckgebirge, speziell jene mit Berücksichtigung der Dichteeffekte, zeigen, dass die Ausbreitung von Radio-

---

<sup>25</sup> nach hydrostatischer Umrechnung der Lösungsdrücke auf die gleiche Tiefe



nukliden entlang drei Typen von Austragswegen in das oberflächennahe Grundwasser erfolgen kann (vgl. Kapitel 6.2 und Abbildung 4-1):

- (i) durch das Hutgestein im Südwesten der Schichtenfolge DGL direkt (oder durch eine geringmächtige Schicht Jura) in den Oberkreidetrog und entlang dessen Basis nach Nordosten ansteigend bis in das Exfiltrationsgebiet nahe der Aller,
- (ii) entlang der Schichtenfolge DGL oder nordöstlich davon durch das Hutgestein und dann durch das Deckgebirge der Allertalzone (Schilfsandstein, Oberer Gipskeuper, Steinmergelkeuper) in das oberflächennahe Grundwasser,
- (iii) entlang der Schichtenfolge DGL oder nordöstlich davon durch das Hutgestein, dann entlang des Schilfsandstein nach Nordosten in die Weferlinger Triasplatte und durch die Schichten des Buntsandstein in das oberflächennahe Grundwasser.

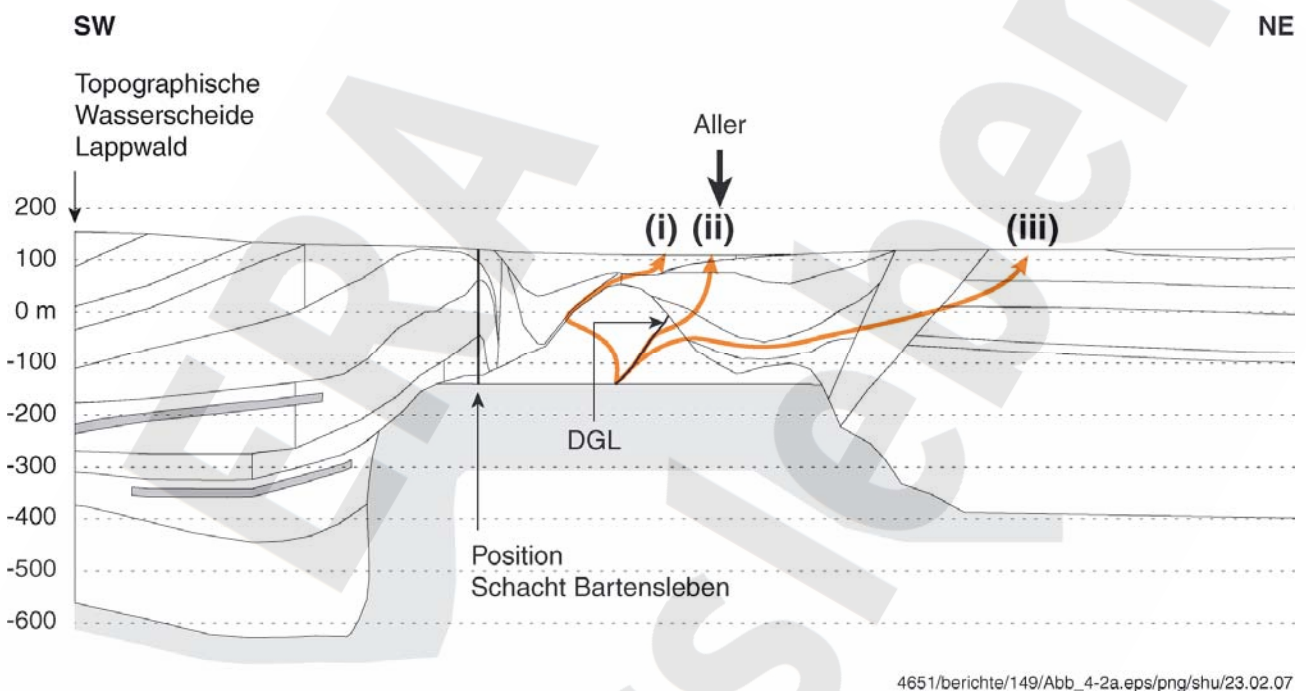


Abbildung 4-1: Transportpfade durch das Hutgestein und das Deckgebirge (schematische Darstellung, abgeleitet aus Modellrechnungen).

Die berechneten Transportzeiten betragen (ohne Sorption) für den Pfad Typ (i) rund 1000 Jahre bis mehrere 10 000 Jahre<sup>26</sup>, für den Typ (ii) mehrere 10 000 Jahre bis einige 100 000 Jahre und für den Typ (iii) einige 10 000 Jahre. Die Pfade des Typs (ii) und (iii) führen immer durch sorbierende Schichten des Keuper oder des Buntsandstein, jene des Typs (i) durch die Unteren und Oberen Alleringerslebener Schichten an der Basis der Oberkreide und eventuell zusätzlich durch die Schicht Jura zwischen Hutgestein und Oberkreide. Außerhalb der Schichtenfolge DGL kann im Hutgestein keine nennenswerte Sorption angenommen werden.

Bei diesen Modellrechnungen wurde das Hutgestein in die Schichtenfolge DGL und das übrige „intakte“ Hutgestein unterteilt. Andere steilstehende, höher durchlässige Strukturen im „intakten“ Hutgestein, wie z. B. eine durch gebirgsmechanische Verformungen als Folge der Konvergenz von Lösungshohlräumen gebildete Störungszone, würden diese Modellergebnisse nicht signifikant beeinflussen. Sie hätten „nur“ eine andere Aufteilung der ausgepressten Lösung auf die verschiedenen Transportpfade zur Folge und könnten deren genauen Verlauf verändern.

<sup>26</sup> für plausible flächenbezogene Einpressraten in das Hutgestein an dessen Basis (vgl. Kapitel 6.2)



Hydraulische Effekte und auch Dichteeffekte haben einen starken Einfluss auf den Radionuklidtransport in Lösung durch das Hutgestein und das Deckgebirge, indem sie dort eine erhebliche horizontale Ausbreitung der ausgepressten Salzlösung verursachen und somit gegen den Aufstieg der schweren, potenziell radionuklidhaltigen Salzlösung aus dem Salzgebirge in die oberflächennäheren, geringer salzhaltigen und damit leichteren Grundwässer wirken. Die Aufteilung der ausgepressten Lösung auf verschiedene Transportpfade und Dispersion bewirken nicht nur eine räumlich ausgedehnte Freisetzung, sondern aufgrund der unterschiedlichen Transportzeiten auch eine zeitliche Streckung der Freisetzung in das oberflächennahe Grundwasser.

Während des Transports durch das Hutgestein und das Deckgebirge erfährt die aus dem Grubengebäude ausgepresste Lösung eine Verdünnung. Die kumulierte Auswirkung lässt sich durch das Verhältnis des oberflächennahen Grundwasserumsatzes im Gebiet, in das die Radionuklide freigesetzt werden, zur Rate der Lösungsauspressung aus der Grube quantifizieren. Insgesamt muss die Grubenlösung mindestens um den Faktor 500 mit Süßwasser verdünnt werden, damit das Gemisch einen ausreichend niedrigen Salzgehalt aufweist, um in relevantem Maße am Biosphärenkreislauf teilnehmen zu können. Ohne diese Mindestverdünnung wären die Voraussetzungen für die im Biosphärenmodell unterstellte intensive Nutzung des radionuklidhaltigen Grundwassers nicht gegeben.

Insgesamt bewirkt der Transport in Lösung durch das Hutgestein und das Deckgebirge eine Verzögerung und dadurch eine Verminderung der Radionuklidfreisetzung durch radioaktiven Zerfall sowie eine räumliche und zeitliche Verteilung der Freisetzung von nicht zurückgehaltenen Radionukliden in das oberflächennahe Grundwasser. Je stärker diese Verteilung der Freisetzung ist, umso stärker wirken Verdünnung und zeitliche Streckung der Freisetzung und umso niedriger ist die resultierende Radionuklidkonzentration im oberflächennahen Grundwasser.

Das Gas aus dem Endlager steigt nach dem Übertritt in das Hutgestein dichtebedingt zur Geländeoberfläche auf. Den oder die Aufstiegspfade bestimmen die Schichten und Strukturen im Hutgestein und im Deckgebirge mit ihren Permeabilitäten, ihren 2-Phasen-Eigenschaften (u. a. Gaseindringdruck) und ihrer räumlichen Anordnung. Die Aufstiegspfade sind deshalb im Detail nicht prognostizierbar. Da die relative Gaspermeabilität in Gesteinsschichten generell mit ansteigender Gassättigung zunimmt, besteht eine starke Tendenz zur Kanalisierung des Gasanstiegs, d. h. zur Ausbildung von relativ wenigen Pfaden mit geringem Fließquerschnitt. Während des Aufstiegs der Gasphase finden an der Phasengrenze zur Flüssigphase Lösungs- und Austauschprozesse statt. So lange die an einen Aufstiegspfad angrenzende Flüssigphase in Bezug auf die Gaskomponenten im aufsteigenden Gas nicht gesättigt ist, geht Gas aus der Gasphase in Lösung über. Dadurch nimmt die aufsteigende Gasmenge ab. Nach Erreichen des Lösungsgleichgewichts finden an der Phasengrenze noch Austauschprozesse statt, wobei z. B.  $^{14}\text{CO}_2$  aus der Gasphase in die Flüssigphase übertritt, während gleichzeitig nicht radioaktives, natürlich vorhandenes  $\text{CO}_2$  aus dem Porenwasser in die Gasphase gelangt. Insgesamt vermindert sich dadurch der Radionuklidfluss in der Gasphase.

## **4.3 SYSTEMENTWICKLUNG BEI ANNAHME SICH ÄNDERNDER ÄUßERER RANDBEDINGUNGEN**

### **4.3.1 Geowissenschaftliche Langzeitprognose**

Eine geowissenschaftliche Langzeitprognose stellt keine Prognose im eigentlichen Sinne, d. h. eine Vorhersage der künftigen Entwicklung, sondern eine Darstellung der (verschiedenen) möglichen künftigen Entwicklungen der Verhältnisse am Standort über eine lange Zeitperiode dar. Gestützt auf eine entwicklungsgeologische Analyse des Standortes kommt [BGR 2002] zu den nachfolgend aufgeführten Schlussfolgerungen.

Der Endlagerstandort und sein geologisches Umfeld befinden sich in einer Phase stabiler, konsolidierter tektonischer Verhältnisse. Die salztektonischen Vorgänge sind seit rund 60 Mio. Jahren beendet. Tektonisch oder gar halokinetisch mobilisierbare Salze sind unter den Deckgebirgsschichten der Lappwaldscholle und der Weferlinger Triasplatte nicht mehr verfügbar. Die großräumigen Hebungen endeten früher als etwa 350 000 Jahre vor heute. Sie bewirkten über rund 35 Mio. Jahre relative Höhenverschiebungen zwischen Lappwaldscholle und Weferlinger Triasplatte im Mittel von maximal 3 m pro 1 Mio. Jahre. Seit Beginn des Quartär, d. h. seit rund 1,5 Mio. Jahren, erzeugten neotektonische Vorgänge maximale Höhenänderungen von wenigen Zehner Metern. Seit dem Mittelpleistozän (rund 780 000 Jahre vor heute) weisen die neotektonischen Vorgänge eine Intensität auf, die unterhalb der eindeutigen geologischen und gegenwärtigen messtechnischen Nachweisbarkeit bleiben. Es wird jedoch angenommen, dass diese geringfügigen Bewegungen über längere Zeiten zu Veränderungen der hydraulischen Durchlässigkeit im Hutgestein und in Hauptanhylitschollen des Salinars, welche mit dem Hutgestein verbunden sind, führen können (s. u.).

Die langfristige Klimaentwicklung wird – abgesehen vom anthropogenen Einfluss – durch Variationen der Sonneneinstrahlung als Folge von periodischen Änderungen der Erdbewegung um die Sonne gesteuert (Milanković-Theorie). Obwohl alle Modelle für die künftige Klimaentwicklung auf Hypothesen beruhen und Unsicherheiten bei der Wahl ihrer Parameter bergen, wird die Beschreibung der Entwicklung bis ca. 150 000 Jahre nach heute auf der Basis der verschiedenen Simulationsrechnungen als relativ zuverlässig eingeschätzt. Die Prognosen weisen ein erstes glaziales Maximum nach etwa 100 000 Jahren aus, wobei die Vereisung in Norddeutschland dann gleich oder geringer als jene des Weichsel-Hochglazials ist, d. h. ohne Eisbedeckung, jedoch mit kontinuierlichem Permafrost am Standort. Nach einer Warmzeit ergeben die Modelle eine weitere Kaltzeit mit schneller Eisakkumulation in Norddeutschland und einem Abkühlungsmaximum nach ca. 150 000 Jahren. Vor dem ersten glazialen Maximum tritt nach den Prognosen eine erste Abkühlung zu borealen und zeitweise periglazialen Klimabedingungen mit diskontinuierlichem Permafrost (ab etwa 60 000 Jahren) auf. Die anthropogenen Einflüsse können die erste Abkühlung verzögern und abschwächen.

Die Weichsel-Eiszeit (letzte Eiszeit, periglaziale Verhältnisse ohne Eisbedeckung des Standortes) und die frühere Saale-Eiszeit (mit Eisbedeckung des Standortes) bewirkten am Standort höchstens beschränkte Veränderungen. Die Saale-Eiszeit hatte nur flache erosive Ausräumungen und Stauchungen des Untergrundes sowie die Ablagerung einer geringmächtigen Grundmoräne zur Folge. Die Verhältnisse während der Saale-Eiszeit führten auch zu keinen erkennbaren Auswirkungen auf die Subrosion. Die aus dem Wechsel der Kalt- und Warmzeiten der letzten 300 000 Jahre resultierenden Ausräumungs- und Wiederauffüllungsbeiträge des Reliefs liegen in der Größenordnung von ca. 20 – 30 m.

Die noch frühere Elster-Eiszeit mit ihrer sehr mächtigen Eisbedeckung am Standort brachte die letzte bedeutsame Zäsur in der geologischen Entwicklung der Standortumgebung mit sich. Die Gletscher der Elster-Eiszeit bewirkten lokal Ausräumungen bis maximal 60 m unter die Geländeoberfläche, so dass sich der Abstand der unter dem Gletscher verlaufenden Fließgewässer zur Salzoberfläche um den gleichen Betrag verringerte. Im Bereich des Gletscherrandes entwickelten sich im Untergrund relativ hohe hydraulische Gradienten. Durch die schnell wechselnde Belastung durch die Eisbedeckung entstanden zudem vermutlich neue wasserwegsame Klüfte im Hutgestein, welche in Verbindung mit den hohen hydraulischen Gradienten kurzfristig zu hohen Subrosionsraten führten. Dies bewirkte eine subrosive Tieferlegung der Salzoberfläche um 20 m bis 50 m. Nach dem Rückzug der Gletscher bildeten sich die neu entstandenen Wasserwegsamkeiten im Hutgestein durch Mineralausfällung (hauptsächlich Gips) zurück, worauf das „intakte“ Hutgestein wieder die heute beobachtete niedrige Permeabilität aufwies.

Da für die kommenden 150 000 Jahre das Eintreten einer Vereisung vom Typ der Elster-Eiszeit ausgeschlossen wird, für spätere Zeiten jedoch nicht mehr, beschränkt sich [BGR 2002] auf eine geowissenschaftliche Langzeitprognose über 150 000 Jahre. Zu späteren Zeiten können sich die Potentiale und die hydraulischen Durchlässigkeiten in Teilen des Deckgebirges im Gefolge der prognostizierten Kaltzeiten wesentlich ändern.

Die Verhältnisse der Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Standortes werden aufgrund der weitgehenden Stabilität der morphologischen und geologischen Verhältnisse über den Zeitraum von 150 000 Jahren weitgehend den heutigen Verhältnissen entsprechen. Die deutlichsten Veränderungen sind in den Ab-

kühlungsphasen mit Permafrost nach 60 000 Jahren und nach 100 000 Jahren zu erwarten. Unter Permafrostbedingungen kann das Ausmaß der Grundwasserbewegung am stärksten verändert sein.

Standortspezifische Modellrechnungen für die Subrosion bei der künftigen Entwicklung des Klimas zeigen in Übereinstimmung mit den geologischen Erkundungsergebnissen, dass unter heutigen Klimabedingungen am Standort praktisch keine flächenhafte Subrosion stattfindet. Das höchste Ausmaß der Subrosion im Allertal während der nächsten 150 000 Jahre wird unter Permafrostbedingungen erreicht. Aufgrund der Modellrechnungen ist die Auflösung einer Steinsalzschiebe in der Größenordnung von 2 m in den kommenden 150 000 Jahren zu erwarten.

Die künftige mögliche Entwicklung der fluviatilen Erosion wurde unter Zugrundelegung von fünf standortbezogenen, tektonisch gesteuerten Hebungsszenarien berechnet. Danach können im Zeitraum von 150 000 Jahren 3 m bis 11 m des Deckgebirges über dem Endlager abgetragen werden.

Seismische Ereignisse, die die Salzstruktur am Endlagerstandort insgesamt beeinträchtigen können, sind von extrem geringer Wahrscheinlichkeit. Die Beanspruchung bei realistisch unterstellbaren Erdbeben führen weder im Hauptanhydrit des Salinars noch im Hutgestein oder im Deckgebirge zu bruchhafter Verformung und der Bildung von neuen Wegsamkeiten.

Aufgrund der entwicklungsgeschichtlichen Analyse unter Berücksichtigung der rezenten geologischen Verhältnisse und Prozesse ist der Fortbestand der gegenwärtigen Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im Hutgestein während einigen zehntausend Jahren nicht in Frage zu stellen<sup>27</sup>. Zu einem nicht genau definierbaren Zeitpunkt könnte sich jedoch eine geologisch nicht ausschließbare Einzelrissbildung hin zu einem System hydraulisch vernetzter Klüfte in Teilen des intakten Hutgesteins entwickeln. Die hydraulische Effizienz solcher Systeme wird vermutlich gering sein. Modellhaft kann deshalb als Möglichkeit für Zeiten nach einigen zehntausend Jahren und für Teile des derzeit intakten Hutgesteins eine gleiche Größenordnung der Durchlässigkeit wie in der Schichtenfolge DGL angenommen werden. In den Modellrechnungen wird – als repräsentative Variante eines alternativen Szenarios – von der Bildung einer solchen, neuen Wegsamkeit nach 30 000 Jahren ausgegangen (vgl. Kapitel 4.5.2).

Aus der Analyse und den Schlussfolgerungen in [BGR 2002] lassen sich für die Zeitperiode zwischen 150 000 Jahren und rund 1 Mio. Jahre folgende Aussagen ableiten:

- Tektonische Verschiebungen (einschließlich salttektonischer Verformungen) in Größenordnungen, welche Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben können, sind äußerst unwahrscheinlich und werden daher im Langzeitsicherheitsnachweis nicht betrachtet.
- Eisbedeckungen mit mächtigen Gletschern können tiefe lokale Ausräumungen im Lockergestein des Deckgebirges bewirken, die sich nach dem Rückzug der Gletscher wieder auffüllen. Die Durchlässigkeitsverteilung im Deckgebirge verändert sich durch diesen Prozess. In welchem Maße die Festgesteinsanteile des Deckgebirges und des Hutgesteins von Schmelzwassererosion und exarativen Prozessen betroffen sein können, ist nicht sicher prognostizierbar. Eine Ausräumung bis tief ins Hutgestein ist jedoch wenig wahrscheinlich. Dies hat weder bei den vergangenen Eisvorstößen stattgefunden, noch liefern die Standortverhältnisse dafür günstige Randbedingungen.
- Eisbedeckungen mit mächtigen Gletschern können in Eisrandlagen kurzfristig zu hohen Subrosionsraten am Salzspiegel führen. Der Salzspiegel kann dadurch – speziell beim hypothetischen Eintreten von mehreren Eisbedeckungen mit starker Gletschermächtigkeit – bis zu den hoch gelegenen Grubenbauen im Zentralteil der Grube Bartensleben und in der Grube Marie absinken.
- Während der nächsten 1 Mio. Jahre wird die Mächtigkeit von Deckgebirge/Hutgestein nicht in relevantem Maße abnehmen.
- Der Grundwasserfluss im Deckgebirge kann sich wesentlich gegenüber den heutigen Verhältnissen verändern. Während beschränkter geologischer Zeitperioden können im Hutgestein erhöhte Durchläs-

---

<sup>27</sup> Nicht eingeschlossen bei dieser Aussage in [BGR 2002a] sind die möglichen geomechanischen Folgen von größeren Lösungshohlräumen im Salinar nahe des Salzspiegels (vgl. Kapitel 4.2.2).

sigkeiten und deutlich höhere Grundwasserflüsse auftreten. Dadurch können an NaCl ungesättigte Wässer verstärkt zum Salzspiegel gelangen.

### 4.3.2 Einflüsse auf die Entwicklung des Systems „Endlager Morsleben“

Die in Kapitel 4.3.1 zusammengefasste Analyse der möglichen künftigen Entwicklungen der geologischen Gegebenheiten am Standort ergibt folgende Randbedingungen für die Entwicklung des Systems „Endlager Morsleben“ und damit für den Nachweis der Langzeitsicherheit:

- Der Fortbestand der heutigen Verhältnisse mit nur geringfügigen Änderungen ist möglich und durchaus plausibel.
- Nach einigen 10 000 Jahren können im Hutgestein neue Systeme mit erhöhten hydraulischen Durchlässigkeiten entstehen, deren Permeabilität mit jener der Schichtenfolge DGL vergleichbar ist.
- Während Perioden mit Permafrost – nicht zu unterstellen vor Ablauf von etwa 60 000 Jahren – sind stärkere Änderungen des Grundwasserflusses im Deckgebirge möglich.
- Ab etwa 150 000 Jahren nach heute sind erhebliche Veränderungen der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge und im Hutgestein nicht auszuschließen. Der Salzspiegel kann bei mehrfacher Vergletscherung während der kommenden 1 Mio. Jahre bis zu den obersten Abbauen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie absinken. Die geologischen Verhältnisse im Dach der Salzstruktur in Folge von glazialen Erosions- und Sedimentationsprozessen sind nicht sicher zu prognostizieren. Die Überdeckung der Salzstruktur und damit der mechanische Schutz des Endlagers bleiben jedoch bestehen<sup>28</sup>.

## 4.4 WICHTIGE SACHVERHALTE, EREIGNISSE UND PROZESSE FÜR DEN LANGZEITSICHERHEITSNACHWEIS

Als Schlussfolgerungen der vorangegangenen Kapitel 4.1 bis 4.3 werden nachfolgend die wichtigsten Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse (FEP) für den Nachweis der Langzeitsicherheit stichwortartig aufgezählt. Dies dient dem besseren Verständnis von Kapitel 4.5, wo die im Sicherheitsnachweis betrachteten Szenarien aufgeführt und kurz charakterisiert werden. Die wichtigsten FEP sind (undifferenziert für die Systementwicklungen „trockene Grube“ und „mit relevantem Lösungszutritt“):

- gebirgsmechanische Stabilisierung der Grube durch weitgehenden Versatz
- hydraulische Unterteilung der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie in ELB WSF, ELB OF und Restgrube durch Abdichtungen, nur begrenzt belastbare Trennung der Gruben Marie und Bartensleben südlich des ELB NF
- intakte Steinsalz-Barrieren um ELB WSF und ELB OF, verletzt bzw. unvollständig nur durch
  - Strecken mit Abdichtungen zur Restgrube
  - Schacht Bartensleben mit Verschluss
  - Hauptanhydrit zwischen ELB OF und Zentralteil
- bestehender Lösungszutritt in Restgrube (Marie) und möglicherweise künftige(r) Lösungszutritt(e) in Restgrube, mögliche Zutrittsorte und Zutrittsraten nur beschränkt eingrenzbar

---

<sup>28</sup> gegenüber heute höchstens in geringfügigem Maße vermindert



- hydraulische Trennung zwischen Südfeld und Westfeld (Teile von ELB WSF) auf der 3. und 4. Sohle durch Abdichtungen, hydraulische Verbindung durch Großbohrloch ausgehend von der 1. Sohle im Südfeld
- verbleibende unversetzte und mit kompaktierbarem Versatz verfüllte Hohlräume: unmittelbar nach Verschluss des Endlagers luftgefüllt, beinhalten höchstens geringe Lösungsmengen
- Versatz aus Salzbeton: nicht oder nur äußerst gering kompaktierbar, lösungsgesättigt, Porenlösung wenig mobil
- nicht prognostizierbares System von hydraulischen Wegsamkeiten innerhalb der Restgrube, des ELB WSF und des ELB OF mit (auch großräumig) nicht belastbaren Fließwiderständen
- Gasbildung durch Metallkorrosion und mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen
- Konvergenz der unversetzten und mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlräume, mit der Zeit abnehmend durch Stützwirkung des Fluiddrucks und des kompaktierbaren Versatzes
- Zeitliche Entwicklung der Rate des Lösungszutritts aus dem Hutgestein in die Restgrube durch eventuelle Veränderungen der Permeabilitäten und durch den Druckanstieg in der Restgrube, Ende des Lösungszutritts spätestens bei Erreichen des hydrostatischen Drucks in der Restgrube
- Bildung von neuen Wegsamkeiten in der Salzbarriere bei Anstieg des Fluiddrucks über den lithostatischen Druck: Bildung von Mikroriss-Systemen oder – unwahrscheinlich, aber nicht mit Sicherheit auszuschließen – Frac-Bildung
- mögliche Untersättigung von aus dem Hutgestein in die Restgrube zutretender Lösung an NaCl, Aufsättigung an Steinsalz, Entstehung von Lösungshohlräumen
- Umlösung an Kalilagern, Entstehung von Lösungshohlräumen mit ausgefallter Festphase, resultierende Mg-Konzentration der Lösung in einiger Entfernung von den Kalilagern nicht prognostizierbar
- gebirgsmechanische Auswirkungen der neu durch Auf- und Umlösung entstandenen Hohlräume
- mögliche Entstehung neuer Wegsamkeiten im Salinar der Restgrube durch Auf- und Umlösungen
- früher Lösungskontakt der Abfälle in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen (ELB ZT und ELB NF)
- Korrosion der Abdichtungen aus Salzbeton bei Kontakt mit Mg-haltiger Lösung (langsamer Prozess)
- Korrosion der Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton bei Kontakt mit Mg-ärmerer Lösung (langsamer Prozess)
- zunächst langsamer, nach eventueller Durchkorrosion einer Abdichtung rascher Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche (ELB WSF und ELB OF)
- möglicher Lösungszutritt zum ELB OF entlang Hauptanhydrit
- Gasfluss entlang Abdichtungen nach Überwinden des Gaseindringdrucks von Abdichtbauwerk oder evtl. verbliebener Auflockerungszone
- Anstieg des Lösungspegels in den abgedichteten Einlagerungsbereichen in Abhängigkeit von der vorangegangenen Gasbildung und vom vorangegangenen Entweichen von Gas aus dem Einlagerungsbereich
- möglicher Lösungsübertritt innerhalb des ELB WSF vom Südfeld in das Westfeld entlang des Großbohrlochs ausgehend von der 1. Sohle des Südfelds und entlang der mit Abdichtungen versehenen Strecken auf der 3. und 4. Sohle
- Auspressen von Gas oder Lösung aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen in die übrige Grube durch weiteren Druckanstieg als Folge von Konvergenz und Gasbildung
- Akkumulation von Grubenluft und gebildetem Gas in hoch gelegenen Bereichen der Grube, Übertritt von Gas aus der Grube in das Hutgestein bei Vorliegen einer Übertrittsstelle und nach Überschreiten der Summe aus hydrostatischem Druck und Gaseindringdruck der Wegsamkeit

- Auspressen von Lösung aus der Grube in das Hutgestein bei ausreichend hoher Lösungsättigung in der Grube an der Übertrittsstelle
- Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen nach Kontakt mit Lösung (Mobilisierung von volatilem  $^{14}\text{C}$  schon vorher); konservative Annahme von rascher und vollständiger Mobilisierung aller Radionuklide (d. h. Vernachlässigung von Rückhaltung in Abfall und Abfallmatrix, Löslichkeitsgrenzen und Sorption) außer für  $^{14}\text{C}$  in allen Einlagerungsbereichen und für  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA (s. u.)
- Mobilisierung von  $^{14}\text{C}$  als  $^{14}\text{CO}_2$  und  $^{14}\text{CH}_4$ , Carbonatisierung von  $^{14}\text{CO}_2$  im Isotopengleichgewicht mit dem nichtradioaktiven  $\text{CO}_2$ ,  $^{14}\text{CH}_4$  in Lösung und in Gasphase
- Mobilisierung von  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA beschränkt durch Sorption am Salzbeton am Einlagerungsort
- advektiv/dispersiver und diffusiver Radionuklidtransport in Lösung in der Grube: vereinfacht angenommen als instantan außer entlang der Abdichtungen, Vernachlässigung von Sorption und von Diffusion in die stagnierenden Porenwässer des Salzbetons (Ausnahme:  $^{226}\text{Ra}$  aus Radium-VBA, s. u.)
- rein diffusiver Transport des  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA durch den Salzbetonersatz des Streckenstummels bis in durchströmbare Grubenbaue des ELB OF mit Rückhaltung durch Sorption am Salzbeton
- Mischen der Lösung aus den Einlagerungsgrubenbauen mit jener aus den übrigen Grubenbauen des Einlagerungsbereichs (spätestens beim kanalisierten Übertritt aus dem ELB in die übrige Grube)
- Mischen der Lösung aus den Einlagerungsbereichen mit jener aus der übrigen Grube (spätestens beim kanalisierten Übertritt aus der übrigen Grube durch das Salinar in das Hutgestein)
- Auspressen von Radionukliden aus der Grube in das Hutgestein mit der Lösung
- Radionuklidtransport in Lösung durch Hutgestein und Deckgebirge, angetrieben praktisch ausschließlich vom Auspressen der Lösung aus der Grube, beeinflusst durch hydraulische Effekte, Dispersion und Dichteeffekte
- Verzögerung des Radionuklidtransports in Lösung durch Sorption im Hutgestein (Schichtenfolge DGL) und im Deckgebirge
- Verdünnung mit Wässern aus dem Hutgestein und Deckgebirge, spätestens beim Übertritt in das oberflächennahe Grundwasser
- radioaktiver Zerfall und Bildung von Tochternukliden während der Zeitperiode bis zur Mobilisierung der Radionuklide und während deren Transport vom Einlagerungsort der Abfälle bis in die Biosphäre
- dichtebedingter Aufstieg von Gas durch das Hutgestein und das Deckgebirge, Transport von volatilen Radionukliden; pessimistische Vereinfachung: Vernachlässigung des Radionuklidaustauschs zwischen Gasphase und Porenwässern im tieferen Untergrund.
- möglicher langfristiger Fortbestand der heutigen Verhältnisse in Hutgestein und Deckgebirge
- mögliche Entstehung von Bereichen im Hutgestein mit erhöhter Permeabilität
  - kurzfristig als Folge der Konvergenz von eventuellen ausgedehnten Lösungshohlräumen im Salinar nahe des Salzspiegels
  - nach einigen 10 000 Jahren durch neotektonische Bewegungen
- mögliche stärkere Änderungen des Grundwasserflusses im Deckgebirge während Permafrostperioden (nicht zu unterstellen für die nächsten ca. 60 000 Jahre)
- mögliche erhebliche Veränderungen der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge und Hutgestein ab etwa 150 000 Jahre
- mögliches Absinken des Salzspiegels bis zu den obersten Grubenbauen zwischen 150 000 Jahren und 1 Mio. Jahren nach heute
- Die Überdeckung der Salzstruktur durch Hutgestein und Deckgebirge bleibt – mit höchstens geringer Reduktion der Mächtigkeit – erhalten.

## 4.5 BETRACHTETE SZENARIEN

### 4.5.1 Radionuklidtransport bei der Systementwicklung „trockene Grube“

Die mögliche Systementwicklung „trockene Grube“ wurde in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Mit der Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / trockene Grube“<sup>29</sup> werden die Entwicklungen untersucht, bei denen in der Phase nach Verschluss des Endlagers keine zusätzlichen Wegsamkeiten aus dem Hutgestein in die Restgrube mit Lösungszutritt entstehen und der bestehende Lösungszutritt in das Lager H der Grube Marie abnimmt und schließlich endet. In den Szenarien dieser Szenariengruppen tritt in der Phase nach Verschluss des Endlagers kumuliert höchstens eine vernachlässigbar geringe Lösungsmenge in die Restgrube Marie zu. Zu untersuchen ist in erster Linie die Möglichkeit der Bildung von neuen Wegsamkeiten in der Steinsalz-Barriere durch ein Ansteigen des Gasdrucks über den örtlichen Gebirgsdruck in Teilen des Endlagers. Dies würde ein Entweichen von möglicherweise radionuklidhaltigem Gas und eventuell auch ein späteres Zutreten von Lösung aus dem Hutgestein in das Grubengebäude auslösen. Die neuen Wegsamkeiten können als Mikroriß-Systeme oder – unwahrscheinlich, aber nicht mit Sicherheit auszuschließen – als makroskopische Fracs ausgebildet sein.

Die Systementwicklung „trockene Grube“ wird aufgrund der weitgehenden Vollverfüllung der Doppelschachanlage Bartensleben-Marie und der damit verbundenen Stützwirkung als die plausibelste Entwicklung eingestuft.

Die Freisetzung von Radionukliden in der Gasphase bei der Entwicklung „trockene Grube“ wird im Rahmen des „Radionuklidtransports in der Gasphase“ (Kapitel 4.5.3) beschrieben. Eine Radionuklidfreisetzung in Lösung als Folge eines späten Lösungszutritts nach einer unwahrscheinlichen Frac-Bildung wird durch die Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung“ (Kapitel 4.5.2) abdeckend berücksichtigt.

### 4.5.2 Radionuklidtransport in Lösung

Die Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung“ umfasst die Systementwicklungen, bei denen in relevantem Maße Lösung in die Restgrube zufließt, sei es über den bestehenden Lösungszutritt in das Lager H der Grube Marie oder über eine neue Wegsamkeit mit Lösungszutritt in die Grube Marie oder die Restgrube Bartensleben. Die möglichen Systementwicklungen für diese Szenariengruppe und die (potenziell) wichtigen FEP wurden in Kapitel 4.2.2 und 4.3 beschrieben. Die bei diesen Systementwicklungen mögliche Radionuklidfreisetzung in der Gasphase wird mit einer entsprechenden gesonderten Szenariengruppe abgedeckt (vgl. Kapitel 4.5.3). Nachfolgend werden die analysierten Szenarien, das Referenzszenario und die alternativen Szenarien, für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ charakterisiert.

#### Referenzszenario

Der Ort des Lösungszutritts in die Restgrube wird nicht näher eingegrenzt. Die hydraulische Trennung der Gruben Marie und Bartensleben wird als unwirksam angenommen, so dass die gesamte Restgrube nur noch in Abhängigkeit von der Zutrittsrate und der Konvergenz der Grubenbaue voll läuft. Für die Dauer des Volllaufens werden plausible Zeitperioden unterstellt, die eine Bandbreite von wenig wahrscheinlichen kurzen

---

<sup>29</sup> vgl. Einleitung zu Kapitel 3.4; die Systementwicklungen dieser Szenariengruppe wird in [GRS 2006b] als „ungestörte Entwicklung“ bezeichnet.

Zeiten bis relativ langen Zeiten aufspannen. Auf der Basis der Modellrechnungen zur möglichen Lösungszutrittsrate in die Restgrube (vgl. Kapitel 6.2) und der Konvergenz ihrer Hohlräume (Kapitel 6.4.1) wurden als Referenzwert für die Dauer des Volllaufens 7500 Jahre und als Bandbreite 1500 Jahre – 25 000 Jahre angesetzt. Im Sinne eines „what-if“-Szenarios wird zusätzlich ein sehr rasches Volllaufen der Restgrube analysiert<sup>30</sup>.

In Bezug auf die Bildung von Hohlräumen durch Lösung an Steinsalz und Umlösung an Kalisalz wird angenommen, dass aus dem Hutgestein von Anfang an reines Süßwasser in die Restgrube zutritt und dass sich dieses – nach Aufsättigung am Steinsalz – an Carnallit bis zum invarianten Punkt IP21 umwandelt. Dies ergibt in ungünstiger Weise die größten Lösungshohlräume in der Grube. Ein Vordringen von an NaCl unter-sättigten Lösungen zu den Abdichtungen wird ausgeschlossen.

In Bezug auf das Vordringen von Lösung in die abgedichteten Einlagerungsbereiche und die Korrosion der Abdichtungen wird angenommen, dass die Abdichtungen den geplanten hydraulischen Anfangswiderstand (d. h. insbesondere ohne signifikante, höher durchlässige Auflockerungszonen) aufweisen und dass die in die Abdichtungen eindringende Lösung einen erheblichen Mg-Gehalt aufweist<sup>31</sup>. Ein Lösungszutritt zum ELB OF entlang des Hauptanhydrit wird im Referenzszenario ausgeschlossen. Der Lösungszutritt über den Schachtverschluss Bartensleben ist vernachlässigbar gering.

Es wird angenommen, dass Mg-haltige Lösung in der übrigen Grube nicht in nennenswertem Maße mit dem Salzbetonversatz reagiert und diesen korrodiert.

Die hydraulische Trennung der Grubenfelder Südfeld und Westfeld auf der 3. und 4. Sohle wird in den Modellrechnungen von [GRS 2009b] berücksichtigt, in den Rechnungen von [Colenco 2009] in pessimistischer und vereinfachender Weise vernachlässigt. Die Rechnungen in [Colenco 2009] setzen damit in jedem Fall voraus, dass bei einem Lösungszutritt in den ELB WSF auch die Abfälle im Westfeld mit Lösung in Kontakt geraten und dadurch Radionuklide mobilisiert und ausgepresst werden. In [GRS 2009b] tritt dies nur auf, wenn der Lösungspegel im Südfeld ausreichend hoch (bis zur 1. Sohle) ansteigt und dadurch ein Überlauf über das Großbohrloch stattfindet.

Betreffend den Einschluss von Grubenluft und gebildetem Gas in den abgedichteten Einlagerungsbereichen wird mit mehreren Varianten ein breites Spektrum von Möglichkeiten unterstellt, vom praktisch widerstandsfreien Entweichen während des Eindringens von Lösung über das Entweichen nach Überschreiten eines vorgegebenen Gaseindringdrucks bis zum dauernden Einschluss im Einlagerungsbereich. Die Gasbildung erfolgt überall und zu jeder Zeit unter Annahme einer ausreichenden Verfügbarkeit von Wasser. Es wird jedoch angenommen, dass Teile der Gas bildenden Stoffe schon während der Betriebsphase (d. h. bei noch nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen) Gas gebildet haben oder zum Zeitpunkt des Lösungszutritts in den Einlagerungsgrubenbau bereits vollständig von Salz eingeschlossen sind, so dass in der Phase nach Verschluss des Endlagers nur ein Teil der theoretisch möglichen Gasmenge gebildet werden kann.

Die Radionuklidmobilisierung und der Radionuklidtransport im Grubengebäude erfolgen im Referenzszenario (wie in den alternativen Szenarien) entsprechend den Angaben in Kapitel 4.4: instantane und vollständige Radionuklidmobilisierung bei Lösungszutritt zu den Abfällen (außer <sup>14</sup>C in allen Einlagerungsbereichen und <sup>226</sup>Ra aus der Radium-VBA), advektiv/dispersiv und diffusiver Radionuklidtransport in Lösung ohne signifikante zeitliche Verzögerung (Vernachlässigung von Sorption und von Diffusion in stagnierendes Porenwasser, außer <sup>226</sup>Ra aus der Radium-VBA im Salzbetonversatz des Streckenstummels), Vermischung mit radionuklidfreier Lösung aus anderen Grubenbereichen, Radionuklidaustritt in das Hutgestein mit ausgepresster

---

<sup>30</sup> modelltechnisch ein instantanes Volllaufen der übrigen Grube

<sup>31</sup> Bei der deterministischen Modellrechnung zum Referenzfall wird unterstellt, dass die an den Abdichtungen anstehende Lösung einen Mg-Gehalt von 10 % des Gehalts von IP21-Lösung aufweist. Mit diesem Mg-Gehalt bewirkt die Lösung sowohl an Salzbeton als auch an Magnesiabeton Korrosion. Bei den probabilistischen Modellrechnungen wird der Mg-Gehalt der an den Abdichtungen anstehenden Lösung zwischen 0 und 100% in Bezug auf den Gehalt von IP21-Lösung variiert. Mit deterministischen Modellrechnungen werden zudem als „what-if“-Szenarien die Auswirkungen analysiert, die ein Eindringen von reiner NaCl-Lösung bzw. von IP21-Lösung in die Abdichtungen zur Folge hätte.



Grubenlösung. Abweichende Annahmen mit ungünstigeren resultierenden Auswirkungen des Endlagers gibt es nicht (außer für  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA und für  $^{14}\text{C}$ ). Für die Vermischung der Lösungen aus den Einlagerungsbereichen mit der Lösung aus der übrigen Grube werden sogenannte „Mischungsbereiche“ ausgewiesen. Sie umfassen einige wenige, übereinander liegende Abbaue entlang der möglichen Radionuklidtransportpfade von den Abdichtungen zu den potentiellen Übertrittsorten in die Wegsamkeiten durch das Salinar in das Hutgestein. Für die einzelnen Sohlen erfolgte die Auswahl von Abbauen (und damit des maßgebenden Transportpfades) derart, dass der Mischungsbereich insgesamt ein geringes fluidzugängliches Volumen aufweist. Es wird angenommen, dass (i) die radionuklidhaltige Lösung aus den Einlagerungsbereichen – ggf. nach Überwinden der (korrodierten) Abdichtungen – ohne weitere Transportverzögerung in den entsprechenden Mischungsbereich gelangt und dass (ii) die Lösung aus der übrigen Grube durch einen der Mischungsbereiche in das Hutgestein ausgepresst wird. Vor dem Übertritt in die Wegsamkeit aus dem Mischungsbereich durch das Salinar in das Hutgestein erfolgt eine Vermischung der radionuklidhaltigen Lösung aus den Einlagerungsbereichen und der nicht radionuklidhaltigen Lösung aus der übrigen Grube.

Lösung wird aus der Grube – als ungünstige Annahme<sup>32</sup> – über nur eine einzige Übertrittsstelle in das Hutgestein ausgepresst. Die Auspressung erfolgt durch Konvergenz der Grubenbaue und Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung. Eine Behinderung oder Verzögerung der Lösungsauspressung durch eine Gasblase an der Übertrittsstelle wird nicht angenommen.

Der Anstieg des Fluiddrucks in der Restgrube als Folge des hydraulischen Widerstands im Hutgestein gegen das Auspressen von Lösung wird vernachlässigt. Die Berücksichtigung dieses Effekts hätte eine geringere Konvergenz in der Grube und damit eine verminderte Auspressrate zur Folge.

Für den Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) werden in Anlehnung an Struktur und Eigenschaften der Schichtenfolge DGL im Hutgestein folgende Annahmen getroffen:

- Transportdistanz 220 m
- Transportquerschnitt  $150\text{ m}^2$  (Bandbreite  $50\text{ m}^2 - 250\text{ m}^2$ ) mit einer durchflossenen Porosität von 30 % (Bandbreite 20 % – 30 %)
- Sorptionsparameter des transportwirksamen Bestandteils der Schichtenfolge DGL (grauer Salzton) mit breiter Variation in die ungünstige Richtung
- kanalisierter Transport entlang dieses Transportpfades, angetrieben durch das Auspressen von Lösung aus der Grube in das Hutgestein. Aufgrund der Konvergenz der Grubenbaue in der übrigen Grube führen diese Annahmen – für die Referenzwerte aller maßgebenden Parameter – zu einer Transportzeit für nicht sorbierende Radionuklide durch Hutgestein und Deckgebirge von 1000 Jahren während mehr als 100 000 Jahren<sup>33</sup>. Dies entspricht der unteren Grenze der mit dem Deckgebirgsmodell ermittelten Transportzeiten (vgl. Kapitel 4.2.2).

Für die Berechnung der Konzentrationen kurzlebiger Tochternuklide von langlebigen freigesetzten Radionukliden im oberflächennahen, genutzten Grundwasser wird angenommen, dass der Transportpfad, im Anschluss an den oben charakterisierten Pfad, durch eine geologische Einheit mit den Eigenschaften (insbesondere den Sorptionseigenschaften) der Oberen Alleringerslebener Schichten verläuft. Die Länge der Strecke und die Abstandsgeschwindigkeit werden derart gewählt, dass diese Strecke für längerlebige Radionuklide keine signifikante Barriere darstellt.

Dieser Ansatz für den Transportpfad durch das Hutgestein und Deckgebirge im Referenzszenario ist in erkennbarer Weise angemessen bis pessimistisch für die Abbildung der Radionuklidausbreitung entlang der Transportpfade vom Typ (ii) und (iii) gemäß der Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hut-

---

<sup>32</sup> Bei einem Auspressen von Lösung über mehrere räumlich getrennte Übertrittsstellen in das Hutgestein wären zwar die Radionuklidkonzentrationen in der ausgepressten Lösung an einer der Übertrittsstellen höher als unter der getroffenen Annahme. Der Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge wäre aber langsamer und die Verdünnung stärker (s. u.).

<sup>33</sup> Danach steigt die Transportzeit wegen der dann signifikant abnehmenden Rate der Lösungsauspressung aus der Salzstruktur an.

gestein und Deckgebirge bei Lösungsauspressung aus der Grube (vgl. Kapitel 4.2.2 und 6.2). Aufgrund anderer, konservativer Annahmen und unberücksichtigter, für den Langzeitsicherheitsnachweis günstiger FEP, wie z. B.

- die ungünstigen Annahmen für den Transportabschnitt „Obere Alleringerslebener Schichten“, welcher bei den Transportpfaden vom Typ (i) einen wesentlichen Teil des Ausbreitungspfads darstellt,
- die unterstellte Kanalisierung auf einen einzigen Transportpfad anstelle einer realitätsnäheren Aufteilung der in das Hutgestein ausgepressten Lösung auf verschiedene Transportpfade durch Hutgestein/Deckgebirge,
- die vernachlässigte Rückhaltung von Radionukliden am Salzbeton in der übrigen Grube und
- die vernachlässigte, aber wahrscheinlich eintretende Ausbreitung von kontaminierter Lösung in größere Bereiche der übrigen Grube als lediglich in den unterstellten Mischungsbereich,

ist dieser Ansatz auch für den Transportpfad vom Typ (i) angemessen für die Quantifizierung der Radionuklidrückhaltung in der Geosphäre im Referenzszenario.

Die Verdünnung der aus der Grube ausgepressten Lösung während des Transports durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) sowie nach dem Übertritt in das oberflächennahe genutzte Grundwasser erfolgt im Referenzszenario (wie in den alternativen Szenarien) pauschal durch die Vermischung mit dem Grundwasserfluss, der durch ein Gebiet im Allertal fließt, das südwestlich der Aller liegt und entlang des Allertals eine Ausdehnung von 200 m aufweist. Dieser Grundwasserfluss beträgt 15 000 m<sup>3</sup>/a entsprechend 29 l/min mit einer Bandbreite von 10 000 m<sup>3</sup>/a – 100 000 m<sup>3</sup>/a ([Colenco 2009], Anhang T). In diesem Bereich liegt auch der Wasserbedarf von kleinen, sich selbst versorgenden Dorfgemeinschaften unter verschiedenen klimatischen Verhältnissen [GRS 2002]. Die Länge des Abschnittes im Allertal wurde aufgrund von pessimistischen Überlegungen zur Ausbreitung der ausgepressten Lösung unter Dichteeinfluss gewählt. Die Rate des Grundwasserflusses wurde den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung bei Vernachlässigung von Dichteeffekten (sog. Süßwasserrechnungen, vgl. Kapitel 6.2) entnommen. Unabhängig von der Verdünnung im Grundwasserstrom ist wegen des Salzgehaltes der aus der Grube ausgepressten Lösung eine Mindestverdünnung um den Faktor 500 als Voraussetzung für die unterstellte und nachfolgend beschriebene intensive Nutzung des „kontaminierten“ Grundwassers anzusetzen.

Die potenzielle Strahlenexposition wird ausgehend von den Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser unter Annahme der heutigen Verhältnisse in der Biosphäre und für heutiges Verhalten der Menschen ermittelt. Dazu wird unterstellt, dass der gesamte Wasserbedarf von Mensch und Landwirtschaft aus dem lokalen, „kontaminierten“ Grundwasser gedeckt und kein weiteres Wasser aus der Aller und aus anderen Grundwasserbereichen bezogen wird. Die Berechnung der Strahlenexposition aus den Radionuklidkonzentrationen im genutzten Wasser erfolgt im Wesentlichen für eine erwachsene Einzelperson in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV. Zusätzlich werden für die Bewertung auch die Strahlenexpositionen für die in Anlage VII, Teil B StrlSchV genannten Altersgruppen herangezogen.

Die oben beschriebenen Verhältnisse sind im Referenzszenario während des gesamten Nachweiszeitraums unveränderlich.

## Alternative Szenarien

Nachfolgend werden die untersuchten alternativen Szenarien angeführt und kurz charakterisiert. Dies erfolgt durch die Angabe der Annahmen, durch welche sie sich vom Referenzszenario unterscheiden. Systementwicklungen, bei denen einzelne oder mehrere Parameter Werte aufweisen, die vom entsprechenden Referenzwert abweichen, stellen keine alternativen Szenarien sondern Varianten dar<sup>34</sup>.

---

<sup>34</sup> Bei der Durchführung der Modellrechnungen wird in Abweichung von dieser Aussage das sehr rasche Volllaufen der Restgrube (modelltechnisch: instantanes Volllaufen der Übrigen Grube) als gesondertes „what-if“-Szenario und nicht als Extremvariante des Referenzszenarios betrachtet. In analoger Weise sind die Systementwicklungen,

### *Lösungszutritt zum ELB OF entlang des Hauptanhydrit*

In diesem Alternativszenario wird unterstellt, dass der Hauptanhydrit zwischen dem ELB OF und dem Zentralteil eine hydraulisch wirksame Wegsamkeit aufweist, über die Lösung zunächst dem Einlagerungsbereich zutreten und nach Erreichen eines ausreichenden Fluiddrucks im Einlagerungsbereich auch wieder austreten kann. Die Parameter der unterstellten Wegsamkeit basieren auf einer Interpretation der im Hauptanhydrit der Ostmulde gemessenen Daten und Beobachtungen [Colenco 2009], [GRS 2009b]. In diesem Szenario wird die Durchströmung der Abdichtungen zum ELB OF als vernachlässigbar gering unterstellt.

### *Auflockerungszone um Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit*

Obwohl geplant ist, vor dem Errichten der Abdichtungsbauwerke die vorhandenen Auflockerungszonen der Strecken gebirgsschonend zu entfernen, ist es möglich, dass nach dem Volllaufen der Restgrube im steif reagierenden Hauptanhydrit auf der 4. Sohle eine hydraulisch wirksame Auflockerungszone um das Abdichtbauwerk besteht. Dadurch könnte Lösung dem ELB OF im Vergleich mit dem Referenzszenario in verstärktem Maße zufließen. Wenn der Mg-Gehalt der zutretenden Lösung zudem noch niedrig ist, würde dies darüber hinaus zu einer beschleunigten Korrosion des Abdichtbauwerks aus Magnesiabeton führen. In diesem Alternativszenario wird eine zehnfach höher durchlässige Auflockerungszone um das Abdichtbauwerk aus Magnesiabeton als im Referenzfall angenommen.

### *Extreme Lösungszusammensetzung bei den Abdichtungen*

Der Mg-Gehalt der anstehenden Lösung bestimmt – neben anderen Einflussgrößen – die Zeitdauer, während der die Abdichtungen den Zutritt von Lösung zu den Abfällen behindern (vgl. Kapitel 4.2.2, Unterkapitel „Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche“). Mit zwei „what-if“-Szenarien werden die Auswirkungen einer extremen Zusammensetzung der an den Abdichtungen anstehenden Lösung untersucht: In einem „what-if“-Szenario wird angenommen, dass die anstehende Lösung zwar mit Steinsalz im Lösungsgleichgewicht steht, aber keinen Kontakt zu Kalilagern hatte und deshalb kein Magnesium enthält. In einem zweiten „what-if“-Szenario wird angenommen, dass die anstehende Lösung sehr intensiven Kontakt mit Kalisalzen hatte, auf dem anschließenden Weg zur Abdichtung kein Magnesium durch Wechselwirkung mit unkorrodiertem Salzbeton verlor und deshalb bei der Abdichtung die Zusammensetzung von IP21-Lösung aufweist.

In Bezug auf die Hohlrumbildung in der Restgrube durch Auf- bzw. Umlösung der aus dem Huttgestein zutretenden Lösung und in Bezug auf die Annahme betreffend Wechselwirkung zwischen der Lösung und dem Salzbetonversatz in der übrigen Grube unterscheiden sich die beiden „what-if“-Szenarien nicht vom Referenzszenario.

### *Unwirksame Abdichtungen*

Dieses Alternativszenario ist dadurch charakterisiert, dass zwischen den abgedichteten Einlagerungsbereichen WSF und OF einerseits und der Restgrube andererseits hydraulische Wegsamkeiten mit hoher Permeabilität bestehen. Es deckt die unwahrscheinlichen Fälle ab, in denen (1) eine der Abdichtungen zu den Einlagerungsbereichen fehlerhaft erstellt wird oder (2) eine unerkannte Wegsamkeit in der Grube existiert (z. B. unbekannte Bohrung) oder (3) sich das Hartsalzflöz zwischen den Unterwerksbauen des Südfelds und dem Zentralteil entgegen den Erwartungen frühzeitig und durchgehend umfließt. Die hydraulische Leitfähigkeit dieser Wegsamkeiten wird in diesem Alternativszenario als sehr hoch angenommen.

---

bei denen an den Abdichtungen reine NaCl-Lösung bzw. IP21-Lösung ansteht, ebenfalls als „what-if“-Szenarien und nicht als Extremvarianten des Referenzszenarios definiert. Auf die Schlussfolgerungen hat dies jedoch keine Auswirkungen.

### *Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube*

In diesem Alternativszenario wird trotz der in Kapitel 4.2.2 angegebenen Begründung angenommen, dass der Salzbeton in der übrigen Grube vollständig durch Mg-haltige Lösungen korrodiert wird und dadurch seine Stützwirkung verliert. Dadurch erhöht sich die Konvergenz der Grubenbaue. Die Stützwirkung von korrodiertem Salzbeton wird jener von Salzversatz bei gleicher Porosität gleichgesetzt. Als Anfangsporosität des korrodierten Salzbetons wird 20 % angenommen, was der Porosität des unveränderten Salzbetons entspricht.

### *Keine Gasbildung*

In einem Alternativszenario wird unterstellt, dass im Endlager keine Gasbildung stattfindet. Dadurch verringert sich in erster Linie die Rate der Lösungsauspressung aus den Einlagerungsbereichen, in zweiter Linie jedoch auch die Rate der Lösungsauspressung aus der Grube in das Hutgestein. Andererseits kann in diesem Alternativszenario mehr und rascher Lösung in die abgedichteten Einlagerungsbereiche eindringen, da die Gasphase nur durch die eingeschlossene Grubenluft gebildet wird und der Gasdruck in den Einlagerungsbereichen deshalb langsamer ansteigt als im Referenzszenario.

### *Keine mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen*

In einem weiteren Alternativszenario zur Gasbildung wird unterstellt, dass zwar Gasbildung durch anaerobe Korrosion von Metallen stattfindet, die organischen Stoffe jedoch nicht mikrobiell zersetzt werden. In diesem Fall sind zum einen die Gasbildung und deren Einfluss auf die Lösungsbewegung geringer als im Referenzszenario. Zum anderen ist für das in organischen Verbindungen eingelagerte  $^{14}\text{C}$  von einer vollständigen Mobilisierung in Form von löslichen und nicht sorbierenden organischen Verbindungen auszugehen. Eine dritte Folge einer ausbleibenden mikrobiellen Zersetzung von organischen Stoffen ist eine niedrigere nicht radioaktive  $\text{CO}_2$ - und Carbonatkonzentration in den Einlagerungsbereichen und damit auch eine höhere Konzentration von anorganischem  $^{14}\text{C}$  in Lösung als im Referenzszenario.

### *Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein*

In diesem Alternativszenario wird unterstellt, dass sich nach 30 000 Jahren im Hutgestein neue Wegsamkeiten bilden. Die hydraulischen Eigenschaften des Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge werden wie diejenigen im Referenzszenario angenommen. Im Gegensatz zu den Verhältnissen, die im Referenzszenario während des gesamten Nachweiszeitraums und in diesem Alternativszenario bis 30 000 Jahre nach heute herrschen, wird jedoch unterstellt, dass für Zeiten später als 30 000 Jahre die Sorption entlang des gesamten Weges durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) vernachlässigbar gering ist. Mit der nach 30 000 Jahren in diesem Alternativszenario praktisch verschwindenden Barrierenfunktion von Hutgestein und Deckgebirge werden alle Langzeitentwicklungen abgedeckt, die gemäß der geowissenschaftlichen Langzeitprognose (Kapitel 4.3.2) zu betrachten sind.

### *Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben*

Die Abdichtung des Schachtes Bartensleben ist Teil des Barrierensystems des ELB WSF und besteht aus drei in Serie geschalteten Dichtelementen (Kapitel 3.3.2, Unterkapitel „Schachtverschlüsse“ und speziell Abbildung 3-4). Angesichts der mehrstufigen Auslegung ist ein Ausfall der Abdichtung äußerst unwahrscheinlich und im Rahmen der praktischen Vernunft für die Sicherheitsanalyse nicht zu unterstellen. Als „what-if“-Szenario werden gleichwohl die möglichen Auswirkungen einer mangelhaften Abdichtung des Schachtes Bartensleben untersucht. Dazu werden für dessen hydraulischen Widerstand Werte angesetzt, die bis zu einem Faktor 1000 niedriger (d. h. schlechter) sind als gemäß Auslegungsanforderung.



### *Extrem rasches Volllaufen der Restgrube*

In diesem „what-if“-Szenario werden die Auswirkungen untersucht, die ein hypothetisches, extrem rasches Volllaufen der Restgrube<sup>30</sup> zur Folge hätte.

## **Vollständigkeit der Szenarien**

Das Referenzszenario (mit den erwähnten Variationen der Parameter) und die Alternativszenarien beschreiben ein Spektrum von Systementwicklungen, deren Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit des Endlagers für den Lösungspfad abdeckend sind. Dies zeigt ein Vergleich mit den in Kapitel 4.4 zusammengestellten, potenziell sicherheitsrelevanten Sachverhalten, Ereignissen und Prozessen (FEP). Nicht unmittelbar einsichtig ist dies in Bezug auf die eventuelle kurzfristige Entstehung von Bereichen mit erhöhter Permeabilität im Hutgestein als Folge von ausgedehnten Lösungshohlräumen im Salinar nahe des Salzspiegels. Ein solcher Bereich würde nahe der Austrittsstelle von potenziell kontaminierter Lösung aus der Grube verlaufen und einen ähnlichen Transportpfad für Schadstoffe darstellen wie der Streckenabschnitt im Hutgestein der Ausbreitungspfade vom Typ (i) gemäß Kapitel 4.2.2 (speziell Abbildung 4-1). Die Entstehung eines solchen Bereichs mit erhöhter Leitfähigkeit im Hutgestein würde somit „lediglich“ die Aufteilung der ausgepressten Lösung auf die drei Typen von Ausbreitungspfaden verschieben. Diese Aufteilung wurde bei der Definition des modellhaften Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) jedoch nicht belastet.

### **4.5.3 Radionuklidtransport in der Gasphase**

Wie in Kapitel 3.4.2 erwähnt sowie in [Colenco 2009] (Anhang P) und [GRS 2009b] ausführlich dargelegt, kann sich die Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition durch Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad auf das radioaktive Methan ( $^{14}\text{CH}_4$ ) beschränken.

Es werden Szenarien aus zwei Szenariengruppen für die natürliche Systementwicklung betrachtet, für die Freisetzung von Gas aus der Grube bei der Entwicklung „trockene Grube“, d. h. bei Ausbleiben eines relevanten Lösungszutritts in die Grube, und für die Gasfreisetzung bei relevantem Lösungszutritt und damit bei einem Volllaufen der Restgrube in der Phase nach Verschluss des Endlagers. Für alle Szenarien wird angenommen, dass unmittelbar nach Verschluss des Endlagers folgende Bedingungen herrschen:

- Der Porenraum in den potenziellen Wegsamkeiten durch das Hutgestein ist vollständig mit Lösung gesättigt.
- Die unverfüllten Hohlräume und das Porenvolumen des kompaktierbaren Versatzes im Grubengebäude sind luftgefüllt. Das anfängliche Lösungsvolumen in diesen Volumen ist vernachlässigbar gering.
- Das gesamte  $^{14}\text{CH}_4$  hat sich bereits gebildet und ist vollständig in die Gasphase übergegangen. Ein Austritt aus der Grube hat noch nicht eingesetzt.

### **Gasfreisetzung bei der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“**

Bei einer Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ fließt nach dem Verfüllen und Verschließen des Endlagers Lösung mit beschränkter Rate aus dem Hutgestein in die Grube. Währenddessen wird durch die Metallkorrosion und die mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen Gas gebildet. Zugleich verringert sich aufgrund der Konvergenz der Gesamthohlraum in der Grube. Diese Prozesse führen zu einem Anstieg des Gasdrucks in der Restgrube und in den abgedichteten Einlagerungsbereichen. Wenn der Gasdruck in der Restgrube den Wert des hydrostatischen Drucks am Salzspiegel erreicht hat, endet der Zutritt von Lösung. Es wird unterstellt, dass sich das eingeschlossene Gas in der Grube – abgesehen von den Beschränkungen durch die Abdichtungen – oberhalb des Flüssigkeitsspiegels frei bewegen kann. Direkt unterhalb der

Wegsamkeit durch das Salinar zum Salzspiegel, an der Zutritts- und potenziellen Auspressstelle, bildet sich im betrachteten Szenario und im Gegensatz zu den Szenarien zum Lösungspfad eine große Gasblase. Diese verhindert, dass Lösung aus der Grube in das Hutgestein ausgepresst wird. Der Gasdruck steigt in der Grube durch Gasbildung und Konvergenz weiter an. Je nach der Gasdurchlässigkeit der Abdichtungen der Einlagerungsbereiche WSF und OF während dieser Zeit kann das in diesen Einlagerungsbereichen gebildete Gas – bei rascherem Druckanstieg – in die Restgrube entweichen und zum Druckanstieg in der Gasblase beitragen.

Nachdem der Gasdruck in der Gasblase im Grubenhöchsten unterhalb der Wegsamkeit zum Salzspiegel die Summe aus dem hydrostatischen Druck am Salzspiegel und dem Gaseindringdruck der potenziellen Wegsamkeiten im Hutgestein überschritten hat, beginnt Gas aus der Grube aus- und in Wegsamkeiten durch das Hutgestein einzudringen. Dadurch nimmt die Lösungssättigung in den Wegsamkeiten ab und deren Gaspermeabilität steigt an. Sobald sich das Gas so den Weg durch das gesamte Hutgestein gebahnt hat, beginnt der Transport durch das Deckgebirge und danach die Freisetzung in den oberflächennahen Grundwasserträger und in die Atmosphäre. Der Gasfluss aus der Grube ist dabei durch den Druck in der Grube und den Widerstand auf dem Transportweg durch das Hutgestein gegeben, welcher durch 2-Phasenprozesse bestimmt ist. Als potenzielle Transportwege für das Gas im Hutgestein werden sowohl die Schichtenfolge DGL als auch das „intakte“ Hutgestein betrachtet.

In den ungesättigten Bodenschichten wird das  $^{14}\text{CH}_4$  zu  $^{14}\text{CO}_2$  mikrobiell oxidiert (Annahme: vollständige Umsetzung). Direkte Inhalation und der Verzehr von Nahrungsmitteln, in welche das  $^{14}\text{C}$  über die Assimilation von  $^{14}\text{CO}_2$  durch Pflanzen gelangt ist, bewirken eine Strahlenexposition für die an der Austrittsstelle lebenden Menschen. Das repräsentative Szenario ist hier die großflächige Freisetzung von  $^{14}\text{CO}_2$  in die Atmosphäre über einer landwirtschaftlichen Nutzfläche, ein extremes Szenario eine punktförmige Freisetzung in den Keller eines Wohnhauses. In einem weiteren Szenario wird unterstellt, dass das in der Gasphase bis in das oberflächennahe Grundwasser transportierte  $^{14}\text{CH}_4$  dort vollständig in  $^{14}\text{CO}_2$  umgesetzt wird und dann in Lösung geht. Die zu bewertende Strahlenexposition erfolgt in diesem Fall durch Trinken von  $^{14}\text{C}$ -haltigem Wasser und den Verzehr von Nahrungsmitteln, die  $^{14}\text{C}$  aus dem Wasser aufgenommen haben.

### **Gasfreisetzung bei der Systementwicklung „trockene Grube“**

In der Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / trockene Grube / Radionuklidtransport in der Gasphase“ tritt der Grube keine nennenswerte Menge an Lösung zu, und die Grube bleibt trocken. Der Druck in der Restgrube steigt in diesem Fall nur durch Gasbildung und Konvergenz an. Vereinfachend wird angenommen, dass die Gasbildung trotz ausbleibendem Lösungszutritt wie in der Szenariengruppe mit Volllaufen der Restgrube fortschreitet. Wegen der „fehlenden“ Lösung in den Einlagerungsbereichen kann das mobilisierte und in der Form  $^{14}\text{CO}_2$  oder  $^{14}\text{CH}_4$  vorliegende  $^{14}\text{C}$  nicht in Lösung gehen oder als immobiles Carbonat ausfallen; es ist von einem vollständigen Übertritt des  $^{14}\text{C}$  in die Gasphase auszugehen.

Abgesehen von den genannten Unterschieden verlaufen die Szenarien der Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / trockene Grube / Radionuklidtransport in der Gasphase“ qualitativ gleich wie jene der Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in der Gasphase“.

Es ist offensichtlich, dass es bei der Entwicklung „trockene Grube“ länger dauert, bis sich ein ausreichender Druck für das Auspressen von Gas aus der Restgrube in das Hutgestein aufgebaut hat, als im vergleichbaren Szenario mit Volllaufen der Restgrube, in dem das Gas durch zutretende Lösung aus dem Hutgestein zusätzlich komprimiert wird.

## 4.5.4 Menschliches Eindringen

Entsprechend dem in Kapitel 3.4.3 dargelegten Vorgehen sind in Bezug auf die potenziellen Auswirkungen eines menschlichen Eindringens ausgewählte plausible, d. h. begründbare Szenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager oder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu betrachten.

Es darf davon ausgegangen werden, dass die Kenntnis über die Existenz des Endlagers über einen langen Zeitraum erhalten bleibt. Während dieser Zeit ist ein unbeabsichtigtes Eindringen ausgeschlossen. In Übereinstimmung mit dem Vorgehen in anderen Ländern wird angenommen, dass ein unbeabsichtigtes Eindringen frühestens 500 Jahre nach Verschluss des Endlagers erfolgt und dass das Vorgehen dabei den heutigen Verhältnissen, insbesondere dem heutigen Stand der Technik entspricht.

Ausgehend von den geografischen und geologischen Verhältnissen am Standort des ERAM sind zunächst drei Arten von menschlichen Einwirkungen auf ihre Plausibilität zu bewerten:

- Abteufen einer Explorationsbohrung
- Solung einer Kaverne zur Gewinnung von Salz oder zur Speicherung
- Errichtung eines Bergwerks zur Gewinnung von Salz

Die Solung einer Kaverne kann aufgrund des inhomogenen Aufbaus der Salzstruktur ausgeschlossen werden. Auch die Errichtung eines Bergwerks in unmittelbarer Nähe zur Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie ist äußerst unwahrscheinlich und braucht deshalb nicht weiter betrachtet zu werden. Vor der Errichtung eines Bergwerks würde die Existenz der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie in Explorationsbohrungen erkannt und entweder auf die Ausbeutung der Salzstruktur verzichtet oder ein ausreichender Sicherheitsabstand eingehalten werden, auch wenn die Funktion der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie als Endlager nicht festgestellt würde.

Beim Abteufen einer Explorationsbohrung hat das Anbohren des Einlagerungsbereichs WSF aufgrund des eingelagerten Radionuklidinventars potenziell die größten Auswirkungen. Als Auslöser plausibler Szenarien für die Bewertung der Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens wird folgendes Vorkommnis betrachtet: Die Bohrung wird nach 500 Jahren abgeteuft und trifft einen kleineren, hydraulisch relativ schlecht mit anderen Grubenbauen verbundenen Grubenbau des ELB WSF. Zu diesem Zeitpunkt sind die Abdichtungen zwischen dem Einlagerungsbereich und der übrigen Grube noch intakt und die Resthohlräume im Einlagerungsbereich mit Gas gefüllt (mit Ausnahme von eventuell lösungsgesättigten Bereichen in den untersten Grubenbauen), wobei der Druck der Gasphase deutlich unter dem hydrostatischen Druck liegt. Beim Anbohren des Grubenbaus tritt deshalb ein Verlust von Bohrspülung ein, der wegen der angenommenen Verhältnisse und der hydraulischen Bedingungen am Ort des Anbohrens mehr oder weniger ausgeprägt sein kann und deshalb nicht in jedem Fall besondere Maßnahmen auslöst. Unter der Annahme, dass der Verlust an Bohrspülung unbemerkt bleibt, wird die Bohrung nach Ende der Exploration rückgebaut und sachgemäß verfüllt. Durch Gasbildung und Konvergenz steigt der Gasdruck im Einlagerungsbereich weiter an.

Für diese Ausgangslage werden zwei Szenarien betrachtet, eines für die Systementwicklung „trockene Grube“, d. h. falls Lösung nur entlang der Bohrung in den Einlagerungsbereich zutritt, und eines für die Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“, wobei vereinfachend ein rasches Volllaufen der Restgrube unterstellt wird.

Im Szenario mit raschem Volllaufen der Restgrube tritt gleichzeitig mit dem Druckanstieg im ELB WSF durch Konvergenz und Gasbildung Lösung über die Abdichtungen aus der übrigen Grube und entlang der Bohrung aus dem Deckgebirge zu. Wie im Referenzszenario für den Lösungspfad korrodieren dabei langsam die Abdichtungen bis zum Zeitpunkt, zu dem die erste Abdichtung durchkorrodiert und der Einlagerungsbereich rasch mit Lösung aus der übrigen Grube voll läuft. Der Fluiddruck im Einlagerungsbereich steigt darauf hin weiter an und die Auspressphase setzt ein, wobei mindestens eine der Abdichtungen des Einlagerungsbereichs nur noch einen geringen hydraulischen Widerstand aufweist. Das Auspressen kann somit durch die

Abdichtungen in die übrige Grube oder entlang der verfüllten Bohrung direkt zum Salzspiegel, durch das Hutgestein und eventuell noch durch das Deckgebirge zur Geländeoberfläche erfolgen.

Unter diesen Bedingungen ist ein Auspressen von radionuklidhaltiger Lösung entlang der Bohrung bis in das oberflächennahe Grundwasser nur möglich, falls (1) der Fluiddruck im Einlagerungsbereich trotz des mittlerweile geringen hydraulischen Widerstands des Abdichtsystems deutlich über dem hydrostatischen Wert liegt und falls (2) der Eintrittsort der Bohrung in den Grubenbau im lösungsgesättigten Bereich liegt. Bei einem nur geringen Überdruck im Einlagerungsbereich gegenüber dem hydrostatischen Wert reicht dieser nicht aus, um die relativ schwere Lösung aus der Grube durch die gering salzhaltigen Bereiche des Deckgebirges oberhalb des Hutgesteins bis in Oberflächennähe zu pressen. Die quantitative Ermittlung der potenziellen Auswirkungen eines menschlichen Eindringens erfolgt für die genannten ungünstigen und wenig wahrscheinlichen Bedingungen.

Im Szenario für die Entwicklung „trockene Grube“ tritt dem ELB WSF Lösung lediglich über die Bohrung zu. Abschätzungen ergeben, dass die zutretende Lösungsmenge selbst bei einer Verfüllung der Bohrung mit niedriger, jedoch noch plausibler Qualität derart gering ist, dass eine Freisetzung von Radionukliden in Lösung ausgeschlossen werden kann (vgl. Kapitel 6.8).

Das Austreten von radionuklidhaltigem Gas aus dem ELB WSF entlang der verfüllten Bohrung kann vernachlässigt werden, da – wie für eine Radionuklidfreisetzung in Lösung – auch für diesen Freisetzungspfad ein Anstieg des Fluiddrucks im Einlagerungsbereich über den hydrostatischen Wert erforderlich ist. Im Vergleich mit der Halbwertszeit des einzigen potenziell sicherheitsrelevanten und volatilen Radionuklids,  $^{14}\text{C}$ , dauert dies jedoch lange.

Eine ausführlichere Darstellung der für die Bewertung der potenziellen Auswirkungen eines menschlichen Eindringens betrachteten Szenarien und deren Begründung enthalten [Colenco 2009] und [GRS 2009b].



## 5 VERFÜGBARE GRUNDLAGEN FÜR DEN NACHWEIS DER LANGZEITSICHERHEIT

Die für den Nachweis der Langzeitsicherheit erforderlichen Grundlagen lassen sich in die folgenden Kategorien unterteilen:

- Geologie der Salzstruktur (Lagerungsverhältnisse, Gesteinstypen, Gesteinseigenschaften)
- Bergbauliche und hydraulische Gegebenheiten im Bereich des Bergwerks (Sohlenrisse, Volumen, bestehende Verfüllungen, Bohrungen, Auflockerungszonen, sonstige hydraulische Wegsamkeiten, Lösungsvorkommen etc.)
- Geplantes Stilllegungskonzept (Auslegung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen, Materialien, Kenngrößen der Materialien, Langzeitverhalten der Materialien)
- Radionuklidinventare im Abfall und chemische Abfalleigenschaften (z. B. Gehalt an Komplexbildnern)
- Inventare an Gas bildenden Stoffen, Gasbildung
- Geologie, Hydrogeologie und Hydrochemie von Hutgestein und Deckgebirge
- Gebirgsmechanische Gegebenheiten
- Hydraulische und hydrochemische Verhältnisse sowie Transportverhalten von Radionukliden im verfüllten und verschlossenen Grubengebäude
- Transportverhalten von Radionukliden im Hutgestein und Deckgebirge
- Geowissenschaftliche Langzeitprognose für den Standort

Der Umfang der erforderlichen Grundlagen für den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit hängt von den Konzepten für diesen Nachweis (vgl. Kapitel 3.4) und von den Vereinfachungen und konservativen Annahmen ab, die bei der Umsetzung zur Anwendung gelangen. Die Bereitstellung von Grundlagen zu Sachverhalten und Prozessen, die zwar die Langzeitsicherheit fördern, in den Nachweisen aber nicht belastet werden, ist nicht erforderlich. Als Beispiele hierfür sind Untersuchungen zu den hydraulischen Eigenschaften von Auflockerungszonen innerhalb der Einlagerungsbereiche, zu den hydrochemischen Verhältnissen in den Einlagerungsgrubenbauen und zur Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen zu nennen. Ebenfalls nicht aufgeführt werden im Folgenden Untersuchungen, die im Rahmen der Erarbeitung des Stilllegungskonzeptes durchgeführt wurden und dazu beitrugen, das Konzept festzulegen, die aber keine Basis für den Nachweis darstellen.

### Geologie der Salzstruktur

Die geologischen Gegebenheiten der Salzstruktur wurden im Rahmen der Erstellung des Grubengebäudes, der Salzgewinnung, der Umnutzung zu einem Endlager für radioaktive Abfälle und zur Erarbeitung des Stilllegungskonzeptes über Jahre hinweg intensiv untersucht. Im Hinblick auf die Nutzung als Endlager erfolgte eine Neukartierung aller zugänglichen Grubenbaue, und es wurden zahlreiche Bohrungen zur Klärung der Lagerungsverhältnisse gestoßen. Mittels mineralogischer und geochemischer Untersuchungen erfolgte eine stoffliche Charakterisierung der relevanten Gesteine. Der erreichte Detaillierungsgrad geht deutlich über die für Gewinnungsbergwerke übliche Erfassung der geologischen Gegebenheiten hinaus und berücksichtigt den Informations- und Parameterbedarf des Langzeitsicherheitsnachweises. Besonderes Augenmerk wurde auf die Erfassung der Lagerungsverhältnisse der salinaren Gesteine und der hangenden Lagerstättengrenze (Salzspiegel) gelegt. Dabei wurden praktisch alle zugänglichen und sinnvollen Aufschlüsse geophysikalisch vermessen. Eine zusammenfassende Darstellung enthält [BGR 2000a].

## **Bergbauliche und hydraulische Gegebenheiten im Bereich des Bergwerks**

Die markscheiderische Erfassung des Grubengebäudes erfolgte laufend entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen. Zur Erfassung der aktuell bestehenden Volumen und Verfüllungen in den verschiedenen Grubenbereichen wurden zusätzlich systematische Begehungen und gezielte Messungen im gesamten Grubengebäude durchgeführt, die Ergebnisse sind in [DBE 2005c] berücksichtigt.

Im Bereich des Bergwerks wurden zahlreiche hydraulische Untersuchungen durchgeführt, die Ergebnisse sind in [BGR 1998a] zusammengestellt. Die geologischen Verhältnisse im Bereich des Bergwerks, die Ausdehnungen von Auflockerungszonen, deren hydraulische Eigenschaften und die hydraulische Bedeutung von nicht-chloridischen Einheiten im Salinar wurden intensiv untersucht, eine Synthese der Ergebnisse vermittelt [BGR 1998b]. Ergänzende Untersuchungsergebnisse zum Hauptanhydrit der Ostmulde, hauptsächlich die Ergebnisse von hydraulischen Tests in Bohrungen, enthält [BGR 2000b].

Für die Ausarbeitung des Stilllegungskonzeptes und die Erarbeitung des Langzeitsicherheitsnachweises wurden die Lösungsvorkommen in den Grubengebäuden Bartensleben und Marie systematisch erfasst und hinsichtlich ihrer Herkunft untersucht [BfS 2004b].

### **Geplantes Stilllegungskonzept**

Neben den oben aufgeführten Untersuchungen zum Zustand des Grubengebäudes und zu den hydraulischen Verhältnissen im Bereich des Bergwerks sowie zu den gebirgsmechanischen Verhältnissen (siehe unten) wurden im Rahmen der Ausarbeitung des Stilllegungskonzeptes Untersuchungen zu den Eigenschaften und Materialkennwerten des für die Erstellung der Abdichtungen vorgesehenen Salzbetons M2, des für den Massenversatz vorgesehenen Salzbetons M3 [DBE 2004b], [DBE 2006b] und des für die Abdichtung im Hauptanhydrit vorgesehenen Magnesiabetons [K-UTEC 2008] durchgeführt.

Das Stilllegungskonzept beruht auf einer Zuweisung eines jeden Grubenbaus des Grubengebäudes der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie zu einer von vier Verfüllkategorien (vgl. Kapitel 3.3.2). Diese Zuweisung erfolgte aufgrund des grubenbauspezifischen Zwecks, der mit der Verfüllmaßnahme verfolgt wird; sie ist in [DBE 2005b], [DBE 2005c] beschrieben. Die Bohrungen, die sich im Bereich von Abdichtungen (Grubenbaue der Kategorie I) befinden und abgedichtet werden müssen, wurden in [BfS 2002] identifiziert.

Das Vorgehen bei der Verfüllung und insbesondere die Reihenfolge, in der die einzelnen Grubenbaue verfüllt werden, sind unter Berücksichtigung sämtlicher erforderlicher infrastruktureller Maßnahmen und der dabei zu betrachtenden Arbeitsschutzbedingungen im Verfüllplan festgelegt [DBE 2005c]. Grundsätzlich wird dabei das Schema verfolgt, von unten nach oben und von außen in Richtung auf die Schächte zu verfüllen.

In [DBE 2004a], [BfS 2007c] und [K-UTEC 2008] sind die Herstellung der Streckenabdichtungen beschrieben und deren Funktionstüchtigkeit nachgewiesen. Der Bau der Abdichtungen ist im Verfüllablauf berücksichtigt.

Die Stilllegungsmaßnahmen im Grubengebäude werden mit dem Bau der Schachtabdichtungen abgeschlossen. Das Konzept für die Verschlussysteme der Schächte ist in [BfS 2004a] und [ERCOSPLAN 2004] beschrieben. Den Nachweis für deren langzeitige Wirksamkeit enthält [ERCOSPLAN 2003].

### **Radionuklidinventare im Abfall und chemische Abfalleigenschaften**

Die Radionuklidinventare der Abfälle ergeben sich zum einen aus den Datenblättern der Abfallverursacher. Ergänzend wurden im Hinblick auf den Langzeitsicherheitsnachweis Recherchen bei den Abfallverursachern durchgeführt und daraus das radionuklidspezifische Aktivitätsinventar in den Abfällen der verschiedenen Einlagerungsgrubenbaue abdeckend abgeschätzt ([BfS 2007d] und dort zitierte Unterlagen).

Die stoffliche Zusammensetzung der Abfälle und damit die chemischen Abfalleigenschaften sind heterogen, der Gehalt an Komplexbildnern in den Abfällen ist teilweise erheblich [BfS 2000]. Da beim Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit weder eine verzögerte Mobilisierung der Radionuklide aus dem Abfall (durch die Barrierenwirkung von Abfallbehältern, durch eine langsame Auflösung der verfestigten Abfälle sowie durch Löslichkeitsgrenzen<sup>35</sup>) noch eine Begrenzung des Radionuklidtransports durch Sorption an Festphasen im Grubengebäude<sup>36</sup> belastet werden, sind nur wenige Grundlagen erforderlich: Sie betreffen die mikrobielle und die anorganische Gasbildung, die Verhältnisse der <sup>14</sup>C-Inventare in organischen Verbindungen, als Carbid und in sonstigen anorganischen Verbindungen (Carbonate und Hydrogencarbonate) im Abfall (vgl. Kapitel 3.4.1 und 3.4.2) sowie die Inventare an Komplexbildnern im Hinblick auf eine eventuelle Beeinflussung der Radionuklidrückhaltung durch Sorption in Hutgestein (Schichtenfolge DGL) und Deckgebirge sowie der Rückhaltung von <sup>226</sup>Ra aus der Radium-VBA durch Sorption am Salzbetonversatz im Streckenstummel am Ende des Ostquerschlags auf der 4. Sohle im ELB OF. Die Grundlagen der Gasbildung sind Gegenstand des folgenden Unterkapitels; die Anteile der <sup>14</sup>C-Inventare und die Inventare an Komplexbildnern wurden aus den Datenblättern der Abfallverursacher abgeleitet ([BfS 2007d] und dort zitierte Unterlagen).

### **Inventare an Gas bildenden Stoffen, Gasbildung**

Die Inventare an Gas bildenden Stoffen in den Abfällen wurden aus den Datenblättern der Abfallverursacher und durch ergänzende Recherchen beim ERAM ermittelt [BfS 2000]. Die Inventare außerhalb der Einlagerungsgrubenbaue wurden zunächst mit Begehungen im Grubengebäude erfasst [DBE 2005c] und anschließend – zur Berücksichtigung von nicht begehbaren Grubenbereichen – hochgerechnet [Colenco 2002c].

Die spezifischen Korrosionsraten der verschiedenen Metalle wurden als empirische Größen und für verschiedene Bereiche des pH-Werts der Literatur entnommen [BfS 2003]. Die Aufteilung des Metallinventars in Klassen mit unterschiedlichen Oberflächen/Volumen-Verhältnissen erfolgte aufgrund von qualitativen Inventarbeschreibungen [BfS 2003]. Die Raten der einzelnen mikrobiellen Abbaureaktionen wurden aus experimentellen Untersuchungen Dritter abgeleitet und mit großen Bandbreiten bei der Berechnung der mikrobiellen Gasbildung verwendet [Colenco 2002c].

### **Geologie, Hydrogeologie und Hydrochemie von Hutgestein und Deckgebirge**

Zur Bestimmung der geologischen, hydrogeologischen und hydrochemischen Verhältnisse im Hutgestein und im Deckgebirge wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Zur Klärung der Lagerungsverhältnisse des Deckgebirges wurden neben Tiefbohrungen und Rammkernsondierungen seismische Messungen durchgeführt. In den Tiefbohrungen erfolgten hydraulische und geophysikalische Messungen. Durch ein entsprechendes Messprogramm wurden die hydrologischen Daten des Gebietes erfasst und dokumentiert. Es wurden zahlreiche Gesteins- und Grundwasserproben mit dem Ziel der Erfassung der physikalischen und hydrochemischen Parameter des Deckgebirges und Grundwassers untersucht.

Die Synthese der umfangreichen Untersuchungen zur Geologie von Hutgestein und Deckgebirge ist in [BGR 1998b], jene zur Hydrogeologie in [BGR 1998c] dargelegt. Eine zusätzliche Interpretation der Ergebnisse von Isotopen-, Edelgas- und Salinitätsuntersuchungen enthält [Sonntag 1999].

### **Gebirgsmechanische Gegebenheiten**

Die Bewertung des Salzgebirges hinsichtlich der Standsicherheit des Grubengebäudes und der Barrierenwirkung der Salzgesteine basiert auf mehreren Aspekten. Beobachtungen und Messungen in situ [BGR 2000d], [BGR2001a], [BGR 2001c] charakterisieren den Primärspannungszustand, helfen die anstehenden

---

<sup>35</sup> außer für <sup>14</sup>C, vgl. Kapitel 3.4.1

<sup>36</sup> außer für <sup>226</sup>Ra aus der Radium-VBA am Salzbeton im Streckenstummel (s. u.)

Gesteine in Homogenbereiche mit vergleichbaren mechanischen Eigenschaften einzuordnen und liefern Verformungsmessungen zur Eichung gebirgsmechanischer Modelle. Laboruntersuchungen [BGR 1998e], [BGR 1998f] dienen der Ermittlung gesteinspezifischer Daten wie Festigkeit, Steifigkeit oder Kriechfreudigkeit. Schließlich werden Berechnungen durchgeführt, um den derzeitigen Zustand der Salzbarriere und des Grubengebäudes beurteilen zu können [BGR 2000c], [BGR 2001b]. Dabei erfolgt ein Abgleich von Berechnungen und untertägigen Befunden wie Verformungsraten. Letztere werden im Rahmen der geomechanischen Betriebsüberwachung periodisch erhoben und jährlich (zuletzt in [DBE 2008b]) fortgeschrieben.

## **Hydraulische und hydrochemische Verhältnisse sowie Transportverhalten von Radionukliden im verfüllten und verschlossenen Grubengebäude**

Die durchgeführten Untersuchungen zu den hydraulischen Verhältnissen im Bereich des Grubengebäudes zu Beginn der Phase nach Verschluss des Endlagers sind oben erwähnt. Für die zeitliche Entwicklung ist im Zusammenhang mit dem Langzeitsicherheitsnachweis die Änderung der Permeabilität von Abdichtungen von Bedeutung. Für eine Erhöhung der Permeabilität der Abdichtungen aus Salzbeton kommt nur ihre Korrosion durch Mg-haltige Lösung in Frage. Die Mengenverhältnisse bei der Korrosion von Salzbeton durch Mg-haltige Lösung wurden im Labor mit Kaskadenversuchen ermittelt und mit Hilfe geochemischer Modellrechnungen nachgebildet [GRS 2003], [GRS 2009a]. Dies erlaubt Prognosen für die Korrosion von Salzbeton mit unterschiedlicher Zusammensetzung. Die Korrosion von Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung kann aus Stoffbilanzen und geochemischen Modellrechnungen abgeleitet werden; letztere wurden unter Verwendung eines allgemein akzeptierten Datensatzes durchgeführt [K-UTEC 2008], [Colenco 2009].

Die hydrochemischen Verhältnisse in den Einlagerungsgrubenbauen und das Transportverhalten von Radionukliden in den Einlagerungsgrubenbauen sind mit den nachfolgend angeführten Ausnahmen ohne Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis. Eine Ausnahme bilden die Einflüsse der herrschenden chemischen Bedingungen auf die Rückhaltung von  $^{14}\text{CO}_2$  durch Carbonatisierung und auf die Gasbildung. Für die Berücksichtigung dieser Einflüsse wurde auf Literaturangaben zurückgegriffen. Eine weitere Ausnahme bildet die Sorption von  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA im Salzbetonversatz des Streckenstummels am Ende des Ostquerschlags auf der 4. Sohle im ELB OF (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.4). Die Quantifizierung dieses Prozesses erfolgte auf der Grundlage der Ergebnisse von Sorptionsuntersuchungen an Salzbeton, welche in [FZK INE 2000] dargelegt sind.

## **Transportverhalten von Radionukliden im Hutgestein und Deckgebirge**

Für die Charakterisierung der Schichtenfolge DGL, welche zur Definition der Eigenschaften des Transportpfads durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) herangezogen wird, wurden In-situ-Messungen in Bohrungen durchgeführt und die Bohrkernproben petrophysikalisch untersucht [BfS 2001].

Die Sorptionseigenschaften der Schichtenfolge DGL wurden zunächst aus den Sorptionsdaten abgeleitet, die im Sicherheitsnachweis für das Endlager Konrad für die dort wirksame geologische Barriere der Unterkreideschichten angesetzt wurden. Zur Überprüfung des Vorgehens und zur Verbesserung der Datenlage wurden für die potenziell sicherheitsrelevanten Radionuklide Sorptionsexperimente am Grauen Salton der Schichtenfolge DGL durchgeführt [INE&IRC 2004]. Die gemessenen und die aus den Daten für die Unterkreide des Endlagers Konrad abgeleiteten  $K_d$ -Werte stimmen etwa innerhalb einer Größenordnung überein.

Die Sorptionsdaten der Oberen Alleringerslebener Schichten wurden in Anlehnung an Daten vergleichbarer Sedimente der Oberkreide des Standortes Gorleben angesetzt. Sorptionsexperimente für einige Elemente an Sedimentproben aus der Oberkreide am Standort des ERAM ergänzen die Datenbasis [INE 1999]. Die Bedeutung der Sorption in den Oberen Alleringerslebener Schichten für den Langzeitsicherheitsnachweis ist beschränkt (vgl. Kapitel 7).



Die Synthese der standortspezifischen experimentellen Daten zur Sorption und der Daten für den Standort Endlager Konrad (Unterkreide) und Gorleben (Oberkreide) zum Datensatz für den Langzeitsicherheitsnachweis ERAM enthalten [Colenco 2009] und [GRS 2009b].

### **Geowissenschaftliche Langzeitprognose für den Standort**

Die geowissenschaftliche Langzeitprognose beruht einerseits auf den geologischen Gegebenheiten am Standort und – großräumiger – in Norddeutschland sowie deren Interpretation hinsichtlich der geologischen Entwicklungsgeschichte. Von Bedeutung sind dabei die neotektonischen Entwicklungen. Eine weitere wichtige Grundlage bilden andererseits konzeptuelle Modellvorstellungen zur Beschreibung wichtiger standortbezogener Prozessabläufe und zur geowissenschaftlichen Analyse des Gesamtsystems Endlager-Geosphäre. Speziell zu nennen sind die Theorie zur Abhängigkeit der langfristigen Klimaentwicklung von der Variation der Sonneneinstrahlung als Folge von periodischen Änderungen der Erdbewegung um die Sonne (Milanković-Theorie) und deren Umsetzung in quantitativen Modellen. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose wurde von der BGR erarbeitet. Für ihre Überprüfung hinsichtlich Vollständigkeit wurde die internationale FEP-Liste der OECD/NEA beigezogen. Eine ausführlichere Beschreibung der Grundlagen enthält [BGR 2002].

ERA  
Morsleben

## 6 QUANTIFIZIERUNG DER MÖGLICHEN AUSWIRKUNGEN

Die rechnerische Ermittlung der möglichen quantitativen Auswirkungen erfordert die Betrachtung des Gesamtsystems „Endlager Morsleben“. Dies bedeutet, dass das verwendete Modell und das zugehörige Rechenprogramm<sup>37</sup> die möglichen Entwicklungen des Gesamtsystems simulieren und alle möglicherweise wichtigen Prozesse einbeziehen muss.

Die Modellrechnungen für den vorliegenden Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit wurden parallel mit zwei verschiedenen Programmen ausgeführt, dem Programmpaket EMOS und dem Programm PROSA. Auf der Basis von abstrahierenden und vereinfachenden Modellen für das Gesamtsystem „Endlager Morsleben“ simulieren beide Programme dessen mögliche künftige Entwicklungen und insbesondere die mögliche Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre. Bis auf programmbedingte Unterschiede wurde den Modellrechnungen mit EMOS und mit PROSA das gleiche Modell des Gesamtsystems „Endlager Morsleben“ zugrunde gelegt. Die programmspezifischen Modellierungskonzepte und Angaben zu den Programmen enthält Kapitel 6.6.1, da diese Ausführungen besonders für das Verständnis der in Kapitel 6.6 diskutierten Modellrechnungen von Bedeutung sind.

Das Programmpaket EMOS setzt sich aus mehreren Modulen zusammen und wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH speziell für Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern entwickelt [GRS 1996a]. Für die Modellrechnungen zum ERAM kamen neben einer speziell erweiterten Version des Moduls LOPOS die Module CHETLIN und EXCON zum Einsatz [GRS 1996b], [GRS 1999]. Das Programmpaket wurde in mehreren nationalen und internationalen Projekten eingesetzt und mit anderen Rechencodes verglichen. Die verwendeten Modelle und Rechenverfahren sind damit qualifiziert.

Das Programm PROSA ist ein semi-analytisches Kompartiment-Programm, das von der Firma AF-Colenco AG speziell für die Konsequenzenanalyse ERAM entwickelt wurde<sup>38</sup> und in [Colenco 2009] (Anhänge A und B) beschrieben ist. Das Programm wurde durch Vergleich mit Ergebnissen, die auf unabhängigen Wegen ermittelt wurden, mit Erfolg überprüft [Colenco 2006].

Gewisse Einzelprozesse und Teilsysteme erfordern gesonderte Modellrechnungen mit speziellen Programmen. Die Ergebnisse dieser Modellrechnungen werden in geeigneter Form in die Modellrechnungen mit dem Programmpaket EMOS bzw. dem Programm PROSA übertragen, um den Einfluss des gesondert simulierten Prozesses und das Verhalten des gesondert simulierten Teilsystems einzubeziehen. Diese gesonderten Modellrechnungen und der Übertrag der Modellergebnisse in die Modellrechnungen mit EMOS und PROSA sind in den nachfolgenden Kapiteln 6.1 bis 6.4 erläutert. Dies betrifft

- die gebirgsmechanische Entwicklung des Gesamtsystems und die Konvergenz der Grubenbaue in der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie (Kapitel 6.1 und 6.4.1),
- die Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge (Kapitel 6.2),
- die Gasbildung (Kapitel 6.3) und
- die Korrosion der Abdichtungen aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösung sowie der Abdichtung aus Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung (Kapitel 6.4.2).

Die Modellrechnungen für das Gesamtsystem „Endlager Morsleben“ und deren Ergebnisse für die verschiedenen Szenarien und Varianten sind dann Gegenstand der Kapitel 6.5 bis 6.8. Kapitel 6.9 enthält die quantitativen Ausführungen zur Beurteilung der Gewährleistung der Unterkritikalität im Endlager.

<sup>37</sup> oder das verwendete System von gekoppelten Modellen und zugehörigen Rechenprogrammen

<sup>38</sup> Semi-analytisch bedeutet hier, dass die gesuchte Größe, hier die effektive Individualdosis als Funktion der Zeit, durch einen Satz von analytischen Gleichungen und einfachen Differentialgleichungen ermittelt wird, welche sequenziell direkt oder mit Hilfe von einfachen numerischen Algorithmen gelöst werden. Parziale Differentialgleichungen treten nicht auf.

## 6.1 GEBIRGSMECHANISCHE MODELLRECHNUNGEN

Die gebirgsmechanischen Modellrechnungen, die im Zusammenhang mit dem Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit durchgeführt wurden, dienen

- dem Nachweis der langzeitigen globalen und lokalen Standsicherheit des gebirgsmechanischen Systems,
- dem Nachweis der anhaltenden Integrität der in Kapitel 2.4 genannten, heute bestehenden und für die Langzeitsicherheit des ERAM wichtigen Steinsalz-Barrieren und
- der Ermittlung der langfristig zu erwartenden bzw. möglichen Konvergenzraten von Grubenbauen nach Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie als Eingangsgrößen für die in den Kapiteln 6.5 bis 6.8 beschriebenen Modellrechnungen.

Modellrechnungen wurden mit zwei- und mit dreidimensionalen Modellen überwiegend für die Systementwicklung „trockene Grube“ durchgeführt (z. B. [DBE 2005a], [DBE 2006a] und [BGR 2001a]). Der Nachweis der Standsicherheit und Integrität des Grubengebäudes für die Entwicklung „trockene Grube“ deckt die Verhältnisse bei Systementwicklungen „mit relevantem Lösungszutritt“ insofern ab, als das Tragsystem bei der erstgenannten Systementwicklung in geringerem Maße durch den sich im Grubengebäude einstellenden Fluiddruck gestützt wird. Zudem benötigen die in den Kapiteln 6.5 bis 6.8 dargestellten Modellrechnungen als Eingangsdaten die Konvergenzraten der Feldesteile ohne Stützwirkung des Fluiddrucks.

Bei der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ können Auf- und Umlöseprozesse in der Grube neue Hohlräume schaffen, insbesondere am Salzspiegel und im Bereich der Kalilager. Spezielle gebirgsmechanische Berechnungen zeigten, dass alleine die oben erwähnte Stützwirkung des Fluiddrucks eine Gefährdung der Standsicherheit des Grubengebäudes oder der Integrität der Salzbarriere der Einlagerungsbereiche ausschließt [DBE 2008a]. Die Untersuchungen wurden unter Vernachlässigung der stabilisierenden Verfüllung des eingebrachten Salzbetons durchgeführt.

Alle gebirgsmechanischen Berechnungen wurden mit anerkannten kommerziellen Programmen wie zum Beispiel FLAC<sup>3D</sup> [Itasca 1998] durchgeführt, unter Verwendung von anerkannten Konstitutivgesetzen für das Stoffverhalten (z. B. „BGRa“ für Steinsalz, „CWIPP“ für trockenen und feuchten Salzversatz sowie das Hooke'sche Gesetz für unkorrodierten und korrodierten Salzbeton). Die Materialparameter wurden aus Laboruntersuchungen an standortspezifischen Materialproben abgeleitet [BGR 1998e], [BGR 1998f] und [BGR 2000d]. Der Vergleich der Modellergebnisse für die heutigen Verhältnisse mit in-situ-Messungen von Konvergenzraten erlaubte die Überprüfung der Modellrechnungen. Er ergab eine befriedigende Übereinstimmung, so dass die Ergebnisse der geomechanischen Modellrechnungen in Bezug auf die Langzeitentwicklung als belastbar eingestuft werden [BGR 2001a], [DBE 2006a].

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Das gebirgsmechanische System entwickelt sich langfristig in prognostizierbarer Weise; disruptive Entwicklungen als Folge von Verformungen durch Hohlraumkonvergenz in den Grubengebäuden sind auszuschließen. Die heute bestehende Integrität der Steinsalz-Barrieren zwischen den verschiedenen Feldesteilen einerseits und dem Hutgestein und Deckgebirge andererseits sowie jene zwischen den abgedichteten Einlagerungsbereichen und der Restgrube wird durch gebirgsmechanische Verformungen auch langfristig nicht beeinträchtigt. Diese Aussagen schließen auch die gebirgsmechanischen Auswirkungen von Hohlräumen ein, die durch Lösungs- und Umlösungsprozesse als Folge eines Zutritts von ungesättigten Wässern in die Grube entstehen können.

Mit den gebirgsmechanischen Modellrechnungen wurden auch die künftigen Konvergenzraten, d. h. die künftige zeitliche Veränderung der aufgefahrenen Volumen von Grubenbauen (Konturvolumen) im Verhältnis zum aktuellen Wert, für verschiedene Kategorien von Grubenbauen ermittelt. Die Kategorien differenzieren einerseits nach der Lage der Grubenbaue in der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie (z. B. Südfeld – 2. Sohle) und andererseits nach dem umgebenden Gestein (z. B. Steinsalz oder Kalisalz). Die Konvergenzraten ändern sich mit fortschreitender Konvergenz und damit mit der Zeit, weisen jedoch zum Teil ausge-

dehnte Phasen mit geringen Änderungen auf (stationäre Phase). Für die einzelnen Kategorien von Grubenbauen wurden aus den Ergebnissen der numerischen Modellrechnungen die so genannte „stationäre Konvergenzrate“ sowie der zeitliche Mittelwert der Konvergenzrate als charakteristische Werte für die Rate der Volumenänderung ermittelt. Für die Verwendung in den Modellrechnungen, die Gegenstand der Kapitel 6.5 bis 6.8 sind, wurden in einem weiteren Schritt die charakteristischen Konvergenzraten der dort verwendeten Grubenbereiche ELB WSF, ELB OF, ELB ZT, ELB NF und „übrige Grube“ unter Berücksichtigung der relativen Anteile der verschiedenen Kategorien von Grubenbauen am gesamten Hohlraumvolumen abgeleitet. Die geomechanischen Modellrechnungen zur Ermittlung der Konvergenzraten und die Ableitung der charakteristischen Werte für die Grubenbereiche, die in den Modellrechnungen mit EMOS und PROSA verwendet werden, sind in [DBE 2006a] beschrieben. Die Modellierung der Konvergenz in den Modellrechnungen mit den Programmen EMOS und PROSA ist in Kapitel 6.4.1 dargestellt.

## **6.2 MODELLIERUNG DER GRUNDWASSERBEWEGUNG IM HUTGESTEIN UND DECKGEBIRGE**

### **Generelles Vorgehen und Zielsetzungen**

Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge wurden einerseits in drei Dimensionen (3D) für Süßwasserverhältnisse, d. h. unter Vernachlässigung der Dichteeffekte aufgrund örtlich unterschiedlicher Salzgehalte im Grundwasser, und andererseits in zwei Dimensionen (2D) für Salzwasserverhältnisse, d. h. unter Berücksichtigung der genannten Dichteeffekte, durchgeführt. Die Zielsetzungen der Modellrechnungen für Süßwasserverhältnisse umfassen im Hinblick auf den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit:

- Stärkung des allgemeinen Verständnisses in Bezug auf die Grundwasserbewegung im Hutgestein und im Deckgebirge unter heutigen und zu erwartenden künftigen Bedingungen [Colenco 2001a],
- Abschätzung der möglichen Zutrittsrate von Lösung aus dem Hutgestein in die Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie [Colenco 2001b],
- Ermittlung des Verdünnungspotentials im oberflächennahen Grundwasser für Radionuklide, die mit der Grundwasserbewegung aus größerer Tiefe in Oberflächennähe gelangen [Colenco 2002a],
- Aufzeigen der Berechtigung von Modellrechnungen in 2D für Salzwasserverhältnisse zur Analyse des Einflusses von Dichteeffekten in der Phase nach Verschluss des Endlagers [Colenco 2002a].

Die Ziele der anschließenden Modellrechnungen in 2D für Salzwasserverhältnisse [Colenco 2002b] lauten:

- Ermittlung des Einflusses der Dichteeffekte auf die Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge unter heutigen Bedingungen (d. h. ohne Auspressen von Lösung aus der Grube in das Hutgestein),
- Simulation der Ausbreitung von aus der Grube ausgepresster, an NaCl gesättigter Lösung im Hutgestein und Deckgebirge unter Berücksichtigung der Dichteeffekte und insbesondere
- Ermittlung der Aufteilung der aus der Grube ausgepressten Lösung auf die verschiedenen möglichen Ausbreitungswege im Hutgestein und Deckgebirge sowie der charakteristischen Größen dieser Transportwege (Transportdistanz, Transportzeit für nichtsorbierende Radionuklide).

### **Modellgebiete, Modellaufbau und Modellparameter**

Das Modellgebiet des 3D-Modells erstreckt sich über rund 8 km entlang des Allertals, ungefähr von Alleringersleben nach Walbeck. Die Ausdehnung quer zum Allertal beträgt ebenfalls etwa 8 km; die Modellgrenze



im SW bildet die oberflächliche Wasserscheide auf dem Höhenzug des Lappwalds, jene im NE die Wasserscheide im Erlebener Forst (Weferlinger Triasplatte). Das Modell deckt eine Fläche von gut 58 km<sup>2</sup> ab. Als Modellbasis wurde in der Allertalzone die Obergrenze der Salzstruktur, in der Lappwaldscholle die Obergrenze des mächtigen und gering durchlässigen Unteren Gipskeuper und in der Weferlinger Triasplatte die Obergrenze der Bernburg-Folge des Unteren Buntsandstein gewählt. Abbildung 6-1 zeigt eine perspektivische Ansicht des 3D-Modells aus Südosten.

Das 2D-Modell bildet einen repräsentativen vertikalen Schnitt zwischen den beiden o. g. oberflächlichen Wasserscheiden quer zum Allertal durch den Schacht Bartensleben ab. Die Modellbasis wurde gegenüber jener im 3D-Modell tiefer angesetzt, sie verläuft in der Lappwaldscholle entlang des Salzlagers im Mittleren Muschelkalk und in der Weferlinger Triasplatte entlang der Obergrenze des Zechstein. Modellrechnungen mit dem tiefer reichenden 2D-Modell für Süßwasserverhältnisse, d. h. ohne Berücksichtigung von Dichteeffekten, zeigen – soweit vergleichbar – ähnliche Ergebnisse wie das 3D-Modell. Die Tiefererstreckung des 3D-Modells ist somit für dessen Zielsetzungen ausreichend.

Für die hydrogeologischen Modellrechnungen wurden aufeinander folgende geologische Schichten mit ähnlichen hydrogeologischen Eigenschaften und hydrogeologisch wirksame Strukturen zu hydrogeologischen Homogenbereichen (hydrostratigraphischen Einheiten) zusammengefasst. Dies erfolgte in einer Weise, welche die vertikale Abfolge von gering leitenden und relativ höher durchlässigen Schichten angemessen berücksichtigt und relativ gut durchlässige Schichten mit potenziell erheblicher Ausdehnung als gesonderte Einheiten beibehält. In der Lappwaldscholle und in der Allertalzone wurden je 15 hydrostratigraphische Einheiten, in der Weferlinger Triasplatte 8 solche Einheiten (einschließlich der nordöstlichen Randstörung der Allertalzone) definiert. Das 2D-Modell mit den im abgebildeten Schnitt auftretenden hydrostratigraphischen Einheiten ist in Abbildung 6-2 dargestellt.

Die Definition der hydrostratigraphischen Einheiten, deren räumliche Verbreitung und die in den Modellrechnungen verwendeten geologischen und hydrogeologischen Daten sind ausführlich in [Colenco 2001a] beschrieben. Sie wurden vorwiegend [BGR 1998c] entnommen. Damit beruhen die Modellrechnungen auf einer breiten und gut abgestützten geologischen und hydrogeologischen Datenbasis.

Als Randbedingung an der Modelloberfläche wurde im 3D-Modell flächendifferenziert die in [BGR 1998c] ermittelte Grundwasserneubildungsrate vorgegeben. Unter Berücksichtigung der Wasserentnahme durch die im Modellgebiet betriebenen Brunnen erfolgte in einem ersten Schritt eine Kalibrierung von gut 40 Parametern des Modells anhand von gemessenen Grundwasserdrücken (genauer: daraus abgeleiteten Süßwasserdruckspiegelhöhen) an 180 Messstellen. Die Kalibrierung ergab eine mittlere Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Süßwasserdruckspiegelhöhen von 1,77 m, Abweichungen von weniger als 2 m in 114 der 180 Messstellen, keine erkennbare Systematik der größeren Abweichungen und fast immer kalibrierte  $k_f$ -Werte innerhalb der in [BGR 1998c] angeführten Bandbreite [Colenco 2001a]. In Anbetracht des komplexen Aufbaus des Modellgebiets und der in einzelnen Bereichen heterogenen Datenbasis wird das Ergebnis der Kalibrierung als befriedigend bewertet. Durch diese Kalibrierung sind die verfügbaren Felddaten in einer strukturierten und ihrer Belastbarkeit und Aussagekraft entsprechenden Weise in den Aufbau der Grundwassermodelle eingeflossen.

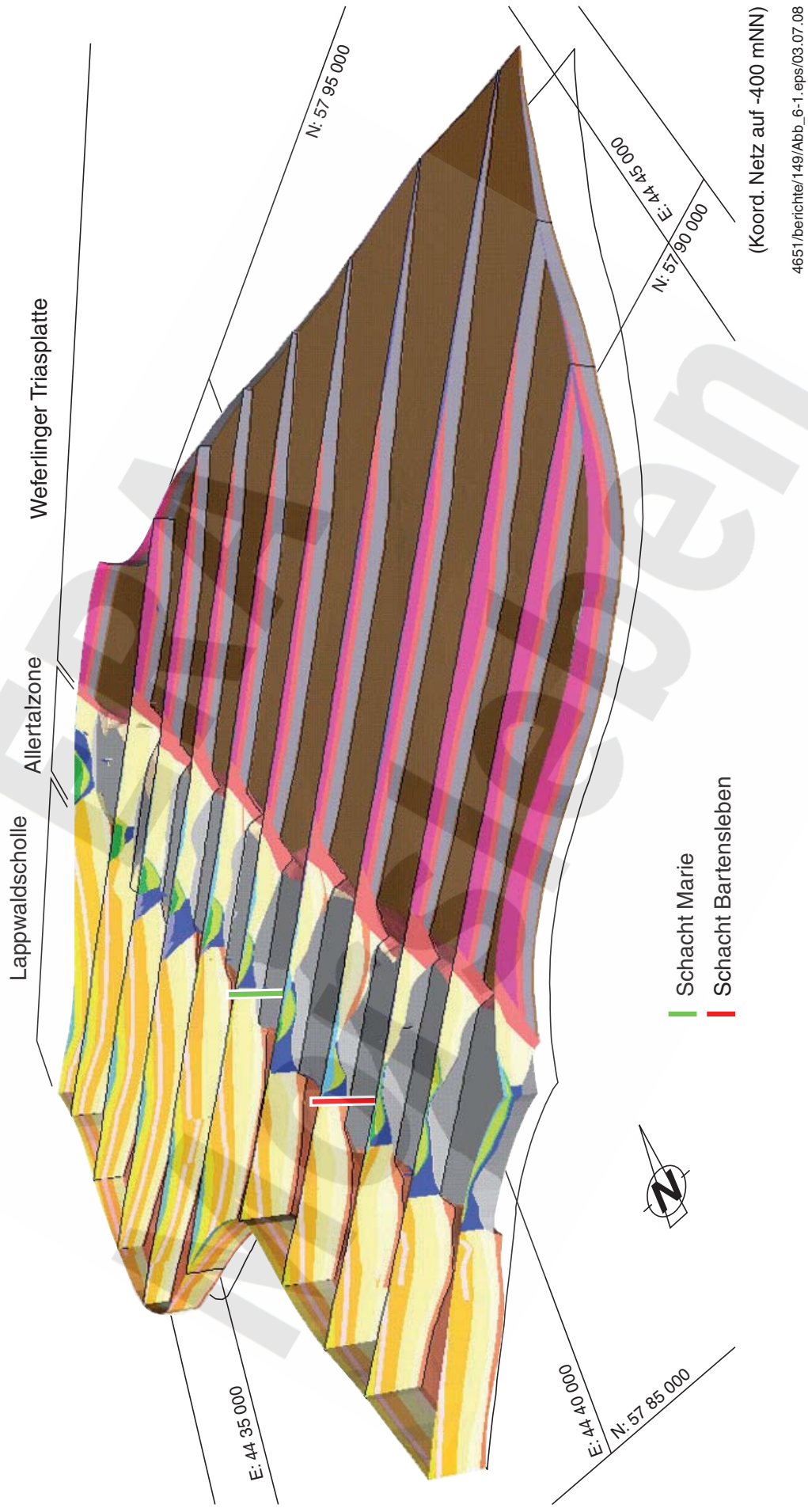
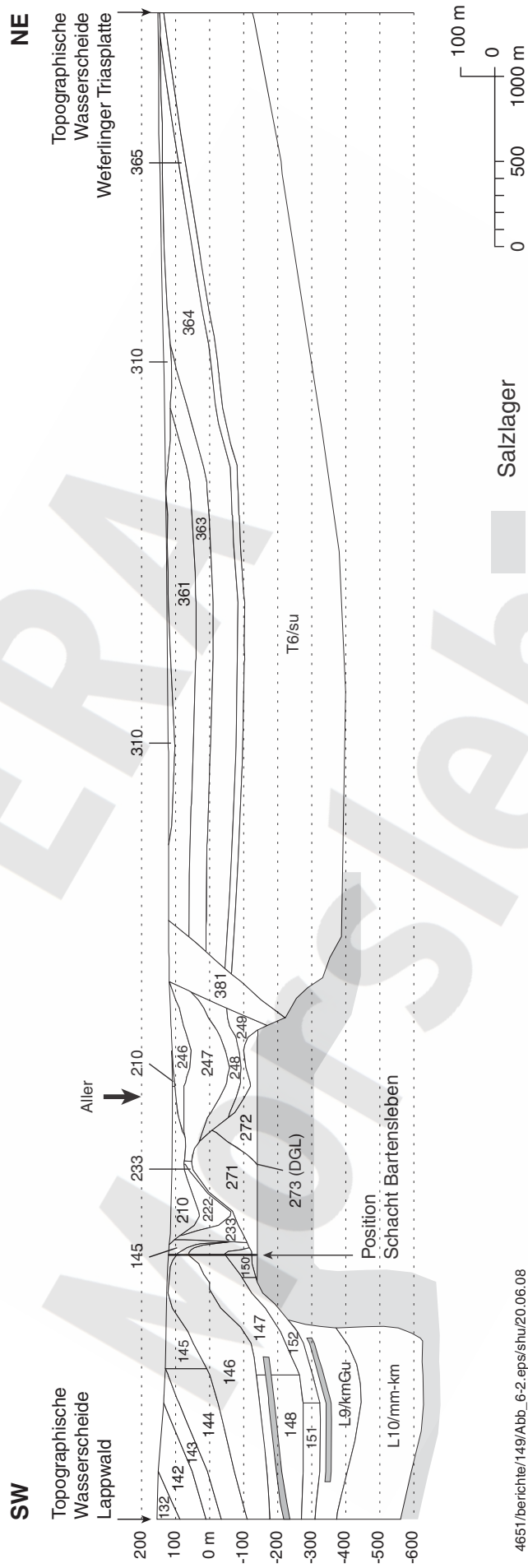


Abbildung 6-1: 3D-Modell: Perspektivische Ansicht aus SE auf 9 Seriensenitte in SW-NE-Richtung, Abstand der Seriensenitte 1 km. Die Farben bezeichnen die hydrostratigraphischen Einheiten, diese können anhand von Abbildung 6-2 und der zugehörigen Legende identifiziert werden.



4651/berichte/149/Abb\_6-2.eps/shu/20.06.08

Abbildung 6-2: 2D-Modell mit den hydrostratigraphischen Einheiten (überhöht, Legende in gesonderter Tabelle).

Legende zu Abbildung 6-2:

Lappwaldscholle		Allertalzone		Weferlinger Triasplatte	
132	Hettangium, Oberrhät	210	Quartär	310	Quartär und Tertiär
142	Mittlerrhät-Sandstein	222	Obere Alleringerslebener Schichten	361	Oberer Buntsandstein
143	Mergelhorizont des Unterrhät	233	Jura	363	Solling-Folge
144 145	Unterrhät	246	Steinmergelkeuper und Unterrhät	364	Volpriehausen-Folge
146	Steinmergelkeuper	247	Oberer Gipskeuper	365	Volpriehausen-Sandstein
147 148	Oberer Gipskeuper	248	Schilfsandstein	T6	Unterer Buntsandstein
		249	Unterer Gipskeuper, Unterer Muschelkalk	381	Nordöstliche Randstörung
150 151 152	Schilfsandstein	271 272	„intaktes“ Hutgestein		
L9	Unterer Gipskeuper	273	Schichtenfolge DGL		
L10	Mittlerer Muschelkalk				

Die Randbedingung zum Grundwasserdruck bzw. -fluss im 2D-Modell für Salzwasserhältnisse an der Modellobergrenze wurde dem 3D-Süßwassermodell (nach Kalibrierung) entnommen und als Festpotential vorgegeben. Die entsprechenden Randbedingungen an den übrigen Modellrändern waren „kein Grundwasserfluss über den Rand“, außer an der Verschneidung der Schichtenfolge DGL mit dem Salzspiegel (Abbildung 6-2): In den Modellrechnungen mit Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein erfolgt hier der Lösungsübertritt in das Hutgestein. Die Übertrittsrate wurde gestützt auf die Modellrechnungen mit EMOS und PROSA als Randbedingung angesetzt. Die Randbedingungen zum Salzgehalt im Deckgebirgswasser waren eine vorgegebene Salzkonzentration im Lösungsgleichgewicht mit Steinsalz (Halit) an der Obergrenze der Salzstruktur und in der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung, kein Salzgehalt im Niederschlagswasser, das an der Modelloberfläche infiltriert, ein verschwindender Gradient der Salzkonzentration im Grundwasser, das an der Modelloberfläche exfiltriert, und ein verschwindender Salzfluss an den Modellrändern ohne Grundwasserfluss, die nicht durch die Obergrenze der Salzstruktur gebildet werden.

Als  $k_f$ -Werte gelangten die Werte des Süßwassermodells nach Kalibrierung zur Anwendung.

## Rechenprogramme und Modellgrößen

Die 3D-Modellrechnungen für Süßwasserhältnisse wurden mit dem Finite-Elemente-Programm FSCGM (Free Surface Colenco Groundwater Model) durchgeführt. Dieses entstand durch Einbau der Möglichkeit, den Verlauf der Grundwasseroberfläche als dynamische Größe zu behandeln, aus dem Programm CGM. Das Programm CGM ist seinerseits eine Erweiterung des u. a. im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachwei-



ses für das Endlager Konrad eingesetzten, anerkannten Programms FEM-301 [Király 1985] für die Anwendung auf größere Modelle. Zur Verifikation des Programms FSCGM wurden Vergleichsrechnungen mit dem Programm FEM-301 durchgeführt. Das für die 3D-Modellrechnungen verwendete Finite-Elemente-Modellnetz ERAM besteht aus rund 200 000 Elementen mit quadratischen Formfunktionen, deren Geometrie durch etwas mehr als 480 000 Modellknoten definiert wird.

Die 2D-Modellrechnungen für Salzwasserverhältnisse wurden mit dem anerkannten und vielfach eingesetzten Finite-Elemente-Programm NAMMU (Version 6.3) [AEA 1996] sowie teilweise zur Ergänzung und Unterstützung mit dem von Colenco entwickelten Programm SoTraCoF (Solute Transport Coupled Flow) durchgeführt. Die nachfolgend angeführten, für den Nachweis der Langzeitsicherheit relevanten Ergebnisse sind solche von Modellrechnungen mit NAMMU. Das 2D-Modell setzt sich aus rund 17 000 Elementen mit linearen Formfunktionen zusammen, die Anzahl der Knoten beträgt knapp 18 000.

## Modellergebnisse

Nachfolgend werden die für den Nachweis der Langzeitsicherheit wesentlichen Ergebnisse der hydrogeologischen Modellrechnungen zusammengefasst.

Die mit den 3D-Modellrechnungen für die heutigen Verhältnisse [Colenco 2001a] ermittelte großräumige Grundwasserbewegung widerspiegelt erwartungsgemäß die morphologischen Verhältnisse am Standort. Sie wird dominiert durch ein von den Erhebungen des Lappwalds und der Weferlinger Triasplatte quer zum Allertal gerichtetes Grundwasserfließfeld. Der dominante Vorfluter ist die Aller. Unterhalb der Aller ist die Grundwasserbewegung vorwiegend aufwärts gerichtet. Außerhalb der unmittelbaren Umgebung der Aller herrschen horizontale, zur Aller hin gerichtete Fließrichtungen des Grundwassers vor. Lokal treten in den Aquiferen der Oberkreide und des Quartär auch Fließkomponenten längs des Allertals auf. In der Weferlinger Triasplatte verursacht die relativ gut durchlässige Solling-Folge des Mittleren Buntsandstein Abweichungen von der allgemeinen, zur Aller hin gerichteten Grundwasserbewegung: Sie führt einerseits Grundwasser zur NE-Randstörung der Allertalzone, entlang der ein Grundwasseraufstieg erfolgt, und andererseits nach Nordosten, wo es im Geländeeinschnitt von Schwanefeld an die Oberfläche austritt.

Der Grundwasserfluss in der Lappwaldscholle zeigt stärkere Abweichungen von der allgemeinen Fließrichtung quer zum Verlauf des Allertals. Verursacht wird dies durch die geringe Durchlässigkeit der aus Jura-Schollen aufgebauten SW-Randstörung der Allertalzone, eine flach nach Nordosten einfallende Muldenstruktur, Einschnitte von Seitentälchen sowie Grundwasserentnahmen. Die Abweichungen sind jedoch im Nordwest-Teil des Modellgebietes ausgeprägter und südöstlich des Schachtes Marie relativ gering. Grundwasserflüsse parallel zum Allertal treten dort vorwiegend in den Sandsteinen des Mittleren und Unteren Rhät auf.

Die Abschätzung des möglichen Lösungszutritts in das Grubengebäude ist in [Colenco 2001b] dargestellt. Mit fortschreitendem (stärkerem) Lösungszutritt gelangen zunehmend an NaCl ungesättigte Wässer an die Basis des Hutgesteins. Dies löst im Bereich der Übertrittsstelle in das Salzgebirge Lösungsprozesse aus, wodurch lokal die hydraulische Durchlässigkeit ansteigt. Für die Abschätzung des möglichen Lösungszutritts wurde deshalb angenommen, dass die Übertrittsstelle in das Salzgebirge eine relativ große Ausdehnung von  $150 \text{ m}^2$  aufweist und zudem mit einer Subrosionsrinne verbunden ist, welche an der Basis der Schichtenfolge DGL verläuft und mit der Zeit über zunehmend größere Distanzen als Folge von Lösungsprozessen hoch durchlässig ist. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Wegsamkeit im Salzgebirge vom Salzspiegel bis zur Übertrittsstelle in die Grube einen vernachlässigbar geringen hydraulischen Widerstand darstellt und dass in der Grube Atmosphärendruck herrscht. Unter diesen Annahmen und bei einem plausiblen großräumigen  $k_f$ -Wert des intakten Hutgesteins führten die Modellrechnungen auf Zutrittsraten

- von etwa  $55 \text{ m}^3/\text{a}$  für heutige Verhältnisse, d. h. ohne Bereich der Subrosionsrinne mit extrem hoher hydraulischer Durchlässigkeit,
- von etwa  $90 \text{ m}^3/\text{a}$  für spätere Zeiten, bei einer Ausdehnung des extrem hoch durchlässigen Bereichs der Subrosionsrinne von 200 m, und

- von  $260 \text{ m}^3/\text{a}$  für eine sehr große Ausdehnung (800 m) des durch Lösungsprozesse beeinflussten Bereichs der Subrosionsrinne.

Selbst bei einer 5-fach höheren hydraulischen Durchlässigkeit des intakten Hutgesteins beträgt die höchste berechnete Zutrittsrate lediglich  $600 \text{ m}^3/\text{a}$ .

Auf der Basis der 3D-Modellrechnungen ohne Dichteinfluss (Süßwasserverhältnisse) wurden die möglichen Ausbreitungspfade von Lösung ermittelt, die im Bereich der Grube Bartensleben in das Hutgestein ausgepresst wird [Colenco 2002a]. Zielsetzung war die Identifikation der möglichen Ausbreitungspfade in 3D und insbesondere die Klärung der Frage, ob Ausbreitungspfade längs des Allertals auftreten können. Bei den Modellrechnungen wurde auch der wenig wahrscheinliche Fall einbezogen, dass die Schichtenfolge DGL nur unvollständig zerblockt ist und damit eine ausgedehnte Wegsamkeit längs des Allertals darstellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Ausbreitung der Lösung aus der Grube Bartensleben und damit von Radionukliden aus dem Grubengebäude über größere Distanzen längs des Allertals ausgeschlossen werden kann. Selbst bei völlig unwirksamer Zerblockung der Schichtenfolge DGL beschränkt sich die Freisetzung von Grubenlösungsanteilen in das oberflächennahe Grundwasser auf ein Gebiet mit einer Ausdehnung von rund 1,7 km längs des Allertals oder weniger. Die aufgrund der geologischen Verhältnisse im Hutgestein wahrscheinlich hydraulisch wirksame Zerblockung der Schichtenfolge DGL begrenzt die Ausbreitung auf ein Gebiet mit entsprechend geringerer Ausdehnung längs des Allertals. Diese Modellergebnisse begründen die weiter unten beschriebene Berechnung der Ausbreitungspfade mit einem vertikalen 2D-Modell, das quer zum Allertal verläuft. Die 3D-Modellrechnungen ohne Dichteinfluss zeigen jedoch auch, dass die Ausbreitung eines hohen Anteils der ausgepressten Grubenlösung mindestens teilweise durch das intakte Hutgestein und nicht entlang der Schichtenfolge DGL erfolgt.

Entsprechend der mit den 3D-Modellrechnungen [Colenco 2002a] abgeschätzten Ausdehnung des Gebiets, in das Radionuklide aus dem Endlager potenziell freigesetzt werden können, wurde auch der (oberflächennahe) Grundwasserfluss ermittelt, der bei der Ausbreitung im Hutgestein und Deckgebirge verdünnend wirkt. Beim Transport durch Hutgestein und Deckgebirge erfährt die aus dem Grubengebäude ausgepresste Lösung durch Dispersion und Diffusion eine Verdünnung mit Grundwasser. Diese Verdünnung ist in größerer Tiefe eher gering und in den oberflächennahen Grundwasserträgern mit hohem Grundwasserumsatz relativ hoch. Die kumulierte Wirkung der Verdünnung im Hutgestein und Deckgebirge entspricht dem Verhältnis der folgenden zwei Flüsse: (1) Der oberflächennahe, die Biosphäre beeinflussende Grundwasserfluss durch das Gebiet, in das die Radionuklide nach dem Transport durch die tieferen Bereiche des Deckgebirges übertreten, und (2) die Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein. Für den Langzeitsicherheitsnachweis wurde angenommen, dass die potenziell aus dem Grubengebäude austretenden Radionuklide in ein Gebiet freigesetzt werden, das eine Ausdehnung von lediglich 200 m in Richtung des Allertals aufweist (Referenzwert). Der verdünnende Grundwasserfluss durch dieses Gebiet wurde dem mittleren Grundwasserumsatz des 3D-Grundwassermodells in einem Gebiet des Allertals gleichgesetzt, das südwestlich der Aller liegt und entlang des Allertals eine Ausdehnung von 200 m aufweist. Dieser Grundwasserumsatz beträgt rund  $15\,000 \text{ m}^3/\text{Jahr}$  entsprechend  $29 \text{ l}/\text{min}$  ([Colenco 2009], Anhang T).

Die 2D-Modellrechnungen unter Berücksichtigung von Dichteeffekten [Colenco 2002b] ergeben sehr geringe Grundwasserbewegungen in größeren Tiefen, wo das Grundwasser einen hohen Salzgehalt aufweist. In der Lappwaldscholle ist dies insbesondere auf die flache Wechsellagerung von gering und relativ höher durchlässigen Schichten sowie auf die Gipskeuper-Salzlager zurückzuführen. Der hohe Salzgehalt des tiefen Grundwassers in der Lappwald-Scholle ist in erster Linie auf die Aufsatzung an diesen Salzlagern zurückzuführen. In der Folge ist die Subrosion an der SW-Flanke der Zechstein-Salzstruktur besonders gering.

Die Bewegung des hoch salzhaltigen Grundwassers in größeren Teufen ist in der Lappwaldscholle und in der Allertalzone zum tieferreichenden, gut durchlässigen Oberkreide-Trog in der Allertalzone hin gerichtet. Im so genannten intakten Hutgestein nordöstlich des Trogs herrschen bei niedrigen Fließgeschwindigkeiten ungefähr horizontale Bewegungsrichtungen in südwestlicher Richtung vor. In der Schichtenfolge DGL ist die Grundwasserbewegung – aufgrund des Einfallens der Schichtenfolge nach Südwesten – nach unten, zum Salzspiegel hin gerichtet. Als Folge der geringen Durchlässigkeit des Hutgesteins für großräumige horizontale Grundwasserbewegungen quer zum Allertal ist auch die Subrosion am Salzspiegel der Salzstruktur sehr gering.

Die beschränkt durchlässigen Gesteinspakete aus Schollen des Unteren, Mittleren und Oberen Buntsandstein und vereinzelt verstärkten Muschelkalkschollen im Bereich der steil stehenden NE-Randstörung der Allertalzone entkoppeln diese mit zunehmender Tiefe hydraulisch weitgehend von der Weferlinger Triasplatte. Nach den 2D-Modellrechnungen ist das Gebiet, in dem die NE-Randstörung an der Geländeoberfläche ausstreicht, Infiltrationsgebiet, d. h. ein Gebiet mit Grundwasserneubildung. Das auf den Höhenlagen der Weferlinger Triasplatte infiltrierende Niederschlagswasser exfiltriert vorwiegend nordöstlich der NE-Randstörung. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der an die Salzstruktur im NE angrenzenden Gesteine findet auch in diesem Bereich praktisch keine Subrosion statt. Bohrungen in die Salzstockflanke in einem nördlich gelegenen aktiven Salzbergwerk belegen diese Aussage.

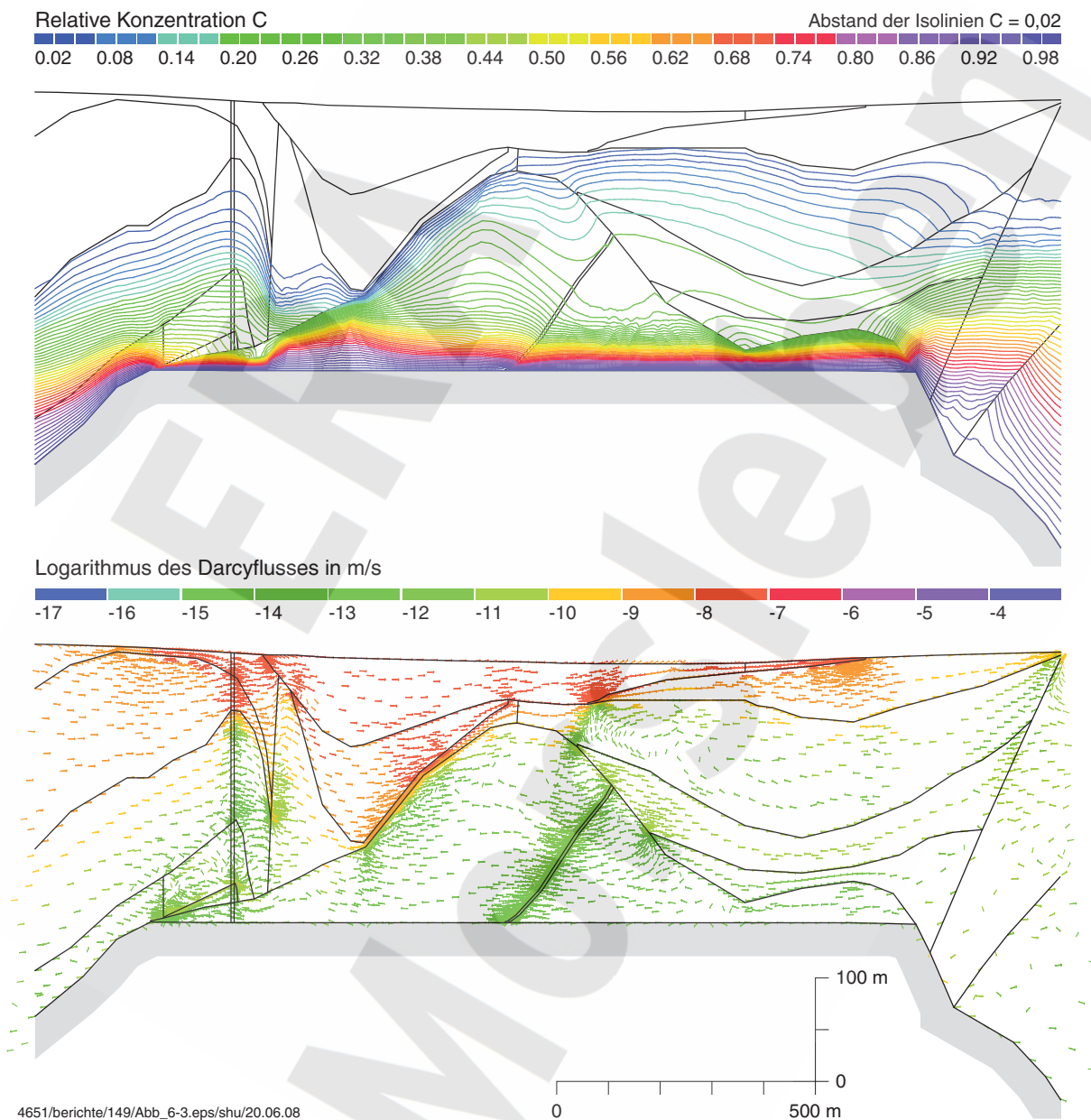


Abbildung 6-3: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen mit Dichteeffekten ohne Lösungszutritt in das Grubengebäude oder Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude. Oben: relativer Salzgehalt des Grundwassers; unten: Filtergeschwindigkeiten.



Abbildung 6-3 zeigt die mit dem 2D-Modell unter Berücksichtigung von Dichteeffekten berechneten Salzgehalte im Grundwasser und Filtergeschwindigkeiten im Hutgestein und Deckgebirge. Die Ergebnisse zum Salzgehalt im Grundwasser wurden durch Vergleich mit Messungen an Wasserproben überprüft. Insgesamt ist die Übereinstimmung zwischen Mess- und Rechenwerten befriedigend, eine ausführliche Diskussion enthält [Colenco 2002b]. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung sind auch konsistent mit den Schlussfolgerungen von [Sonntag 1999] aus den Isotopen- und Edelgas-Untersuchungen im Grundwasser. Insgesamt sind die Ergebnisse der Modellrechnungen als konsistent mit den Grundwasseranalysen und den aus diesen ableitbaren Aussagen zur Grundwasserbewegung einzustufen.

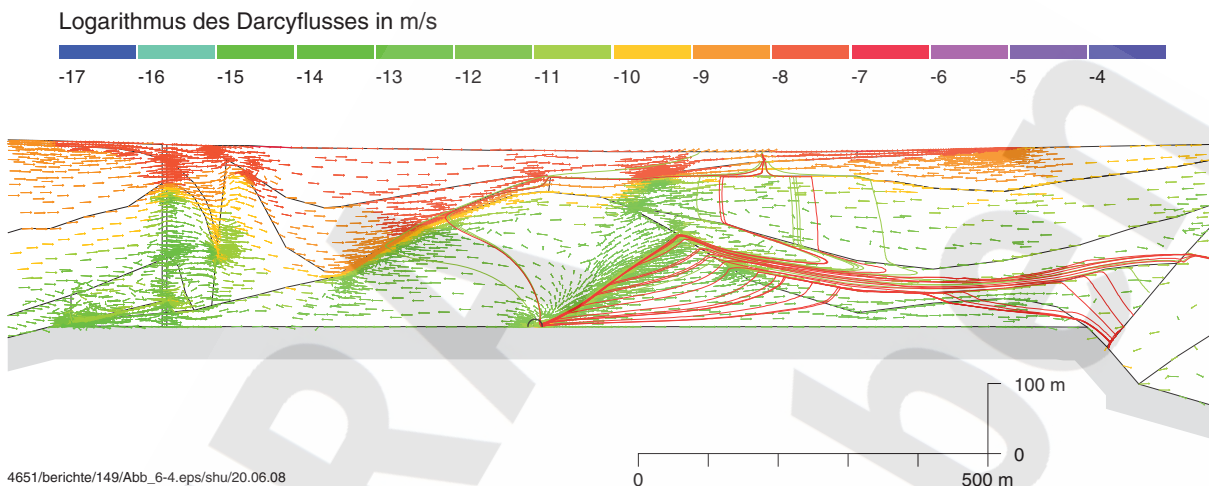


Abbildung 6-4: Ergebnisse der 2D-Modellrechnungen mit Dichteeffekten mit Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude: Filtergeschwindigkeiten und Trajektorien bei einem Übertritt in das Hutgestein am unteren Ende der Schichtenfolge DGL.

In Abbildung 6-4 sind die Filtergeschwindigkeiten in Hutgestein und Deckgebirge dargestellt, die sich nach dem 2D-Modell unter Berücksichtigung von Dichteeffekten bei einem Auspressen von Lösung in das Hutgestein am unteren Ende der Schichtenfolge DGL für den Fall einer relativ großen Ausdehnung des hoch durchlässigen Bereichs der Subrosionsrinne ergeben. Ebenfalls dargestellt sind die Fließtrajektorien für 31 regelmäßig verteilte Startpunkte in der unmittelbaren Nähe der Übertrittsstelle in das Hutgestein. Die Analyse der Fließtrajektorien, die für unterschiedliche Annahmen zu den hydraulischen Verhältnissen an der Übertrittsstelle und im Hutgestein ermittelt wurden, zeigt, dass drei Typen von Trajektorienverläufen auftreten (Kapitel 4.2.2 und Abbildung 4-1) [Colenco 2002b]:

- (i) durch das Hutgestein im Südwesten der Schichtenfolge DGL direkt (oder durch eine geringmächtige Schicht Jura) in den Oberkreidetrog und entlang dessen Basis nach Nordosten ansteigend bis in das Exfiltrationsgebiet nahe der Aller,
- (ii) entlang der Schichtenfolge DGL oder nordöstlich davon durch das Hutgestein und dann durch das Deckgebirge der Allertalzone (Schilfsandstein, Oberer Gipskeuper, Steinmergelkeuper) in das oberflächennahe Grundwasser,
- (iii) entlang der Schichtenfolge DGL oder nordöstlich davon durch das Hutgestein, dann entlang des Schilfsandstein nach Nordosten in die Weferlinger Triasplatte und durch die Schichten des Buntsandstein in das oberflächennahe Grundwasser.

Bei einem Übertritt in das Hutgestein oberhalb des Zentralteils der Grube Bartensleben treten alle drei Ausbreitungspfade auf, die ausgepresste Lösung teilt sich unter den erwarteten Verhältnissen nach den Modellrechnungen etwa im Verhältnis 1:2:2 auf die drei Pfade auf (Abbildung 6-4). Bei einem Übertritt in das Hutgestein oberhalb des Nordfelds (ELB NF) tritt der Pfad (iii) nicht auf und der Pfad (ii) führt direkt aus dem Hutgestein in den Steinmergelkeuper. Die Aufteilung der Lösung beträgt etwa 1:6:0. Diese Verhältnisse ha-



ben indikativen Charakter und sind für den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit nicht von quantitativer Bedeutung.

Die Modellergebnisse hängen von der Ausdehnung des Bereichs ab, über die die Subrosionsrinne an der Basis der Schichtenfolge DGL während des Volllaufens der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie durch Lösungsprozesse hoch durchlässig geworden ist. Beim Auspressen von Lösung aus der Grube verteilt sich die Lösung mit geringem hydraulischem Widerstand entlang dieses Bereichs, bevor sie in die Schichtenfolge DGL oder das „intakte“ Hutgestein übertritt. Die Ausdehnung des hochdurchlässigen Bereichs der Subrosionsrinne bestimmt dadurch die spezifische Auspressrate pro Fläche in das Hutgestein.

Die berechneten Transportzeiten (ohne Sorption) betragen für den Pfad (i) zwischen rund 1000 Jahren und mehreren 10 000 Jahren, für den Pfad (ii) mehrere 10 000 bis einige 100 000 Jahre und für den Pfad (iii) einige 10 000 Jahre. Diese Angaben beziehen sich auf die für eine lange Zeitperiode zu erwartende Rate der Lösungsauspressung aus der Grube von  $10 \text{ m}^3/\text{a}$  (vgl. Kapitel 6.6) und eine Ausdehnung des hochdurchlässigen Bereichs der Subrosionsrinne zwischen 50 m und 500 m.

Die Pfade des Typs (ii) und (iii) führen immer durch sorbierende Schichten des Keuper oder des Buntsandstein. Selbst die ungünstigsten Pfade, jene des Typs (i), die direkt durch das „intakte“ Hutgestein in den Oberkreide-Trog führen, verlaufen dort über eine Transportdistanz im Bereich von 100 m oder mehr in den Oberen Alleringerslebener Schichten, welche sorbierend wirken.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ausbreitung von Grubenlösung und darin gelösten Radionukliden im Hutgestein in erster Linie durch den hydraulischen Druck angetrieben wird, der durch das Auspressen von Lösung aus der Grube in das Hutgestein an dessen Basis erzeugt wird. Die Auswirkung der natürlichen Grundwasserbewegung im Hutgestein ist vernachlässigbar gering. Die Schichtenfolge DGL stellt als relativ durchlässige Struktur im Hutgestein eine wichtige, jedoch nicht die einzige wirksame Wegsamkeit dar. Dichteeffekte beeinflussen die Ausbreitung der relativ schweren Lösung aus der Grube im Hutgestein und Deckgebirge erheblich. Die aus der Grube ausgepresste Lösung kann sich entlang drei verschiedener Typen von Ausbreitungspfaden ausbreiten, die alle mit mehr oder weniger langen Abschnitten durch geologische Schichten mit Sorptionspotenzial führen. Die Exfiltrationsgebiete liegen in der Umgebung der Aller und in Tieflagen der Weferlinger Triasplatte. Die Transportzeit (ohne Sorption) durch Hutgestein und Deckgebirge beträgt wenigstens 1000 Jahre.

Gestützt auf diese Modellergebnisse wird für den Langzeitsicherheitsnachweis angenommen, dass der Radionuklidtransport durch das Hutgestein und Deckgebirge ausschließlich durch das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude angetrieben wird und in einer seitlich begrenzten Wegsamkeit erfolgt. Die Transportdistanz im Hutgestein und Deckgebirge (ohne Transportabschnitte in der Kreide und im Quartär) betrage 220 m, d. h. weniger als der Vertikalabstand des Salzspiegels von der Geländeoberfläche. In Anlehnung an die Eigenschaften der Schichtenfolge DGL wurden der Transportquerschnitt zu  $150 \text{ m}^2$  und die transportwirksame Porosität zu 30% (jeweils Referenzwerte) angesetzt. Bei der über eine lange Zeitperiode zu erwartenden Auspressrate von  $10 \text{ m}^3$  pro Jahr ergibt dies eine Transportzeit von nichtsorbierenden Radionukliden von knapp 1000 Jahren. Die Sorptionsparameter ( $K_d$ -Werte) einer Mehrzahl an Radioelementen wurden unter Verwendung eines Reduktionsfaktors für den geringeren Tonanteil im Grauen Salzton der Schichtenfolge DGL aus einem Datensatz für die Schicht Unterkreide im Deckgebirge des Endlagers Konrad abgeleitet. Für die hinsichtlich der Langzeitsicherheit potenziell wichtigsten Radioelemente wurden standortspezifische  $K_d$ -Werte an Proben aus der Schichtenfolge DGL erhoben [INE 2003] und in den Modellrechnungen angewendet. Im weiteren wird angenommen, dass anschließend an den Transport entlang der beschriebenen stilisierten Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) ein weiterer Transportabschnitt durch eine sorbierende Einheit folgt, die die Eigenschaften der Oberen Alleringerslebener Schichten aufweist. Damit berücksichtigt der Langzeitsicherheitsnachweis Änderungen der Konzentrationsverhältnisse von Radionukliden einer Zerfallsreihe aufgrund von Sorptionseigenschaften oberflächennaher Schichten. Für die Berechnung der Verdünnung während des Transports durch das Hutgestein und Deckgebirge wird als relevanter oberflächennaher Grundwasserfluss  $15 000 \text{ m}^3$  pro Jahr (Referenzwert) angesetzt. Fließquerschnitt, transportwirksame Porosität, Sorptionsparameter und verdünnender oberflächennaher Grundwasserfluss werden in einem angemessenen breiten Parameterbereich variiert.

## 6.3 MODELLRECHNUNGEN ZUR GASBILDUNG

Gasbildung und die lokale Speicherung von gebildetem Gas in Grubenbauen führen zum Anstieg des Fluiddrucks und verdrängen Lösung, sofern der für die Gasspeicherung erforderliche Poren- oder Hohlraum lösungsgesättigt ist. Sie haben Einfluss auf die Lösungsbewegung im und damit den Transport von gelösten Radionukliden aus dem Grubengebäude. In der entstehenden Gasphase können zudem volatile Radionuklide transportiert werden, aus dem Grubengebäude austreten und durch das Hutgestein und das Deckgebirge bis in die Biosphäre gelangen. Zielsetzung der Modellrechnungen zur Gasbildung ist es deshalb, die möglichen Raten der Gasbildung, deren zeitliche Entwicklung sowie die kumuliert gebildeten Gasmengen in den verschiedenen Grubenbereichen im Hinblick auf die genannten Auswirkungen zu ermitteln. Da die Gasbildung in den abgedichteten Einlagerungsbereichen und der dadurch verursachte Druckanstieg den Zutritt von Lösung zu den Abfällen behindern, ist eine Überschätzung der Gasbildungsrate nicht in jedem Fall konservativ und eine „auf der sicheren Seite“ liegende Ermittlung der Gasbildung generell nicht möglich.

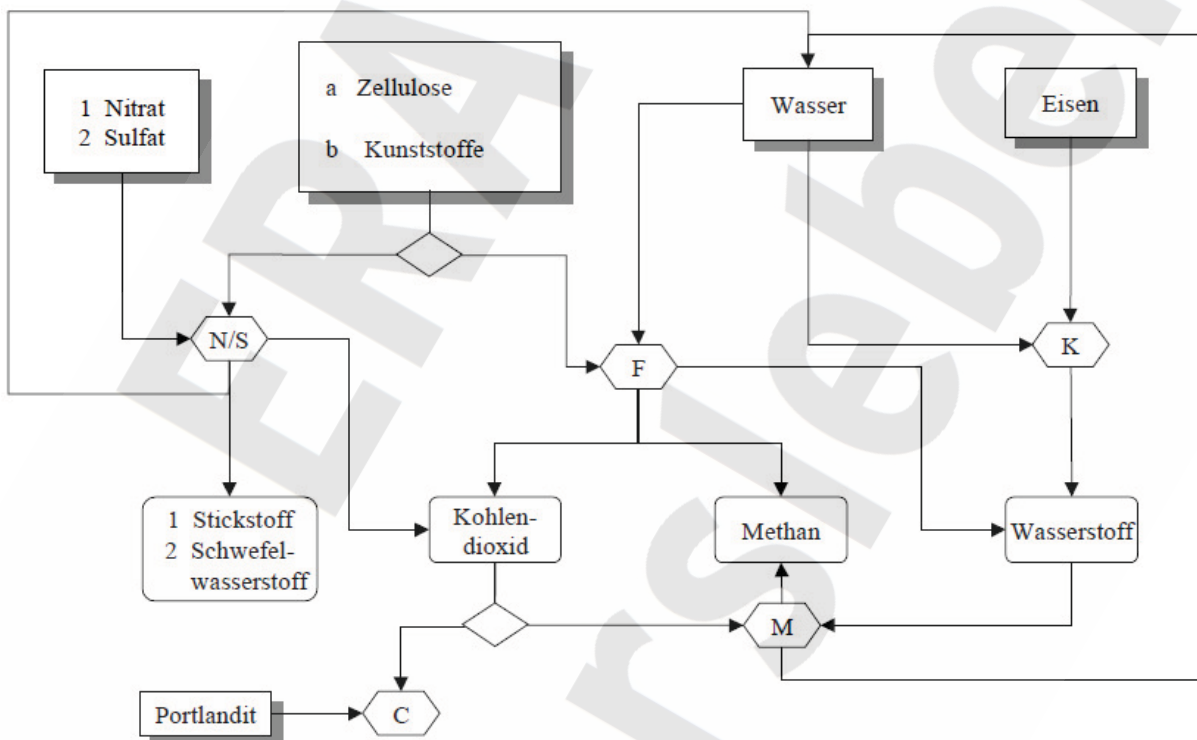


Abbildung 6-5: Rechenprogramm für die Modellierung der Gasbildung: berücksichtigte Prozesse. N steht für Denitrifikation, S für Sulfatreduktion, F für Fermentation, M für Methanogenese, K für Korrosion und C für Carbonatisierung.

Für die Modellierung der Gasbildung wurde das Programm GASGEN entwickelt und angewendet [Colenco 2002c]. Das Modell simuliert die Gasbildung durch Metallkorrosion und durch mikrobiellen Abbau organischer Stoffe unter anaeroben Bedingungen und berücksichtigt dabei die folgenden Prozesse (Abbildung 6-5): anaerobe Metallkorrosion, mikrobielle Zersetzung von Zellulose (als leicht abbaubare Fraktion), mikrobielle Zersetzung von Kunststoff (als schwer abbaubare Fraktion, stöchiometrisch als  $C_2H_4$  angesetzt), Methanogenese, Carbonatfällung (Carbonatisierung), Sulfidfällung und Inhibition der Fermentation durch Wasserstoff. Die mikrobielle Zersetzung organischer Stoffe wird im Modell in Abhängigkeit vom verfügbaren Nitrat und Sulfat als Denitrifikation und Sulfatreduktion sowie – wenn keines der beiden Edukte (mehr) verfügbar ist – als Fermentation modelliert. Durch die Methanogenese, d. h. die Bildung von Methan aus  $CO_2$  und  $H_2$ , und die Inhibition der Fermentation durch Wasserstoff sind die anaerobe Metallkorrosion und die mikro-

bielle Zersetzung von organischen Stoffen gekoppelt. Die Radiolyse als dritter Gas bildender Prozess trägt nur in vernachlässigbarem Ausmaß zur Gasbildung bei und wird deshalb bei der Simulation vernachlässigt.

Da die Heterogenität der Stoffzusammensetzung im Grubengebäude nicht im Detail bekannt ist und auch die Parameter für die Vielzahl der Teilreaktionen, aus denen sich die oben genannten Prozesse zusammensetzen, für das Spektrum der möglichen Bedingungen nur unvollständig bekannt sind, beruht das Programm GASGEN auf folgenden Vereinfachungen: (1) Das Programm bezieht sich auf ein System mit homogener räumlicher Verteilung der Gas bildenden Stoffe, des für die Gasbildung erforderlichen Wassers, der Elektroakzeptoren (Nitrat, Sulfat) und der Mikroorganismen. In der Anwendung stellen die Einlagerungsbereiche und die übrige Grube in Bezug auf die Gasbildung Homogenbereiche dar. (2) Die Prozesse werden als Bruttoreaktionen und nicht als Summe von Teilreaktionen abgebildet. Für Bruttoreaktionen sind experimentell bestimmte Reaktionsgeschwindigkeiten verfügbar, oder die Reaktionsgeschwindigkeiten lassen sich aus experimentell ermittelten Größen ableiten.

Jede Reaktion wird im Modell als Reaktion erster Ordnung simuliert. Wenn an der Reaktion noch ein zweites Edukt teilnimmt, wird dies bei der Massenbilanz berücksichtigt und die mögliche Limitierung durch das zweite Edukt mit einem Regelparameter modelliert. Durch Regelparameter berücksichtigt werden im Programm z. B. die Verfügbarkeit von Nitrat und Sulfat sowie die Inhibition der Fermentation durch Wasserstoff.

Die Gasbildung durch anaerobe Metallkorrosion hängt einerseits von den Inventaren der Metalle Eisen, Aluminium und Zink und andererseits von den geometrischen Formen der Metallstücke, exakter deren Oberflächen/Volumen-Verhältnissen im Verlauf der fortschreitenden Korrosion, ab. Die korrosive Gasbildung wurde unter Berücksichtigung dieser Einflussfaktoren in [BfS 2003] ermittelt. Die Ergebnisse erlauben, die anaerobe Metallkorrosion in GASGEN als Reaktion erster Ordnung zu parametrisieren. Das Vorgehen wie auch die Ableitung der übrigen Prozessparameter sind in [Colenco 2002c] beschrieben. Die Inventardaten für die Gas bildenden Stoffe in den Abfällen stammen aus [BfS 2000], die Inventare an Gas bildenden Stoffen außerhalb der Einlagerungsgrubenbaue sind durch Hochrechnung der Angaben in [DBE 2005c] ermittelt worden.

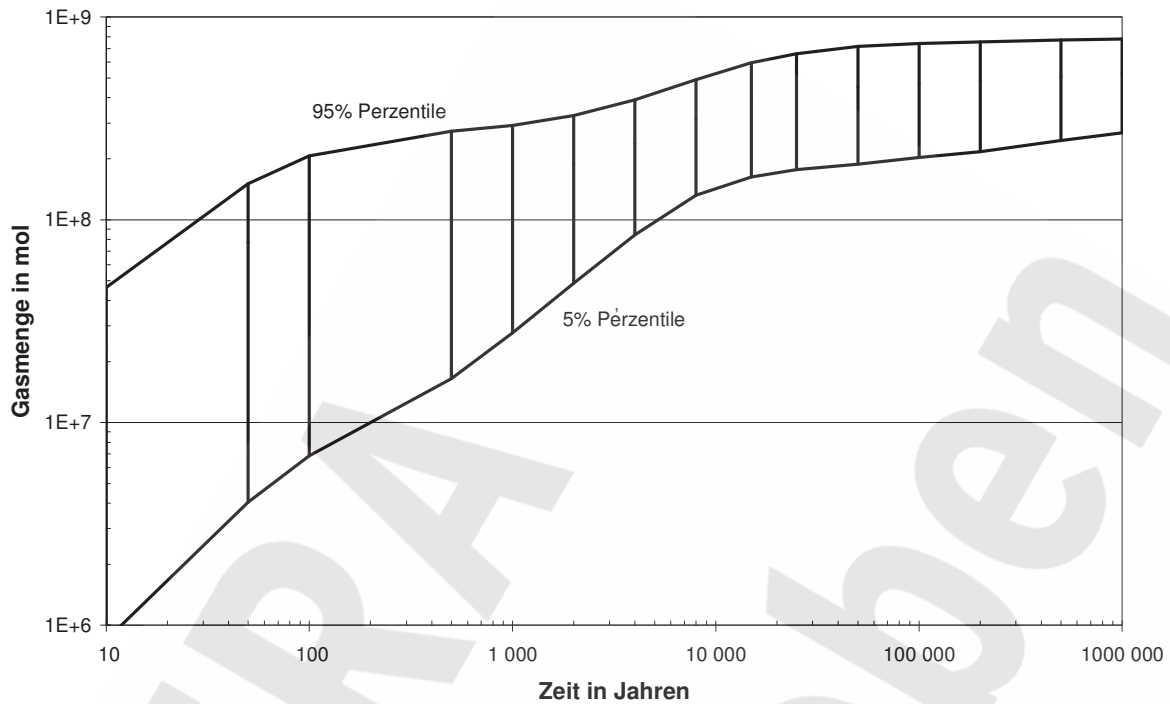
Da sämtliche Eingangsgrößen, einschließlich der Inventare an Gas bildenden Stoffen, Ungewissheiten aufweisen, wurde die Gasbildung in den verschiedenen Grubenbereichen mit probabilistischer Variation der Eingangsgrößen simuliert. Dazu wurden den Eingangsgrößen Bandbreiten und Verteilungsfunktionen zugewiesen. Als Bandbreiten der wichtigsten Stoffinventare (Metalle, Zellulose, Kunststoffe) wurden 70% – 130% der aus den oben angeführten Unterlagen entnommenen bzw. abgeleiteten Referenzwerte angesetzt, die Bandbreiten der Reaktionsgeschwindigkeiten betragen 2,5 bis 3 Größenordnungen. Die Modellrechnungen wurden unter der Voraussetzung durchgeführt, dass jederzeit ausreichend Wasser vorhanden ist und dass die gesamten Stoffinventare dauernd zugänglich sind (kein Einschluss von Teilen der Inventare durch Kriechvorgänge im Salz).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen für die verschiedenen Grubenbereiche qualitativ ähnliche Verläufe. Die Gasbildungsraten sind zu Beginn am höchsten und nehmen mit fortschreitender Zeit ab. Nach etwa 1 Mio. Jahren ist die Gasbildung im gesamten Grubengebäude weitgehend abgeschlossen. Der Hauptbestandteil des gebildeten Gases ist Wasserstoff, gefolgt von Methan und Stickstoff. Kohlendioxid bleibt nur wenig in der Gasphase, da es durch Portlandit gebunden (Carbonatisierung) bzw. durch Methanogenese mikrobiell verarbeitet wird. Die Bandbreiten der Gasbildungsraten und damit auch jene der zu frühen Zeiten kumuliert gebildeten Gasmengen sind groß. Demgegenüber spiegeln die nach langer Zeit kumuliert gebildeten Gasmengen weitgehend die Ungewissheiten in Bezug auf die Stoffinventare wider und sind dementsprechend kleiner.

Die nach langer Zeit kumuliert gebildeten Gasmengen sind im ELB WSF am größten, gefolgt vom ELB OF, der übrigen Grube, dem ELB NF und dem ELB ZT. Die Gasbildung in den Einlagerungsbereichen WSF, OF und NF hält lange an. In der übrigen Grube und im ELB ZT erfolgt die Gasbildung rasch und ist nach wenigen 1000 Jahren mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit weitgehend abgeschlossen. Angesichts der Zeitperiode, die ein Volllaufen der Restgrube selbst unter ungünstigen Verhältnissen erfordert (vgl. Kapitel 4.2.2), kann die Gasbildung in der übrigen Grube bei der Entwicklung des Systems „mit relevantem Lösungszutritt“

höchstens zum Anstieg des Gasdrucks in der Grube während der Phase des Lösungszutritts beitragen, nicht jedoch in relevantem Maße Lösung aus der Grube in das Hutgestein auspressen.

(a)



(b)

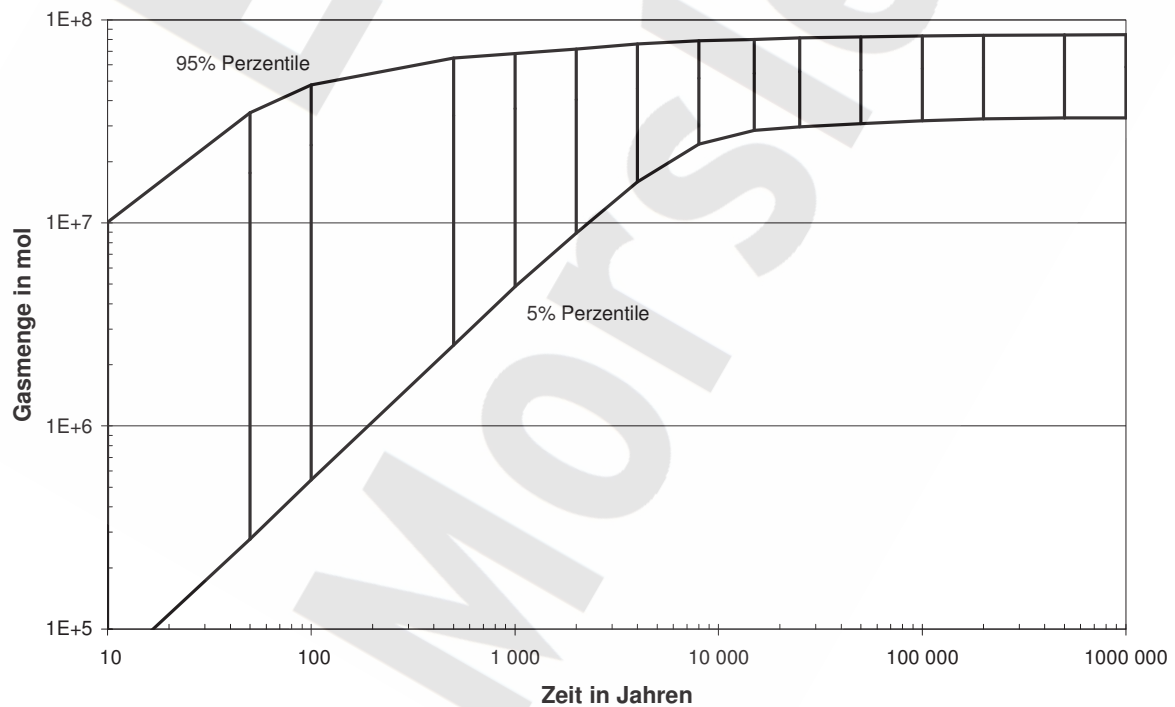


Abbildung 6-6: Bandbreite der kumuliert gebildeten Gasmenge als Funktion der Zeit:

- (a) im ELB WSF,
- (b) in der übrigen Grube.



Die Abbildung 6-6 zeigt beispielhaft die mit GASGEN ermittelte Gasbildung im ELB WSF und in der übrigen Grube. Dargestellt ist – als Funktion der Zeit – die Bandbreite der bis zum jeweiligen Zeitpunkt kumuliert gebildeten Gasmenge (5-Perzentile und 95-Perzentile bei 2000 Realisierungen). Die nach 15 000 Jahren gebildeten Gasmengen (Medianwerte) im ELB WSF und in der Restgrube (übrige Grube + ELB NF + ELB ZT) entsprechen – komprimiert auf den hydrostatischen Druck auf der 2. Sohle von 4,3 MPa – den Anteilen von 30 % bzw. 1,7 % der in Kapitel 4.1 angeführten „luftgefüllten“, d. h. fluidzugänglichen Volumen in den beiden Grubenbereichen unmittelbar nach Verschluss des Endlagers.

Die probabilistischen Modellrechnungen mit GASGEN ergeben eine Schar von zeitlichen Verläufen der Gasbildung in den verschiedenen Grubenbereichen. Die Ergebnisse wurden für die Modellierung des Radionuklidtransports in Lösung (Kapitel 6.6) und die Berechnung der Grundlagen für die Simulation des Radionuklidtransports in der Gasphase (Kapitel 6.7) einerseits in Form von drei charakteristischen und wahrscheinlichkeitsverteilten Größen übernommen [Colenco 2009]: die Gasbildungsrate zur repräsentativ frühen Zeit von 100 Jahren, die Gasbildungsrate zur repräsentativ späten Zeit von 10 000 Jahren und die nach langer Zeit kumuliert gebildete Gasmenge. Für diese Größen wurden aus den Ergebnissen von GASGEN Referenzwerte (Medianwerte), Bandbreiten und Verteilungsfunktionen abgeleitet [Colenco 2002c]. Mit der vereinfachenden Annahme ihrer statistischen Unabhängigkeit erlauben diese drei statistischen Größen bei den Modellrechnungen mit PROSA die probabilistische Darstellung der Gasbildung und ihres zeitlichen Verlaufs.

Eine alternative Parametrisierung der Gasbildung für die Simulation des Radionuklidtransports erfolgte bei den Modellrechnungen mit EMOS durch Summenbildung über zwei Prozesse erster Ordnung mit Reaktionskonstanten, die in allen Grubenbereichen gleich sind [GRS 2009b]. Die Parameterwerte (äquivalente Mengen Gas bildender Stoffe in den einzelnen Grubenbereichen und Reaktionskonstanten) wurden durch Anpassen der sich mit der Parametrisierung ergebenden Gasbildungsraten an die Ergebnisse von [Colenco 2002c] festgelegt. Die statistisch unabhängigen Größen in den Modellrechnungen mit EMOS sind die Stoffinventare und die Reaktionskonstanten.

In den Modellrechnungen zum Radionuklidtransport wurde zudem angenommen, dass an der Umsetzung Gas bildender Stoffe während der Phase nach Verschluss des Endlagers nicht die gesamten in die Berechnungen mit GASGEN eingegangenen Stoffinventare teilnehmen, da ein Teil von Steinsalz umschlossen oder anderweitig nicht für Flüssigkeit zugänglich sein wird bzw. schon während der Betriebsphase umgesetzt wurde. Der Anteil der während der Phase nach Verschluss des Endlagers umgesetzten Stoffmengen wurde mit einem Referenzwert von 80% in der Bandbreite von 10% bis 100% bezogen auf die Stoffinventare variiert.

## **6.4 MODELLRECHNUNGEN ZU WEITEREN PROZESSEN**

### **6.4.1 Konvergenz der Grubenbaue**

Bei den Modellrechnungen, die in den Kapiteln 6.5 bis 6.8 dargestellt sind, stellt die Konvergenz der Grubenbaue einen wesentlichen Prozess dar und muss deshalb über eine lange Zeitperiode und für sehr unterschiedliche Verhältnisse mit einer angemessenen Belastbarkeit abgebildet werden. Die beiden eingesetzten Programme EMOS und PROSA verwenden dabei die gleiche Parametrisierung gemäß [PSE 1985], wenden sie aber etwas unterschiedlich an [Colenco 2009], [GRS 2009b]. Dies wird weiter unten kurz beschrieben.

Die verwendete Parametrisierung für unverfüllte und kompaktierbar verfüllte Grubenbaue ist nach [PSE 1985] ein Produktansatz, wonach sich die Konvergenzrate, d. h. die zeitliche Abnahme des aufgefahrenen Volumens eines Grubenbaus (Konturvolumen) bezogen auf das aktuelle Konturvolumen, als Produkt der nachfolgend aufgeführten Größen darstellen lässt:

- einer ortsspezifischen Bezugskonvergenzrate,
- einer Funktion  $f_p$  des herrschenden Fluiddrucks zur Berücksichtigung von dessen Stützwirkung und
- einer Funktion  $f_\phi$  der Versatzporosität zur Berücksichtigung der Stützwirkung des Versatzes (bei Grubenbauen, die mit kompaktierbarem Material verfüllt sind).

Die Bezugskonvergenzrate beschreibt somit die Konvergenz von unverfüllten Grubenbauen (und allgemeiner von unverfüllten Hohlräumen), in denen Atmosphärendruck herrscht. Die Referenzwerte für die ortsspezifischen Bezugskonvergenzraten wurden aus den gebirgsmechanischen Modellrechnungen für die Schachanlage Bartensleben abgeleitet, differenziert für die Einlagerungsbereiche und die übrige Grube (vgl. Kapitel 6.1). Vereinfachend erfolgte in den Modellrechnungen keine Unterscheidung von trockenen und lösungsgesättigten Verhältnissen. Die Variation der Bezugskonvergenzraten in den probabilistischen Modellrechnungen deckt für jeden Grubenbereich eine Bandbreite von einer Größenordnung ab. Während PROSA die Konvergenz des ELB WSF mit einer einheitlichen Bezugskonvergenzrate abbildet, berechnet EMOS die Konvergenz für die beiden Grubenfelder Westfeld und Südfeld getrennt.

In die Parametrisierung von  $f_p$  gehen der im Hohlraum herrschende Fluiddruck, die in der Umgebung des Hohlraums wirksame Gebirgsspannung sowie ein charakteristischer Exponent ein, wobei sich letzterer aus dem Stoffgesetz für die Beschreibung des stationären Kriechens ableitet. Der herrschende Fluiddruck ist eine dynamische, durch die Modelle berechnete Größe, die sich mit der Zeit ändert und über die die Hohlraumkonvergenz eine dämpfende Rückkopplung erfährt. Diese dämpfende Rückkopplung ist in den Modellrechnungen allerdings nur für die abgedichteten Einlagerungsbereiche berücksichtigt. In der Restgrube, d. h. in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen und in der übrigen Grube, wurde für die Zeit nach dem Volllaufen als Fluiddruck der hydrostatische Wert angesetzt. Als maßgebende Gebirgsspannung, welche die Stärke der Rückkopplung bestimmt, wurde der lithostatische Gebirgsdruck verwendet. Sowohl der Fluid- als auch der Gebirgsdruck wurden für eine Bezugstiefe ausgewertet, die Modellierung erfolgte nicht sohlenspezifisch. Angesichts der relativ geringen Konvergenz im ERAM und der Bandbreiten von Bezugskonvergenzrate und Bezugstiefe bei den Sensitivitätsanalysen sind diese Vereinfachungen gerechtfertigt.

Die Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz, d. h. Salzversatz, Braunkohlefilterasche und Abfälle, wurde mit der Parametrisierung von  $f_\phi$  nach [PSE 1985] simuliert, wobei in den Einlagerungsgrubenbauen als maßgebende Porosität das volumengewichtete Mittel für die vorhandenen Versatztypen Salzversatz, Braunkohlefilterasche und Abfälle angesetzt wurde.

Die Berechnung der Konvergenz erfolgt in PROSA in allen Bereichen der Grube getrennt für die unverfüllten, für die mit kompaktierbarem Versatz verfüllten und für die mit Salzbeton verfüllten Hohlraumvolumen. Dies entspricht der Vereinfachung, dass durch die Konvergenz kein Versatzmaterial aus einem kompaktierbar verfüllten Bereich in unverfülltes Volumen gelangen kann. Für die Kompaktion von Salzbeton gelangt ein einfacher Exponentialansatz mit niedriger Kompaktionsrate für die zeitliche Entwicklung des Porenvolumens zur Anwendung, d. h. der Salzbeton wird als geringfügig kompaktierbar angesetzt.

In EMOS erfolgt die Berechnung in den Einlagerungsbereichen ebenfalls getrennt für die unverfüllten und die mit kompaktierbarem Versatz verfüllten Hohlraumvolumen. Für die Modellbereiche der übrigen Grube wurde aus dem fluidzugänglichen Volumen (unverfüllter Hohlraum und Porenvolumen im kompaktierbaren Versatz) und dem Konturvolumen der Grubenbaue eine mittlere Porosität ermittelt und daraus die Stützwirkung des Versatzes berechnet. Dies entspricht der Vereinfachung, dass in der übrigen Grube kompaktierbarer Versatz praktisch widerstandsfrei in unverfüllte Bereiche eindringen kann. Salzbeton wird als nicht kompaktierbar modelliert, die mit Salzbeton verfüllten Bereiche entsprechen in EMOS bei der Berechnung der Konvergenz nicht vorhandenem Hohlraum.

Zusätzlich zur Änderung der Konturvolumen von Grubenbauen durch Konvergenz wird in EMOS der gegenläufige Prozess von Abschalungen berücksichtigt, so lange im betreffenden Grubenbereich unverfüllter Hohlraum existiert. Durch Abschalungen vergrößert sich das Konturvolumen und es entsteht aus unversetztem Hohlraum kompaktierbar versetzter Hohlraum (Selbstversatz).

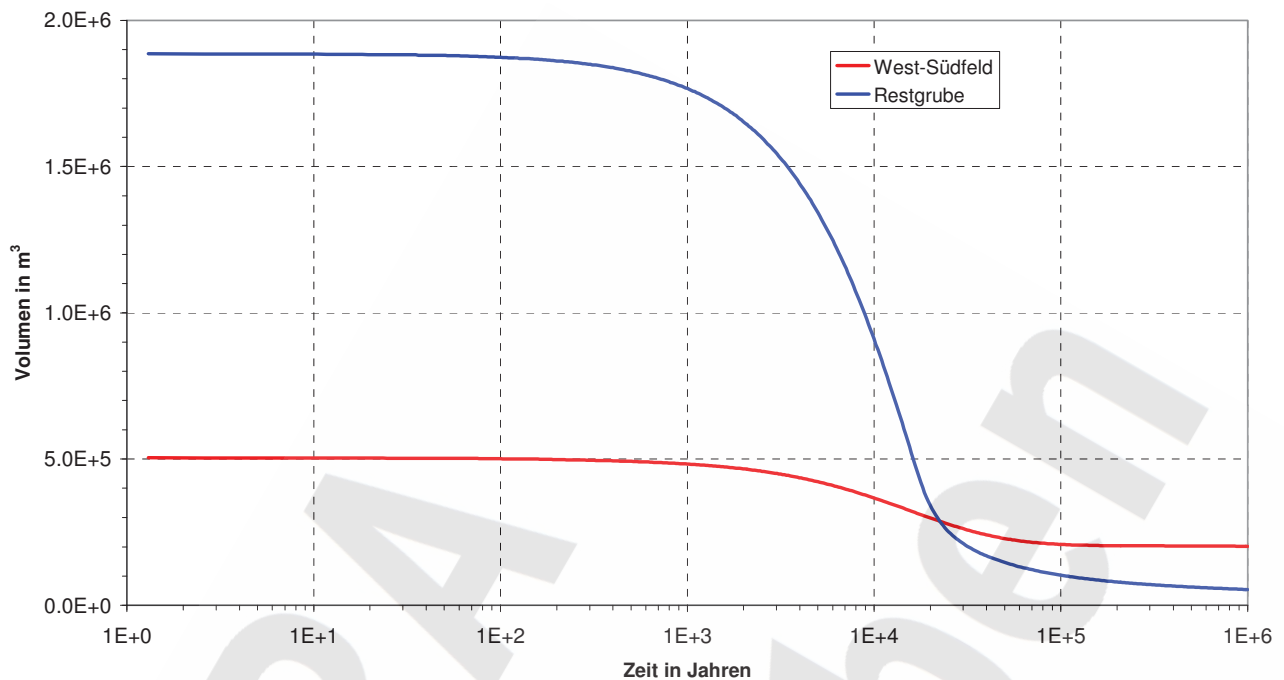


Abbildung 6-7: Zeitliche Entwicklung des fluidzugänglichen Volumens (unverfüllter Hohlraum und Porenvolumen im kompaktierbaren Versatz) in der Restgrube und im ELB WSF für die Referenzwerte der Modellparameter.

Abbildung 6-7 zeigt beispielhaft die mit EMOS ermittelte zeitliche Entwicklung des fluidzugänglichen Volumens als Folge der Konvergenz von Grubenbauen und von Abschaltungen in der Restgrube (ohne Stützwirkung durch den Fluiddruck) und im ELB WSF (mit Stützwirkung durch den sich aufbauenden Gasdruck bei undurchlässigen Abdichtungen), jeweils für die Referenzwerte der Modellparameter.

## 6.4.2 Korrosion von Abdichtungsbauwerken durch Grubenlösung

Die meisten Abdichtungsbauwerke werden aus Salzbeton errichtet. In Kontakt mit Mg-haltiger Lösung korrodiert Salzbeton, wobei der Korrosionsprozess durch den Transport von Mg-Ionen zur Korrosionsfront gesteuert wird. Die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle wird als einzige Abdichtung aus Magnesiabeton errichtet (vgl. Kapitel 3.3.2). Magnesiabeton wird nur durch Mg-arme Lösung korrodiert, wobei der Korrosionsprozess durch den Abtransport von Mg-Ionen von der Korrosionsfront (entsprechend dem Transport von Mg-arter Lösung zur Korrosionsfront) gesteuert wird. Die Rate, mit der die Abdichtbauwerke korrodieren können und damit ihre abdichtende Wirkung verlieren, beeinflusst die Entwicklung des Endlagersystems und dessen Langzeitsicherheit. In den beiden nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst die Modellierung der Korrosion von Abdichtbauwerken aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösung und anschließend jene der Korrosion der Abdichtung aus Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung beschrieben. Ausführliche Darstellungen enthalten [Colenco 2009] (Anhang L) und [GRS 2009b].

### Korrosion von Abdichtungsbauwerken aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösung

In der Restgrube können bei der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ (vgl. Kapitel 4.2.2) nach dem Volllaufen Lösungen mit unterschiedlicher Zusammensetzung, insbesondere in Bezug auf den Magne-

siumgehalt, vorliegen. Wie in Kapitel 3.3.2 dargelegt und begründet wurde, ist für die Errichtung der meisten Abdichtungen ein Material (Salzbeton) vorgesehen, das zwar in Kontakt mit NaCl-Lösung chemisch stabil ist, in Kontakt mit Mg-haltiger Lösung jedoch korrodiert. Die ausreichende Wirksamkeit der Abdichtungen in Kontakt mit Mg-haltiger Lösung wird durch die geringe Geschwindigkeit, mit der Mg-Ionen zur Korrosionsfront vordringen, über lange Zeit sichergestellt. Die zeitlich begrenzte Wirksamkeit der Abdichtungen ist Bestandteil des Konzepts für das Verfüllen und Verschließen des ERAM (Kapitel 3.3.2) und kompatibel mit dem Sicherheitskonzept (Kapitel 3.2.2). Nachfolgend wird dargestellt, wie die Korrosion von Abdichtungen aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösungen in den Modellrechnungen mit EMOS und PROSA abgebildet wird.

In Kontakt mit Mg-haltiger Lösung lösen sich Ca-haltige Phasen aus dem Salzbeton auf, gleichzeitig werden Mg-haltige Phasen ausgefällt. Dabei steigt die Permeabilität des Salzbetons an, nach experimentellen Befunden um mehrere Größenordnungen. Für die vollständige Korrosion von 1 m<sup>3</sup> Salzbeton ist ungefähr der Mg-Gehalt von 0,5 m<sup>3</sup> IP21-Lösung erforderlich. Bei anstehender IP21-Lösung ist damit der Salzbeton bei einer Porosität von 20 % ungefähr nach dem dreifachen Austausch seiner Porenlösung korrodiert [GRS 2003], [GRS 2009a].

Da vor dem Einbau der Abdichtungen die Auflockerungszonen der entsprechenden Streckenabschnitte weitgehend entfernt, die Abdichtungsbauwerke firstbündig erstellt, die Kontaktzonen zwischen Gebirge und Betonkörper – sofern erforderlich – nachträglich noch injiziert werden (vgl. Kapitel 3.3.2) und das Salzgebirge im Laufe der Zeit auf die Bauwerke aufkriecht, braucht für den Zeitpunkt, zu dem Lösung an den Abdichtungen ansteht, nicht von bevorzugten Wegsamkeiten im Bereich der Kontaktzonen ausgegangen zu werden. Die Abdichtungsbauwerke werden zudem so errichtet, dass sie keine hydraulisch relevanten Risse enthalten. Sofern Mg-haltige Lösung an einer Abdichtung ansteht, werden die Mg-Ionen deshalb flächig in den Betonkörper eindringen, angetrieben von Advektion/Dispersion sowie Diffusion. Da dieses Eindringen aufgrund der geringen Permeabilität des Salzbetons nur langsam voranschreitet, werden Diffusionsprozesse kleinräumige Inhomogenitäten ausgleichen. Abschätzungen haben gezeigt, dass Dispersions- und Diffusionsprozesse das großräumige Vordringen der Mg-Ionen, d. h. das Vordringen im 10-m-Maßstab, nur im 10%-Bereich verstärken. Dies ist wenig im Vergleich mit der im Sicherheitsnachweis betrachteten Bandbreite der Permeabilität der Abdichtung, welche den advektiven Transportprozess bestimmt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die chemischen Umsetzungsraten der Prozesse, aus denen sich der Korrosionsprozess zusammensetzt, schnell sind gegenüber dem Nachschub von Mg-Ionen zur Korrosionsfront. Die Korrosionsfront wird deshalb nur eine geringe Ausdehnung aufweisen; eine Abschätzung dazu enthält [GRS 2009b].

Aufgrund der dargelegten Überlegungen und Sachverhalte wird die Korrosion der Abdichtungen aus Salzbeton in beiden Programmen, EMOS und PROSA, mit dem gleichen einfachen Modellansatz simuliert [Colenco 2009], [GRS 2009b]: Eine korrodierende Abdichtung setzt sich aus einem unkorrodierten und einem korrodierten Abschnitt zusammen, die durch eine flächige, quer durch die Abdichtung verlaufende Reaktionsfront mit geringer Ausdehnung längs der Abdichtung getrennt sind. Das Längenverhältnis der beiden Abschnitte bestimmt den aktuellen hydraulischen Widerstand der Abdichtung. An der Korrosionsfront geht der unkorrodierte Salzbeton nach mehrmaligem (zahlenmäßig vorgegebenem) Austausch der Porenlösung durch nachströmende Mg-haltige Lösung in korrodierten Salzbeton mit höherer Permeabilität über. Dadurch verschiebt sich die Korrosionsfront, und der hydraulische Widerstand der Abdichtung sinkt. Der Nachschub von Mg-haltiger Lösung zur Reaktionsfront erfolgt advektiv, abhängig vom aktuellen Widerstand der Abdichtung und vom Druckgefälle entlang der Abdichtung.

Der ELB WSF wird durch mehrere parallel geschaltete Abdichtungen aus Salzbeton von der Restgrube getrennt. In den Modellen für EMOS und für PROSA wird dieses Abdichtsystem durch eine Modellabdichtung mit gleichem hydraulischem Widerstand und der Länge der kürzesten realen Abdichtung abgebildet [Colenco 2009], [GRS 2009b]. Weisen mehrere parallel geschaltete Abdichtungen aus dem gleichen Baustoff die gleiche Permeabilität auf und sind sie der gleichen Lösung bei gleichem Druckgefälle ausgesetzt, dann korrodiert die kürzeste Abdichtung zuerst, unabhängig von ihrem Querschnitt. Das oben dargelegte einfache Modell für die Korrosion einer Abdichtung gilt damit auch für eine Modellabdichtung, die mehrere parallel geschaltete reale Abdichtungen darstellt.



Das Abdichtsystem des ELB OF setzt sich aus zwei parallel geschalteten Abdichtungen zusammen, wobei die eine aus Salzbeton und die andere aus Magnesiabeton besteht. Da diese beiden Baustoffe Lösungen gegenüber ein unterschiedliches Verhalten aufweisen, erfolgt die Modellierung der Korrosion für die beiden Abdichtungen in den Modellen EMOS und PROSA getrennt.

Die Korrosion von Salzbeton durch Mg-haltige Lösung wurde im Labor experimentell untersucht; parallel wurden dazu geochemische Modellrechnungen durchgeführt [GRS 2003], [GRS 2009a]. Aus den Ergebnissen wurde das Korrosionspotenzial von an Mg gesättigter Lösung (IP21-Lösung) und damit die kleinste Anzahl der für die Korrosion erforderlichen Porenwasseraustauschzyklen abgeleitet: Diese Anzahl ist etwa 3. Neben der Anfangspermeabilität der betrachteten Abdichtung sind diese Größe und der Mg-Gehalt der Lösung, die an der Abdichtung ansteht, die einzigen für die Langzeitsicherheit relevanten Parameter zur Beschreibung der Korrosion einer Abdichtung aus Salzbeton. Die Permeabilität von korrodiertem Salzbeton ist demgegenüber als Modellparameter von geringer Bedeutung, da die Experimente zeigen, dass sie um mehrere Größenordnungen über jener von unkorrodiertem Salzbeton liegt. Der hydraulische Widerstand einer teilkorrodierten Abdichtung hängt damit praktisch nur vom Längenanteil des unkorrodierten Abschnitts ab, und der hydraulische Widerstand einer vollständig korrodierten Abdichtung ist so gering, dass ihr genauer Wert den Ablauf der Prozesse nicht in sicherheitsrelevantem Maß beeinflusst.

In den deterministischen Modellrechnungen wird für den Referenzfall unterstellt, dass die an allen Abdichtungen anstehende Lösung einen Mg-Gehalt von 10 % des Mg-Gehalts von IP21-Lösung aufweist<sup>39</sup>, d. h. dass für die Korrosion des Salzbetons ungefähr ein 20-facher Austausch der Porenlösung erforderlich ist. In den probabilistischen Rechnungen wird zwischen IP21-Lösung (dreifacher Porenwasseraustausch) und NaCl-Lösung (stabiler Salzbeton) variiert. Die Auswirkungen von extremen Lösungszusammensetzungen (NaCl-Lösung, IP21-Lösung) bei den Abdichtungen werden zudem in zwei „what-if“-Szenarien untersucht (vgl. Kapitel 6.6.4).

Tabelle 6-1: Widerstandszeit einer Abdichtung von 26 m Länge gegen die korrosive Wirkung von Mg-haltiger Lösung bei verschiedenen Anfangspermeabilitäten und einem zeitlich konstanten Druckgefälle von 4,8 MPa.

Anfangspermeabilität der Abdichtung	Mg-Gehalt der Lösung bezogen auf IP21-Lösung	rein advektiver Transport der Mg-Ionen	advektiv/dispersiver und diffusiver Transport der Mg-Ionen
$10^{-18} \text{ m}^2$	10 %	19 200 a	17 100 a
	30 %	7000 a	6200 a
	100 %	2740 a	2410 a
$10^{-17} \text{ m}^2$	10 %	1920 a	1840 a
	100 %	270 a	260 a
$10^{-19} \text{ m}^2$	10 %	192 000 a	110 000 a
	100 %	27 400 a	15 300 a

Die kürzeste der Abdichtungen des ELB WSF weist eine Länge von 26 m auf. Bei einer Anfangspermeabilität von  $10^{-18} \text{ m}^2$  und einem gleich bleibend hohen Druckgefälle entlang der Abdichtung<sup>40</sup> von 4,8 MPa widersteht die Abdichtung bei rein advektivem Transport von Mg-Ionen während rund 19 000 Jahren der korrosiven Wirkung einer Lösung, die 10 % des Mg-Gehalts von IP21-Lösung aufweist. Diffusion und Dispersion verkürzen die Widerstandszeit bei dieser Anfangspermeabilität um rund 10 %. Bei ansteigendem Druck im Einlagerungsbereich verzögert sich die Korrosion. Bei einer anstehenden Lösung mit 30 % des Mg-Gehalts

<sup>39</sup> Wie im nachfolgenden Unterkapitel erläutert wird, korrodiert diese Lösung auch Magnesiabeton.

<sup>40</sup> entsprechend hydrostatischem Druck auf der 3. Sohle in der Restgrube und anhaltendem Atmosphärendruck im Einlagerungsbereich

von IP21-Lösung verkürzt sich die Widerstandszeit auf etwas mehr als ein Drittel, bei anstehender IP21-Lösung gar um etwa einen Faktor 7. Tabelle 6-1 zeigt die Widerstandszeiten einer 26 m langen Abdichtung bei einem Druckgefälle von 4,8 MPa unter verschiedenen Bedingungen. Bei fester Druckdifferenz zwischen Restgrube und Einlagerungsbereich erhöht sich die Widerstandszeit quadratisch mit der Länge der Abdichtung und ungefähr umgekehrt proportional mit der Anfangspermeabilität der Abdichtung. Bei einer sehr undurchlässigen Abdichtung steigt der Einfluss der Diffusion.

## **Korrosion des Abdichtungsbauwerks aus Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung**

Die Festigkeit von Magnesiabeton wird von der Sorelphase erzeugt. In Kontakt mit Mg-armer Lösung löst sich die Sorelphase um, wobei die Festphase Brucit ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , Magnesiumhydroxid) entsteht und  $\text{MgCl}_2$  in Lösung geht. Der Massenanteil der Sorelphase im Magnesiabeton beträgt etwa 20 %. Durch die Umlösung geht die Festigkeit des Magnesiabetons verloren und die verbleibende Festphase weist eine erhöhte Porosität und Permeabilität auf. Der Prozess wird deshalb als Korrosion bezeichnet. Bei der Korrosion von Magnesiabeton steigt der Mg-Gehalt in der Lösung an. Sobald dieser einen gewissen Schwellenwert übersteigt, kommt die Umlösung der Sorelphase und damit die Korrosion des Magnesiabetons zum Erliegen. Der Korrosionsprozess setzt wieder ein, sobald die Mg-Konzentration in Lösung durch advective und diffusive Transportprozesse weg von der Korrosionsfront dort wieder unter den Schwellenwert gesunken ist.

Geochemische Modellrechnungen mit einem international angewendeten Programm und einem anerkannten Datensatz ergeben, dass die Sorelphase – und damit der Magnesiabeton – in Kontakt mit Lösung chemisch stabil sind, sofern die Lösung einen Mg-Gehalt von 12,2 % des Mg-Gehalts von IP21-Lösung oder mehr aufweist [Voigt 2008], [Colenco 2009]. Die geochemischen Modellrechnungen ergeben weiter, dass für die vollständige Korrosion des in [Voigt 2008] definierten und für die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle vorgesehenen Magnesiabetons ein rund 40-facher Austausch des Porenwassers mit Lösung erforderlich ist, deren Mg-Gehalt 10 % des Gehalts von IP21-Lösung beträgt. Bei anstehender NaCl-Lösung, d.h. einer Lösung ohne Mg-Gehalt, sind immer noch rund acht Porenwasseraustauschzyklen für die vollständige Korrosion des Magnesiabetons erforderlich.

Mit der plausiblen Annahme, dass die Umlösung der Sorelphase im Vergleich mit dem advectiven und diffusiven Abtransport von Mg-Ionen von der Korrosionsfront im Abdichtungsbauwerk rasch verläuft, kann die Korrosion des Abdichtungsbauwerks des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton mit einem analogen Modellkonzept und – nach einer Uminterpretation von einzelnen Parametern – mit dem gleichen Rechenmodell wie die im vorangehenden Unterkapitel beschriebene Korrosion von Salzbeton durch Mg-haltige Lösung abgebildet werden. Dies trifft auch zu, falls das Abdichtungsbauwerk, welches im nicht kriechfähigen Hauptanhydrit verläuft, von einer Auflockerungszone mit erhöhter Permeabilität umgeben ist: Maßgebend für die Widerstandszeit der Abdichtung ist neben dem Mg-Gehalt in der anstehenden Lösung und dem wirksamen hydraulischen Gradienten nur die querschnittintegrierte Leitfähigkeit der Abdichtung, allerdings unter Einbezug der Auflockerungszone. Dies wird in [Colenco 2009] (Anhang L) mit einer speziellen Modellrechnung gezeigt. Diese Modellrechnung liefert auch Werte für die Widerstandszeit der 110 m langen Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle bei anhaltend niedrigem Fluidruck im ELB OF: Bei einer Lösung mit einem Mg-Gehalt von 10 % des Gehalts von IP21-Lösung beträgt die Widerstandszeit rechnerisch über 700 000 Jahre, sofern keine hydraulisch relevante Auflockerungszone existiert, und rund 100 000 Jahre bei einer Auflockerungszone, welche gut die siebenfache Leitfähigkeit des Abdichtungsbauwerks selbst aufweist. Sofern Mg-freie Lösung (NaCl-Lösung) in die Abdichtung eindringt, beträgt die Widerstandszeit ohne Auflockerungszone noch rund 140 000 Jahre und mit Auflockerungszone knapp 20 000 Jahre.

Die Widerstandszeit der Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton ist bei anstehender Lösung mit einem Mg-Gehalt von 10 % des Gehalts von IP21-Lösung und bei einer hydraulisch nicht relevanten Auflockerungszone vergleichbar mit jener der anderen Abdichtung des ELB OF, der 150 m langen Abdichtung auf der 2. Sohle aus Salzbeton. Bei der gleichen Lösungszusammensetzung und mit dem Referenzwert der Anfangspermeabilität beträgt letztere gut 600 000 Jahre.

## 6.5 MODELLRECHNUNGEN ZUR „TROCKENEN“ GRUBE

Die Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / trockene Grube“ wurde in Kapitel 4.5.1 definiert und begründet. Zielsetzung der Modellrechnungen zu dieser Szenariengruppe ist die Ermittlung des Druckanstiegs als Folge von Konvergenz und Gasbildung in den drei hydraulisch getrennten Grubenteilen ELB WSF, ELB OF und Restgrube. Aufgrund der anfänglich vollständigen Lösungssättigung der Abdichtungsbauwerke und ihrer Auflockerungszonen sowie deren Gaseindringdrücke sind die Abdichtungen unmittelbar nach Verschluss des Endlagers, wenn die Druckunterschiede noch klein sind, gasdicht. Wenn das Druckgefälle entlang einer Abdichtung deren Gaseindringdruck übersteigt, setzt ein Gasfluss entlang der Abdichtung und damit zwischen den durch die Abdichtung getrennten Grubenteilen ein. Dieser hängt von dem dann vorliegenden Strömungswiderstand der Abdichtung ab und kann sehr gering sein.

Die Modellrechnungen zur Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / trockene Grube“ wurden in analoger Weise wie für die Szenarien zum Schadstoffaustrag in Lösung (Kapitel 6.6) durchgeführt [GRS 2009b]. Sie setzen zum einen anhaltend gasdichte Abdichtungen voraus und berechnen unter dieser Annahme, d. h. ohne ausgleichende Gasflüsse, die Entwicklung der Gasdrücke in den drei Grubenteilen. Zum anderen wurden Modellrechnungen für unterschiedliche hydraulische Widerstände der Abdichtungen durchgeführt, um die Auswirkungen der ausgleichenden Gasflüsse auf die Druckentwicklungen zu untersuchen. In allen Modellrechnungen wurde eine vollständige Umsetzung der Gas bildenden Stoffe im Endlager mit den Referenzwerten der Umsetzungsraten und damit implizit das Vorliegen von ausreichend Wasser bei diesen Stoffen vorausgesetzt. Die Ergebnisse für dichte und für hoch gasdurchlässige Abdichtungen sind in Abbildung 6-8 dargestellt.

Bei gasdichten Abdichtungen steigen die Druckunterschiede zwischen den abgedichteten Einlagerungsbereichen einerseits und der Restgrube andererseits innerhalb von einigen 100 Jahren – vorwiegend als Folge der Gasbildung durch Metallkorrosion – auf Werte im Bereich von 1 MPa und damit über die wahrscheinlichen Gaseindringdrücke der Abdichtungen an. Das langfristige Ausbleiben von druckausgleichenden Gasflüssen zwischen den Grubenteilen ist deshalb wenig wahrscheinlich.

Setzt man dennoch anhaltend gasdichte Abdichtungen voraus, dann steigt der berechnete Gasdruck im ELB WSF nach rund 200 000 Jahren über den Gebirgsdruck auf der 1. Sohle von etwa 8,3 MPa. Im ELB OF bleibt der Gasdruck auch nach 1 Mio. Jahren um etwa 2 MPa unter dem lithostatischen Gebirgsdruck der dortigen obersten Sohle (2. Sohle) und in der Restgrube um etwa den gleichen Betrag unter dem Gebirgsdruck auf der 1. Sohle Bartensleben. Ohne Konvergenz, nur aufgrund der Gasbildung, würden die Gasdrücke in den beiden Einlagerungsbereichen auf deutlich niedrigere Werte ansteigen. Da im Modell bis zu diesem Zeitpunkt praktisch die vollständige Umsetzung aller Gas bildenden Stoffe im Endlager angenommen wird, ist der Druckanstieg zu sehr späten Zeiten praktisch ausschließlich von der Konvergenz verursacht.

Die treibende Kraft für die Konvergenz eines Grubenbaus ist der Gebirgsdruck in dessen Umgebung. Ein Druckanstieg im oberen Bereich eines abgedichteten Einlagerungsbereichs über den dortigen Gebirgsdruck wird durch die Konvergenz von Grubenbauen in größerer Teufe und den vertikalen Druckausgleich im Einlagerungsbereich über die Gasphase verursacht. Für die Modellrechnungen zur „trockenen“ Grube wurde deshalb als maßgebender Gebirgsdruck für die Konvergenz aller Grubenbaue im Einlagerungsbereich der relativ hohe und damit ungünstige lithostatische Gebirgsdruck auf der 4. Sohle (10,9 MPa) angesetzt.

Zu späten Zeiten ist ein Druckanstieg im ELB WSF über den lokalen lithostatischen Druck und die Bildung von neuen Gaswegsamkeiten ausgehend vom ELB WSF zur Druckentlastung somit nicht auszuschließen. In welcher Weise sich diese Wegsamkeiten bilden (beschränkt permeables Mikroriss-System oder hoch permeabler makroskopischer Frac, vgl. Kapitel 4.2.1), an welcher Stelle sich Wegsamkeiten bilden und wohin sie dann führen, kann nicht prognostiziert werden. Angesichts der relativ mächtigen Steinsalz-Barriere zwischen dem ELB WSF und dem Hutgestein/Deckgebirge erscheint die Bildung einer Wegsamkeit zur Restgrube wahrscheinlicher.

Aufgrund des geringeren Druckanstiegs kann die druckinduzierte Bildung von neuen Wegsamkeiten durch das Salinar in das Hutgestein/Deckgebirge ausgehend vom ELB OF oder von der Restgrube für den Betrachtungszeitraum von 1 Mio. Jahren mit hoher Zuverlässigkeit ausgeschlossen werden.



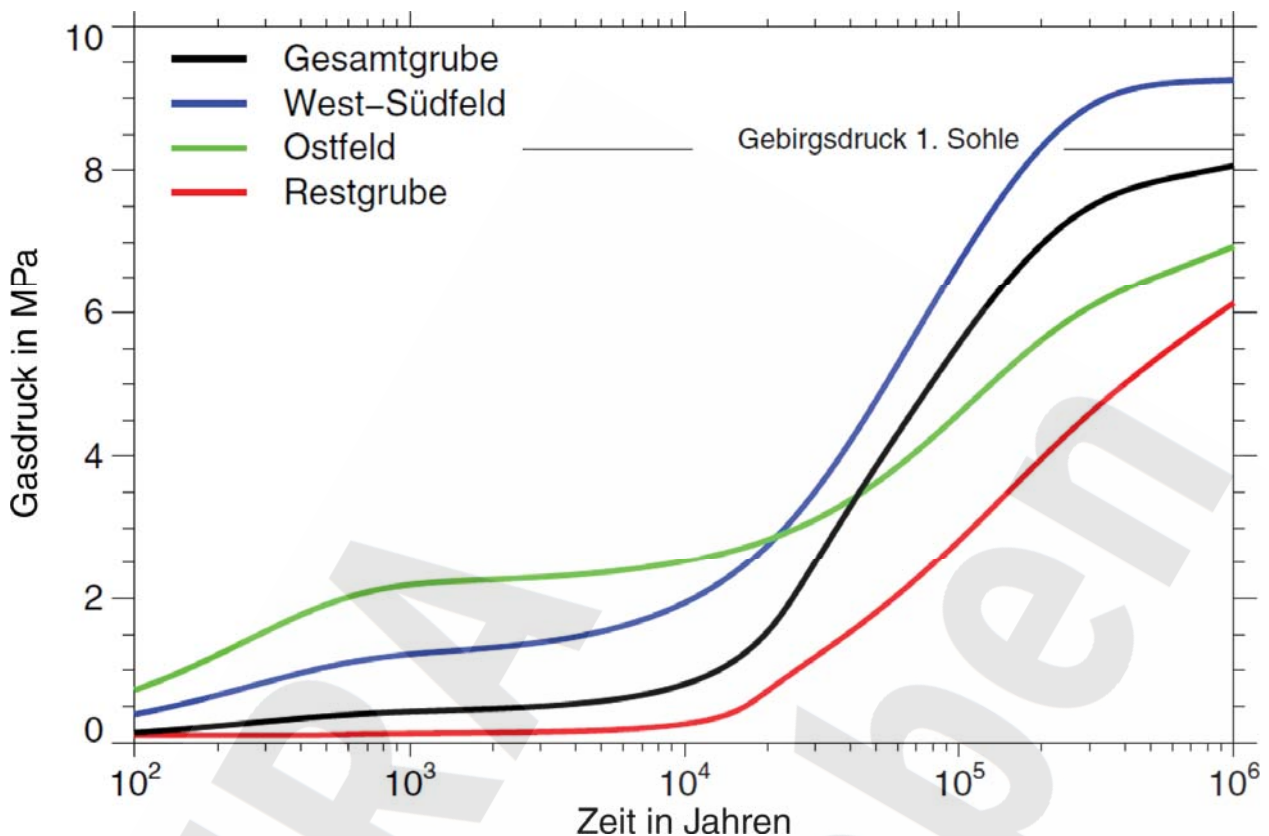


Abbildung 6-8: Druckanstieg im Endlager bei der Entwicklung „trockene Grube“ für absolut gasdichte Abdichtungen (West-Südfeld, Ostfeld, Restgrube) und für hoch gasdurchlässige Abdichtungen (Gesamtgrube).

Sofern die Abdichtungen in einem Maße gasdurchlässig sind, dass sich die Gasdrücke zwischen den drei Grubenteilen ausgleichen, steigt der Gasdruck in der Gesamtgrube gemäß Modellrechnung nach mehr als 100 000 Jahren in die Nähe des Gebirgsdrucks auf der 1. Sohle der Grube Bartensleben, ohne diesen allerdings ganz zu erreichen. Die Variation der wirksamen Permeabilität der Abdichtungen, d. h. der querschnittgemittelten Permeabilität einschließlich jener der eventuell noch vorhandenen Auflockerungszonen um die Abdichtungsbauwerke, ergibt, dass bei Einsetzen eines Gasflusses zwischen den drei Grubenteilen ein Druckausgleich nach über 100 000 Jahren erfolgt, wenn die wirksame Permeabilität der Abdichtungen  $10^{-18} \text{ m}^2$  oder mehr beträgt. Zwischen dem ELB WSF und der Restgrube reicht sogar ein Gasfluss entlang Abdichtungen mit der Permeabilität von  $10^{-20} \text{ m}^2$ , damit der Gasdruck im Einlagerungsbereich rechnerisch nicht über den Gebirgsdruck auf der 1. Sohle ansteigt.

Mit dem Programm PROSA [Colenco 2009] wurden keine speziellen Modellrechnungen für die Entwicklung „trockene Grube“ durchgeführt. Informationen zur Wahrscheinlichkeit der druckinduzierten Bildung von neuen Wegsamkeiten ausgehend von den beiden abgedichteten Einlagerungsbereichen WSF und OF können jedoch aus den probabilistischen Rechnungen für den Referenzfall (Entwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“, vgl. Kapitel 6.6.3) abgeleitet werden. Nach diesen Modellrechnungen wird der lithostatische Gebirgsdruck auf den obersten Sohlen der beiden abgedichteten Einlagerungsbereiche selten erreicht<sup>41</sup> und damit die Voraussetzung für die Bildung einer neuen Wegsamkeit aus dem Einlagerungsbereich selten erfüllt. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit wird bei einem Anstieg des Fluiddrucks über den lokalen lithostatischen Druck eine Frac-Bildung vom abgedichteten Einlagerungsbereich zur Restgrube (Zentralteil der Grube Bartensleben) unterstellt.

<sup>41</sup> im ELB WSF in rund 2 % der Rechenfälle, im ELB OF in rund 1 % der Rechenfälle



Aus den Modellrechnungen kann geschlossen werden, dass ein Anstieg des Gasdrucks im Endlager auf den lithostatischen Gebirgsdruck bei der Entwicklung „trockene Grube“ wenig wahrscheinlich ist und frühestens nach mehr als 100 000 Jahren eintreten kann. Die Zuverlässigkeit dieser Aussage hängt praktisch ausschließlich von der Güte der Modellierung des Prozesses „Konvergenz der Grubenbaue“ für späte Zeiten ab. Sofern der Gasdruck den Gebirgsdruck überschreitet, werden sich neue Wegsamkeiten bilden, über die der Überdruck durch Entweichen von Gas abgebaut wird. Obwohl bei einem langsamen Druckanstieg die Bildung eines Mikroriss-Systems wahrscheinlich ist, kann nach dem heutigen Stand des Wissens die Bildung eines makroskopischen Fracs nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Sofern sich ein Frac zwischen Grubengebäude und Hutgestein bildet, kann nach der Druckentlastung Lösung entlang des Fracs aus dem Hutgestein in das Endlager zutreten. Da speziell bei trockener Grube die Konvergenz auf den tiefen Sohlen, wo die Abfälle eingelagert sind, wegen des dort größeren Gebirgsdrucks schneller fortschreitet als auf den oberen Sohlen, dringt selbst bei der Bildung eines Fracs Lösung nicht mit Sicherheit bis zu den Abfällen vor, und ein Vordringen von Lösung ist mindestens hydraulisch behindert. Überdies sind zu diesem späten Zeitpunkt die Prozesse, welche einen Transport von mobilisierten Radionukliden aus der Grube in das Hutgestein bewirken, stark abgeklungen. In Kapitel 6.7 wird dargelegt, dass bei der Systementwicklung „trockene Grube“ auch keine signifikante Freisetzung von volatilen Radionukliden auf dem Gaspfad zu besorgen ist. Insgesamt stellt die Entwicklung „trockene Grube“ somit keine Systementwicklung dar, welche zu einer sicherheitlich bedeutsamen Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager führen kann.

## **6.6 MODELLRECHNUNGEN ZU DEN SZENARIEN „RADIONUKLIDAUSTRAG IN LÖSUNG“**

### **6.6.1 Modellierungskonzepte und Rechenprogramme**

Das verfüllte und verschlossene Endlager stellt bei den Entwicklungen der Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in Lösung“ in der Phase nach Verschluss des Endlagers ein System dar, das in Bezug auf die einzelnen ablaufenden Prozesse komplex und mit Ungewissheiten behaftet ist. Zu nennen sind insbesondere Zeitpunkt, Rate und Ort des Lösungszutritts in die übrige Grube, die Wegsamkeiten der zutretenden Lösung durch das weitgehend verfüllte Grubengebäude, die Reihenfolge des Volllaufens der verschiedenen Grubenteile in der Restgrube, die chemische Zusammensetzung der Lösung beim Kontakt mit Abdichtungen und mit Abfällen, die Gasbildung und die Transportpfade von Gas im Grubengebäude, die Transportpfade von gelösten Radionukliden von den Abfällen zur Übertrittsstelle in das Hutgestein und die Transportpfade durch Hutgestein und Deckgebirge (vgl. Kapitel 4). Der Nachweis der Langzeitsicherheit und insbesondere die Modellrechnungen zum Radionuklidtransport erfordern deshalb Vereinfachungen und Abstraktionen. Diese müssen allerdings derart vorgenommen werden, dass die potenziellen Auswirkungen des Endlagers nicht unterschätzt werden. Ausführungen dazu enthält Kapitel 3.4.1.

Die Vereinfachungen und Abstraktionen betreffen zum einen die Modellierung der Prozesse und zum anderen die räumliche Darstellung des Systems. Die Modellierung der wichtigsten Prozesse in den Modellrechnungen zum Radionuklidtransport mit EMOS und PROSA ist in den vorangehenden Kapiteln 6.2, 6.3 und 6.4 beschrieben. Eine vollständige Aufzählung der berücksichtigten Prozesse findet sich in Kapitel 6.6.2. Weitere Angaben zur Modellierung der Prozesse enthalten [Colenco 2009] und [GRS 2009b]. Nachfolgend wird das Modellierungskonzept in Bezug auf die räumliche Darstellung des Systems „Endlager Morsleben“ dargelegt.

Die räumliche Darstellung des Endlagersystems in den beiden Modellen für EMOS und PROSA ist sehr ähnlich, unterscheidet sich aber im Detail. Beide Modelle sind Kompartimentmodelle. Im Grubengebäude beschreibt ein Kompartiment jeweils einen Teil des Grubengebäudes, d. h. mehrere Grubenbaue, die hydraulisch gut verbunden oder mindestens nicht in spezifizierter Weise – durch Abdichtungen – voneinander getrennt sind und in denen schnell ablaufende Mischungsvorgänge stattfinden können. In den Modellen

weisen diese Kompartimente homogene Schadstoffverteilungen auf. Sie sind durch ein Konturvolumen (wesentlich für die Berechnung der Konvergenz), ein fluidzugängliches Volumen und die Art ihres Versatzes charakterisiert<sup>42</sup>.

Die Kompartimente, welche Teile des Grubengebäudes beschreiben, sind untereinander durch Modell-Wegsamkeiten verbunden, welche Strecken (mit und ohne Abdichtungen), andere Auffahrungen, Wegsamkeiten durch Auflockerungszonen oder durch Hauptanhydritschollen oder Systeme von solchen Wegsamkeiten darstellen. Modell-Wegsamkeiten weisen einen hydraulischen Widerstand, eine Länge, einen Querschnitt und eine transportwirksame Porosität auf; sie vermögen den Radionuklidtransport zu verzögern.

Die Zusammenfassung von Grubenbereichen zu Kompartimenten darf im Modell jedoch nicht zur Simulation von Mischungsvorgängen führen, die möglicherweise in der Realität nicht stattfinden, d. h. die nicht begründet angenommen werden dürfen. Unter konservativen Gesichtspunkten wurde deshalb die übrige Grube (d. h. das Grubengebäude ohne die Einlagerungsbereiche) in Mischungsbereiche und die sonstige Restgrube unterteilt. Ein Mischungsbereich setzt sich aus einer geringen Zahl von Grubenbauen unterhalb der Übertrittsstelle in die unterstellte Wegsamkeit durch das Salinar in das Hutgestein zusammen, durch die ein Radionuklidtransport aus einem Einlagerungsbereich in das Hutgestein begründet angenommen werden kann (vgl. Kapitel 4.5.2). Im Modell wird ein Radionuklidtransport in die „sonstige Restgrube“ konservativ ausgeschlossen<sup>43</sup>, die aus der „sonstigen Restgrube“ verdrängte Lösung fließt jedoch durch den Mischungsbereich in das Hutgestein. Dabei vermischt sie sich mit der kontaminierten Lösung aus den Einlagerungsbereichen und trägt – nach Übertritt in das Hutgestein – zum Radionuklidtransport vom Salzspiegel in das oberflächennahe Grundwasser bei<sup>44</sup>.

Die Struktur der räumlichen Darstellung des Endlagersystems (Strukturmodell) in den Modellrechnungen mit EMOS zeigt Abbildung 6-9. In diesem Modell wird alternativ entweder eine Übertrittsstelle von der obersten Sohle des Zentralteils in der Grube Bartensleben (mit zugehörigem Mischungsbereich) oder eine Übertrittsstelle von der Grube Marie in das Hutgestein (mit zugehörigem Mischungsbereich) angenommen. Außer den mit Abdichtungen versehenen Wegsamkeiten wird keiner Wegsamkeit im Grubengebäude ein signifikanter hydraulischer Widerstand zugewiesen<sup>45</sup>. Die Parameter sind für alle Wegsamkeiten im Grubengebäude (einschließlich jener mit Abdichtungen) so gewählt, dass auch keine nennenswerte advective Transportverzögerung auftritt. Die einzigen Wegsamkeiten mit transportverzögernder Wirkung sind die Wegsamkeit von der Radium-VBA durch den Salzversatz des Streckenstummels bis in durchströmbare Grubenbaue des ELB OF (diffusiver Transport) und die Wegsamkeiten durch Hutgestein und Deckgebirge (advektiv/dispersiver Transport). Jeder der Einlagerungsbereiche setzt sich – sofern die Grube in der Realität entsprechende Grubenbaue aufweist – aus sieben Kompartimenten zusammen, dem Kompartiment des Abfallbereichs sowie jeweils einem unversetzten und einem mit Salzgrusversatz verfüllten Kompartiment unterhalb des Abfallbereichs, auf dem Niveau des Abfallbereichs und darüber. Der ELB WSF ist zudem in das Westfeld und das Südfeld unterteilt, die Wegsamkeit zwischen den beiden Feldern repräsentiert das gut durchlässige Großbohrloch, welches im Südfeld auf der 1. Sohle anschließt (vgl. Kapitel 3.3.2). Dadurch gelangt im EMOS-Modell – entsprechend den realen Verhältnissen – Lösung nur in das Westfeld, wenn das Südfeld weitgehend voll gelaufen ist. In Abbildung 6-9 nicht dargestellt ist die Unterteilung des ELB OF in den Strecken-

---

<sup>42</sup> Die Kompartimente des Modells, welche die Teile des Systems „Endlager Morsleben“ im Hutgestein und Deckgebirge beschreiben, haben andere Eigenschaften.

<sup>43</sup> Der Ausschluss eines Radionuklidtransports in die sonstige Restgrube erfolgt im Programm PROSA systematisch, im Modell EMOS aufgrund der Verhältnisse in den meisten Fällen weitgehend.

<sup>44</sup> Wie in Kapitel 6.2 dargelegt wurde, bestimmt die Auspressrate von Lösung aus der Grube die Transportgeschwindigkeit der in der Lösung enthaltenen Radionuklide durch Hutgestein und Deckgebirge. Wenn ein Teil der aus der sonstigen Restgrube ausgepressten, nicht radionuklidhaltigen Lösung über eine zweite, räumlich getrennte Übertrittsstelle in das Hutgestein austreten würde, wäre die Radionuklidkonzentration im Hutgestein zwar höher, die Transportgeschwindigkeit im Hutgestein und Deckgebirge jedoch geringer als wenn die Lösung aus der gesamten Grube über eine einzige Übertrittsstelle in das Hutgestein austritt. Da die Gesamtverdünnung von den Abfällen bis in die Biosphäre letztlich vom oberflächennahen Grundwasserfluss bestimmt wird, ist die Annahme einer einzigen Übertrittsstelle konservativ.

<sup>45</sup> Die Permeabilität der Verbindungsstrecke zwischen den Gruben Marie und Bartensleben beträgt im Modell  $10^{-14} \text{ m}^2$ .

stummel mit Sohlenbohrloch, in dem die Radium-VBA eingelagert ist, und den übrigen Einlagerungsbereich OF (vgl. Kapitel 2.3.2). Diese Unterteilung wurde vorgenommen, da die Mobilisierung des  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA und der  $^{226}\text{Ra}$ -Transport aus dem Sohlenbohrloch durch den Versatz des Streckenstummels in den übrigen Einlagerungsbereich anders simuliert wird als die Mobilisierung der Radionuklide aus den anderen Abfällen im ELB OF (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.4).

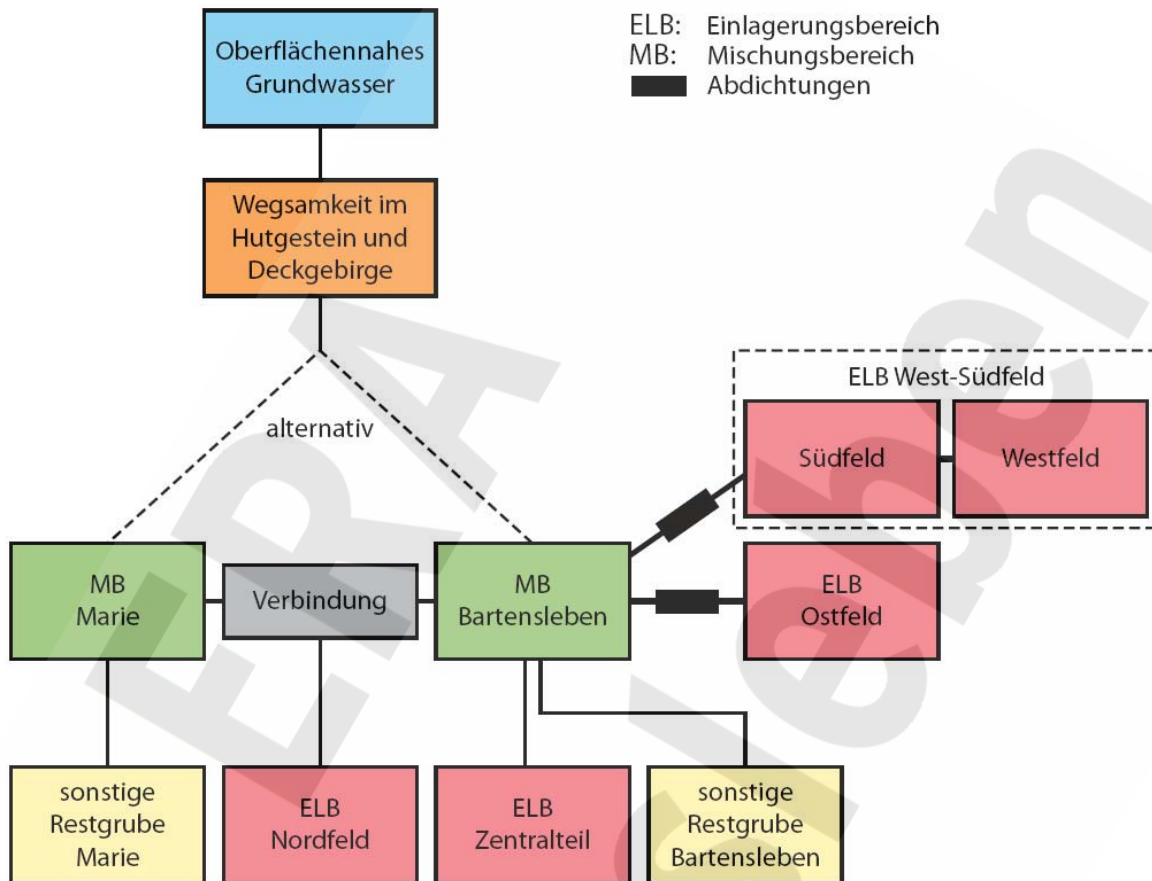


Abbildung 6-9: Räumliche Darstellung des Endlagersystems in den Modellrechnungen mit EMOS (Strukturmodell).

EMOS ist ein Programmpaket, es setzt sich aus mehreren Modulen zusammen. Für die Modellrechnungen zum ERAM kamen neben einer speziell erweiterten Version des Moduls LOPOS die Module CHETLIN und EXCON zum Einsatz.

Das Modul LOPOS ist ein Kompartiment-Programm, das die Prozesse im Grubengebäude simuliert. Die Kompartimente sind – im Gegensatz zur Umsetzung in PROSA, siehe unten – im Raum positioniert, d. h. sie besitzen in den drei Raumrichtungen eine Ausdehnung, und ihre Lage ist durch die Koordinate des Mittelpunktes bestimmt. Die Kompartimente sind durch Wegsamkeiten verbunden, entlang derer Lösungs- bewegung sowie advektiv/dispersiver und diffusiver Radionuklidtransport eindimensional modelliert wird. Die Gasspeicherung und -bewegung im Grubengebäude wird durch Bilanzierung der Gasvolumen simuliert, wobei folgende Effekte berücksichtigt werden: Gaskompression durch den Fluiddruck in den Kompartimenten, verfügbare Gasspeichervolumen und Kriterien für den Austritt von Gas aus einem Kompartiment in Abhängigkeit vom Gaseindringdruck der maßgebenden Wegsamkeit.

Das Modul CHETLIN simuliert die Ausbreitung von Radionukliden und Radionuklid-Zerfallsreihen entlang eines eindimensionalen Transportpfades (hier der Transportpfad durch Hutgestein und Deckgebirge) unter Berücksichtigung von Advektion, Dispersion, Diffusion, Sorption (nach dem  $K_d$ -Konzept) und radioaktivem Zerfall.



Mit dem Modul EXCON wird die Strahlenexposition (jährliche effektive Individualdosis) ermittelt, die als Folge von Radionuklidgehalten im oberflächennahen genutzten Grundwasser über die verschiedenen möglichen Expositionspfade auftritt. Für das System „Endlager Morsleben“ erfolgt die Berechnung in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV [GSF 2002].

Ergänzende Angaben zum Programmpaket EMOS enthalten [GRS 1996a], [GRS 1996b] und [GRS 1999].

Das Programm PROSA ist – wie bereits in der Einleitung zu Kapitel 6 erwähnt – ein semi-analytisches Kompartiment-Programm<sup>38</sup>. Die Modellstrategie des semi-analytischen Ansatzes erfordert Vereinfachungen bei der Modellierung von einzelnen Prozessen, die fast durchweg in konservativer Weise erfolgten. Hervorstechendes Beispiel ist die konservative Vereinfachung, die hydraulische Trennung von Westfeld und Südfeld innerhalb des ELB WSF auf der 3. und 4. Sohle nicht abzubilden. Damit führt in den Modellrechnungen mit PROSA jeder Lösungszutritt in den ELB WSF auch sogleich zu einem Lösungszutritt zu den Abfällen im Westfeld. Nicht konservative Vereinfachungen sind die Vernachlässigung des diffusiven Schadstofftransports im Grubengebäude und des Einflusses der Dispersion auf den Schadstofftransport durch Hutgestein und Deckgebirge. Die Zulässigkeit dieser Vereinfachungen wurde mit Hilfe detaillierterer Modellrechnungen überprüft.

Das Programm PROSA und das zugehörige Modell des Systems „Endlager Morsleben“ sind mit einem höheren Grad an Abstraktion in Bezug auf die Darstellung des Endlagersystems verbunden als das EMOS-Modell. Wie dieses setzt sich auch das PROSA-Modell aus Kompartimenten und verbindenden Wegsamkeiten zusammen. Im Gegensatz zum EMOS-Modell stehen die Kompartimente im PROSA-Modell jedoch nicht in räumlichem, sondern nur in topologischem Bezug zueinander: Die Kompartimente sind nicht durch einen Ort und eine Ausdehnung, sondern durch ihre Volumen und gegenseitigen hydraulischen Verbindungen charakterisiert. Jedem Einlagerungsbereich ist ein eigener Mischungsbereich zugewiesen. Dabei ist offen gelassen, ob zwei Mischungsbereiche den gleichen Grubenbereich oder verschiedene Bereiche der Grube abbilden. Die aus der sonstigen Restgrube ausgepresste Lösung fließt im Modell in vollem Umfang durch jeden der vier Mischungsbereiche zur Übertrittsstelle in das Hutgestein und trägt dabei zum Radionuklidtransport aus dem Mischungsbereich bei. An der Übertrittsstelle in das Hutgestein, d. h. vor dem Transport durch Hutgestein und Deckgebirge, werden im Modell die Radionuklidflüsse aus den vier Einlagerungsbereichen zusammengezählt. Der Lösungsfluss, der den Transport durch Hutgestein und Deckgebirge bestimmt (vgl. Kapitel 6.2), setzt sich aus dem Lösungsfluss zusammen, der aus der übrigen Grube (Gesamtgrube abzüglich Einlagerungsbereiche) und den vier Einlagerungsbereichen ausgepresst wird. Er entspricht nicht der Summe der Lösungsflüsse durch die vier Mischungsbereiche. Die Übertrittsstelle in das Hutgestein ist örtlich nicht spezifiziert, der Transport zur Übertrittsstelle erfolgt sowohl vom ELB ZT als auch vom ELB NF entlang kurzer Wege. Dies illustriert am deutlichsten die Abstraktion im PROSA-Modell. Die Struktur des Kompartimentmodells, mit dem das Endlagersystem mit dem Programm PROSA simuliert wird, zeigt Abbildung 6-10.

Der ELB WSF ist im PROSA-Modell – wie oben bereits erwähnt und im Unterschied zum EMOS-Modell – nicht in das Südfeld und das Westfeld unterteilt. Jeder Lösungszutritt in den ELB WSF gelangt im Modell auch in Kontakt mit den Abfällen des Westfeldes. Ebenfalls im Unterschied zum EMOS-Modell ist auch der ELB OF nicht in den Streckenstummel mit Sohlenbohrloch, in dem die Radium-VBA eingelagert ist, und den übrigen Einlagerungsbereich OF unterteilt. Mit einer speziellen Untersuchung wird gezeigt, dass aufgrund der starken und belastbaren Rückhalteprozesse im Salzbetonversatz des Streckenstummels der Übertritt von <sup>226</sup>Ra aus der Radium-VBA in durchströmbare Grubenbaue des ELB OF äußerst gering und wesentlich kleiner als das in Abbau 2 des Ostfeldes eingelagerte und sich dort durch radioaktiven Zerfall bildende <sup>226</sup>Ra-Inventar ist ([Colenco 2009], Anhang R). Aufgrund dieses Untersuchungsergebnisses wird der Endlagerteil „Streckenstummel, Sohlenbohrloch, Radium-VBA“ im PROSA-Modell nicht abgebildet, als <sup>226</sup>Ra-Inventar des ELB OF wird das Inventar in Abbau 2 angesetzt.

Die beiden abgedichteten Einlagerungsbereiche WSF und OF setzen sich jeweils aus dem Kompartiment „Einlagerungsgrubenbaue“ und dem Kompartiment „restlicher Einlagerungsbereich“ zusammen. Die beiden nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche bestehen jeweils aus lediglich einem Kompartiment. Jedes Kompartiment ist in Bezug auf sein Konvergenzverhalten in ein unverfülltes Volumen, ein kompaktierbar verfülltes Volumen und ein „nicht oder gering kompaktierbares Volumen“ unterteilt. Das letztere entspricht dem mit



Salzbeton verfüllten Volumen, dessen Porenraum durch Konvergenz nur langsam, quantifiziert mit einem Exponentialgesetz, abnimmt (vgl. Kapitel 6.4.1). Es wird allerdings angenommen, dass nur 1 % der Porenlösung des Salzbetons (als Referenzwert) an der Mobilisierung von Radionukliden aus dem Abfall teilnimmt und der Rest immobil im Porenraum des Salzbetons verbleibt. Der eingelagerte Abfall ist Teil des kompaktierbaren Volumens der Einlagerungsgrubenbaue.

Die Teufenlagen aller Grubenbereiche (Kompartimente und deren Teilvolumen) sind im PROSA-Modell gleich. Die Lösungs-, Gas- und Gebirgsdrücke werden für alle Grubenbereiche in Bezug auf eine einheitliche Referenzteufe ermittelt. Lediglich bei der Überprüfung, ob durch den Anstieg des Fluidrucks über den Gebirgsdruck eine neue Wegsamkeit gebildet werden kann (vgl. Kapitel 4.2.1 und 4.2.2), wird der Fluiddruck mit dem Gebirgsdruck in der Firste des abgedichteten Einlagerungsbereichs verglichen. Übersteigt der Fluiddruck den Gebirgsdruck in der Firste, wird eine Frac-Bildung unterstellt.

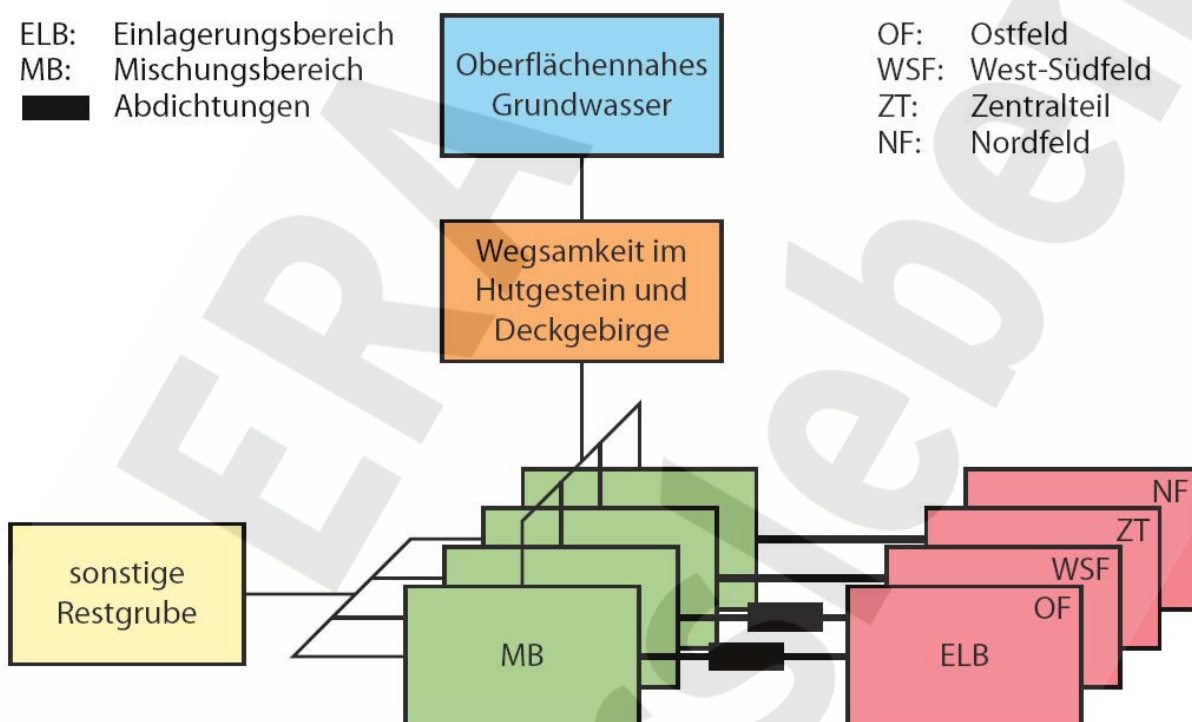


Abbildung 6-10: Topologische Darstellung des Endlagersystems in den Modellrechnungen mit PROSA (Strukturmodell).

In Bezug auf den Einfluss, den Gasbildung und –speicherung in Grubenbauen auf den Lösungszutritt in die Einlagerungsbereiche und auf das Auspressen von Lösung aus den Einlagerungsbereichen und aus der Grube ausüben können, werden in PROSA drei alternative Fälle<sup>46</sup> betrachtet:

- oo Fall „ohne Gaspolster“: Das Gas hat keinen Einfluss auf die Lösungsbewegung (z. B. weil es bereits während der Zutrittsphase mit geringem Widerstand und damit Druckaufbau aus dem Einlagerungsbereich entweicht).

<sup>46</sup> Gemäß der in der Einleitung zum Kapitel 3.4 definierten Begriffsverwendung handelt es sich dabei um drei alternative, wenn auch „verwandte“ Szenarien, da qualitativ unterschiedliche Wirkungsweisen der Wegsamkeiten zwischen den Einlagerungsbereichen und der übrigen Grube in Bezug auf den Gasfluss unterstellt werden. In Übereinstimmung mit der Begriffsverwendung in [Colenco 2009] und um die enge Verwandtschaft zwischen den sich ergebenden, zusammengehörenden Varianten der drei alternativen Szenarien auszudrücken, wird auch hier der Begriff „Fall“ verwendet.

- mo Fall „mit Gaspolster, ohne Gasfluss“: Das Gas nimmt fluidzugängliches Volumen im Einlagerungsbereich in Anspruch und trägt dadurch zum Druckanstieg bei, kann aber zu keiner Zeit aus dem Einlagerungsbereich entweichen. Die Druckentlastung im Einlagerungsbereich erfolgt ausschließlich durch Auspressen von (kontaminierter) Lösung.
- mm Fall „mit Gaspolster, mit Gasfluss“: Das Gas nimmt fluidzugängliches Volumen im Einlagerungsbereich in Anspruch und trägt dadurch zum Druckanstieg bei. Im Gegensatz zum Fall „mo“ entweicht es jedoch aus dem Einlagerungsbereich, sobald der Gasdruck ausreichend angestiegen ist. Die Druckentlastung im Einlagerungsbereich erfolgt durch gleichzeitiges Auspressen von Gas und (kontaminierter) Lösung, das Verhältnis der beiden Flüsse wird durch einen speziellen Modellparameter gesteuert.

Während der Phase des Lösungszutritts in die Einlagerungsbereiche sind die beiden Fälle „mo“ und „mm“ gleich, sie unterscheiden sich erst ab Beginn der Lösungsauspressung. Die Fälle „oo“ und „mo“ stellen zwei entgegengesetzte extreme Situationen dar: Im Fall „oo“ besteht zwischen der Firste des Einlagerungsbereichs und der übrigen Grube eine Wegsamkeit mit relativ hoher Gasdurchlässigkeit und geringem Gaseindringdruck; im Fall „mo“ führt von oberen Sohlen des Einlagerungsbereichs keine hydraulisch wirksame Wegsamkeit in die übrige Grube oder sie weist einen extrem hohen Gaseindringdruck auf. Der Fall „mm“ ist ein mittlerer Fall. Gemeinsam decken die drei Fälle alle Möglichkeiten des Einflusses der Gasbildung und -speicherung auf die Lösungsbewegung ab. Die Plausibilität der drei Fälle ist in Bezug auf die vier Einlagerungsbereiche differenziert einzustufen:

- Der Fall „mo“ ist der plausibelste Fall für den ELB WSF.
- Der Fall „mm“ ist der plausibelste Fall für den ELB OF.
- Für die Beschreibung der Verhältnisse in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen NF und ZT werden alle drei Fälle als vergleichbar plausibel eingestuft.

Das Programm PROSA ist in [Colenco 2009] (Anhänge A und B) beschrieben.

In beiden Modellen, im EMOS-Modell und im PROSA-Modell, wird das Endlagersystem mit einer Vielzahl an Parametern beschrieben. Diese lassen sich in die modellunabhängigen und die modellabhängigen Parameter unterteilen, wobei die letzteren aus den ersteren hervorgehen. Die Zahl der Parameter im PROSA-Modell für die potenzielle Radionuklidfreisetzung in Lösung beträgt rund 200, zuzüglich 13 Parameter pro Radionuklid bzw. Element. Die Parameterzahl im EMOS-Modell ist ähnlich hoch.

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit in Bezug auf die potenzielle Freisetzung von Radionukliden in Lösung wurden mit beiden Programmen sowohl deterministische als auch probabilistische Modellrechnungen durchgeführt. Deterministische Modellrechnungen sind solche mit fest vorgegebenen Werten aller Parameter. Sie dienen dazu, die potenziellen Auswirkungen des Endlagers für das Referenzszenario und für die in Kapitel 4.5.2 aufgeführten alternativen Szenarien gezielt für die jeweiligen Referenzwerte der Parameter zu ermitteln. Mit deterministischen Modellrechnungen wurden zudem einzelne Parameter variiert und deren Einfluss untersucht (lokale Sensitivitätsanalysen).

Die probabilistischen Modellrechnungen dienen dazu, die Auswirkungen der Parameterungewissheiten zu quantifizieren und solche Verhältnisse des Endlagersystems einzubeziehen, die in mehrfacher Hinsicht vom Referenzfall (= Referenzszenario mit Referenzwerten der Parameter) abweichen. Sie setzen sich aus einer größeren Zahl von deterministischen Modellrechnungen (Realisierungen) zusammen, bei denen die Werte der Parameter innerhalb der Bandbreiten und gemäß den Verteilungsfunktionen der einzelnen Parameter statistisch zufällig (probabilistisch) gewählt wurden. Mit dem Programm PROSA wurden für die drei oben aufgeführten Fälle in Bezug auf die Wirkung von Gasbildung und -speicherung („oo“, „mo“ und „mm“) jeweils 2000 Realisierungen durchgeführt. Die probabilistischen Modellrechnungen mit EMOS umfassen 2000 Realisierungen, wobei die mögliche unterschiedliche Wirkung von Gasbildung und -speicherung durch statistisch variierte Parameter bestimmt wird.

Die Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen, z. B. für die Maxima der potenziellen jährlichen Strahlenexposition und für den Zeitpunkt dieser Maxima. Da diese Modell-

rechnungen auf einem festen, grundlegenden Szenario beruhen, dessen Eintreten unterstellt und zu dessen Eintrittswahrscheinlichkeit keine Aussage gemacht wird, und da dieses Szenario, das konzeptuelle Modell und dessen numerische Umsetzung zudem verschiedene ungünstige Vereinfachungen und Näherungen enthalten, ist das Vorgehen nicht eine probabilistische Sicherheitsanalyse im strengen Sinne. Die Ergebnisse sind vielmehr bedingte Wahrscheinlichkeiten für die Strahlenexposition (d. h. Wahrscheinlichkeiten unter gewissen gegebenen Voraussetzungen), welche die tatsächliche Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maximaldosis für das betrachtete Szenario<sup>47</sup> überschätzen. Sie stellen eine sehr wertvolle Ergänzung der deterministischen Modellrechnungen für die Bewertung der Langzeitsicherheit dar.

Darüber hinaus erlauben die probabilistischen Modellrechnungen, jene Parameter zu ermitteln, die einen relevanten Einfluss auf die Strahlenexposition aufweisen, ohne dass eine Einschränkung auf die Variation einzelner Parameter erforderlich ist oder unrealistisch konservative Parameterkombinationen die Schlussfolgerungen verfälschen (globale Sensitivitätsanalysen).

Die Modellrechnungen beruhen auf einem Datensatz, der für jeden Parameter einen Referenzwert, eine Bandbreite und die Form der Verteilungsfunktion enthält. Die Referenzwerte sind in einem realistischen Bereich gewählte Werte, mit welchen die potenzielle Strahlenexposition in der Tendenz überschätzt wird, ohne jedoch wenig wahrscheinliche Verhältnisse abzudecken. Die Bandbreite bezeichnet den Wertebereich, in dem der entsprechende Parameter mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt. Die Form der Verteilungsfunktion wurde für jeden Parameter aufgrund der verfügbaren Informationen und insbesondere der bestehenden Ungewissheiten aus einem vorgegebenen Satz von Verteilungsfunktionen (Normalverteilung, log-Normalverteilung, uniforme Verteilung, etc.) durch Expertenschätzung festgelegt. Die in den Modellrechnungen mit PROSA und EMOS verwendeten Datensätze beruhen auf dem gleichen Basisdatensatz für die modellunabhängigen Parameter und sind in den jeweiligen Berichten [Colenco 2009] und [GRS 2009b] aufgeführt und begründet. Eine Zusammenstellung des Basisdatensatzes für die modellunabhängigen Parameter, die Begründungen und die entsprechenden Literaturverweise enthält zudem [Zerna 2009].

## 6.6.2 Berücksichtigte Prozesse

Die bei den Modellrechnungen zur potenziellen Radionuklidfreisetzung aus den Einlagerungsgrubenbauten in Lösung mit PROSA und EMOS berücksichtigten Prozesse sind nachfolgend stichwortartig aufgeführt. Ausführliche Darstellungen enthalten [Colenco 2009] und [GRS 2009b]. Abbildung 6-11 zeigt ausgewählte Prozesse und den Ort ihrer Wirkung im Endlagersystem.

Die in den Programmen PROSA und EMOS berücksichtigten Prozesse sind:

- Volllaufen der Restgrube, d. h. der übrigen Grube und der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche zu einem vorgegebenen Zeitpunkt nach Verschluss des Endlagers
- Hohlraumvergrößerung in der übrigen Grube durch Auflösung von Halit und Umlösung an Kalisalzen (Annahme: Zutritt von Süßwasser aus dem Hutgestein), Ansteigen des Mg-Gehaltes in der Lösung durch Umlösung an Kalisalzen
- Lösungszutritt durch die Abdichtungen in die abgedichteten Einlagerungsbereiche, abhängig vom Lösungsdruck in der Restgrube, vom Fluiddruck im Einlagerungsbereich, vom anfänglichen hydraulischen Widerstand der Abdichtungen sowie von der fortschreitenden Korrosion der Abdichtungen
- Korrosion der Abdichtungen aus Salzbeton durch Mg-haltige Lösung
- Korrosion der Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton durch Mg-arme Lösung
- nur in EMOS: Lösungsübertritt vom Südfeld in das Westfeld (beide Teil des ELB WSF) nur nach Volllaufen des Südfelds bis zur 1. Sohle

---

<sup>47</sup> hier das Referenzszenario, d. h. die erwartete Systementwicklung mit relevantem Lösungszutritt in die Restgrube

- Möglichkeit einer hydraulisch wirksamen Wegsamkeit zwischen dem Zentralteil und dem ELB OF durch den Hauptanhydrit
- Gasbildung in den Einlagerungsbereichen und – nur in EMOS – in der übrigen Grube
- Speicherung von Gas in den Einlagerungsbereichen mit unterschiedlicher möglicher Wirkung auf die Lösungsbewegung
- Konvergenz der Grubenbaue in Abhängigkeit von den Versatzeigenschaften, vom Fluiddruck und vom Gebirgsdruck
- nur in EMOS: Selbstversatz von unversetztem Hohlraum durch Abschalung
- Anstieg des Fluiddrucks in den abgedichteten Einlagerungsbereichen durch Konvergenz und Gasbildung/-speicherung
- Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen ohne Begrenzung durch Löslichkeit und Sorption (inventarbestimmte Mobilisierung), außer von  $^{14}\text{CO}_2$  in allen Einlagerungsbereichen und von  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA
- Mobilisierung von  $^{14}\text{CO}_2$  begrenzt durch Carbonatisierung
- Mobilisierung von  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA begrenzt durch Sorption an der Salzbetonverfüllung<sup>48</sup>
- Übertritt von gasförmigen Spezies in Lösung begrenzt durch Löslichkeit gemäß Gesetz von Henry
- Verdrängung von kontaminierter Lösung aus den Einlagerungsbereichen in die zugehörigen Mischungsbereiche durch Konvergenz und Gasbildung/-speicherung
- advektiv/dispersiv/diffusiver Radionuklidtransport im Grubengebäude entsprechend der beiden programmspezifischen Strukturmodelle (Abbildung 6-9 bzw. Abbildung 6-10), aufgrund der Parameterwahl ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung (keine Sorption) außer für  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA; in PROSA Vernachlässigung von Dispersion und Diffusion
- rein diffusiver und zusätzlich durch Sorption verzögerter Transport von  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA durch den Salzbetonversatz des Streckenstummels in durchströmbare Grubenbaue des ELB OF<sup>48</sup>
- Gasfluss im Grubengebäude (Berücksichtigung programmspezifisch, vgl. Kapitel 6.6.1)
- nur in PROSA: Bildung von hydraulisch hoch durchlässigen Wegsamkeiten nach Anstieg des Fluidrucks in den abgedichteten Einlagerungsbereichen über den Gebirgsdruck in deren Firste (Frac-Bildung)
- Mischung von kontaminierter Lösung aus den Einlagerungsbereichen mit Lösung aus der übrigen Grube (Ort des Prozesses: Mischungsbereich)
- Verdrängung von Lösung aus der sonstigen Restgrube (Grube ohne Einlagerungsbereiche und Mischungsbereiche) durch den oder die Mischungsbereich(e) in das Hutgestein durch Konvergenz und – nur in EMOS – während einer begrenzten Zeit zusätzlich durch Gasbildung/-speicherung in der sonstigen Restgrube
- advektiv/dispersiv/diffusiver Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) unter Berücksichtigung von Sorption, 1-dimensionaler Transport entlang eines Pfades mit Eigenschaften in Anlehnung an jene der Schichtenfolge DGL; in PROSA Vernachlässigung von Dispersion und Diffusion sowie konservative Vereinfachung bei der Quantifizierung der Sorption von Zerfallsreihen
- mögliche Unwirksamkeit der Sorption entlang des Transportpfades durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) nach einigen 10 000 Jahren als Folge der Entstehung einer neuen Wegsamkeit durch das intakte Hutgestein

---

<sup>48</sup> Dieser Prozess wird im Nachweis mit PROSA in einer speziellen Untersuchung berücksichtigt. Der Endlagerteil „Streckenstummel, Sohlenbohrloch, Radium-VBA“ wird im PROSA-Modell nicht abgebildet.



- Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser durch Mischung mit einem vorgegebenen Grundwasserfluss, Mindestverdünnung vor Grundwassernutzung wegen des Salzgehalts der aus der Grube ausgepressten Lösung
- Sorption im oberflächennahen Grundwasserträger (Obere Alleringerslebener Schichten), dadurch Verschiebung der Konzentrationsverhältnisse von gelösten Radionukliden der Zerfallsreihen
- potenzielle Strahlenexposition von Menschen, die sich ausschließlich im Bereich der Radionuklidfreisetzung aufhalten und sich von lokal erzeugten Lebensmitteln ernähren, berechnet in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV

Der Vergleich mit der in Kapitel 4.4 aufgeführten Liste der potenziell wichtigen Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse (FEP) zeigt, dass bei den Modellrechnungen zur Radionuklidmobilisierung, zum Radionuklidtransport und zur Radionuklidfreisetzung in Lösung alle für diesen Pfad möglicherweise wichtigen FEP berücksichtigt werden. Nicht berücksichtigt wird in beiden Programmen, EMOS und PROSA, folgender, als wenig relevant eingestufte Prozess: Der hydraulische Widerstand des Hutgesteins gegen das Auspressen von Lösung aus der Grube wird zu einem geringfügigen Anstieg des Fluiddrucks in der Restgrube über den hydrostatischen Wert führen. Dies bremst zusätzlich die Konvergenz der Grubenbaue. Unberücksichtigt bleibt zudem die mögliche Behinderung des Auspressens von Lösung aus der Grube in das Hutgestein durch einen Bereich mit hoher Gassättigung im Grubengebäude unterhalb der Übertrittsstelle: Das in der Grube gebildete Gas wird sich in den fluidzugänglichen Volumen der oberen Sohlen ansammeln. Dadurch gelangt möglicherweise die Wegsamkeit, welche von der Grube durch das Salinar zur Übertrittsstelle in das Hutgestein führt, in den gasgesättigten Bereich, und Lösung kann nicht aus der Grube in das Hutgestein austreten. Die Gassättigung unterhalb der Übertrittsstelle sinkt erst wieder ab, wenn der Gasdruck den Lösungsdruck im Hutgestein ausreichend<sup>49</sup> übersteigt und mehr Gas aus der Grube entweicht, als von unten in den gasgesättigten Bereich nachfließt.

Konvektive Lösungsbewegungen im Grubengebäude, insbesondere zwischen den Einlagerungsbereichen und der übrigen Grube, können grundsätzlich den Radionuklidtransport verstärken. Ihr potenzieller Einfluss wurde daher abgeschätzt ([Colenco 2009], Anhang K). Die Auswirkungen auf die Strahlenexposition sind gering, der Prozess kann deshalb vernachlässigt werden.

---

<sup>49</sup> um den Gaseindringdruck der maßgebenden Wegsamkeit im Hutgestein

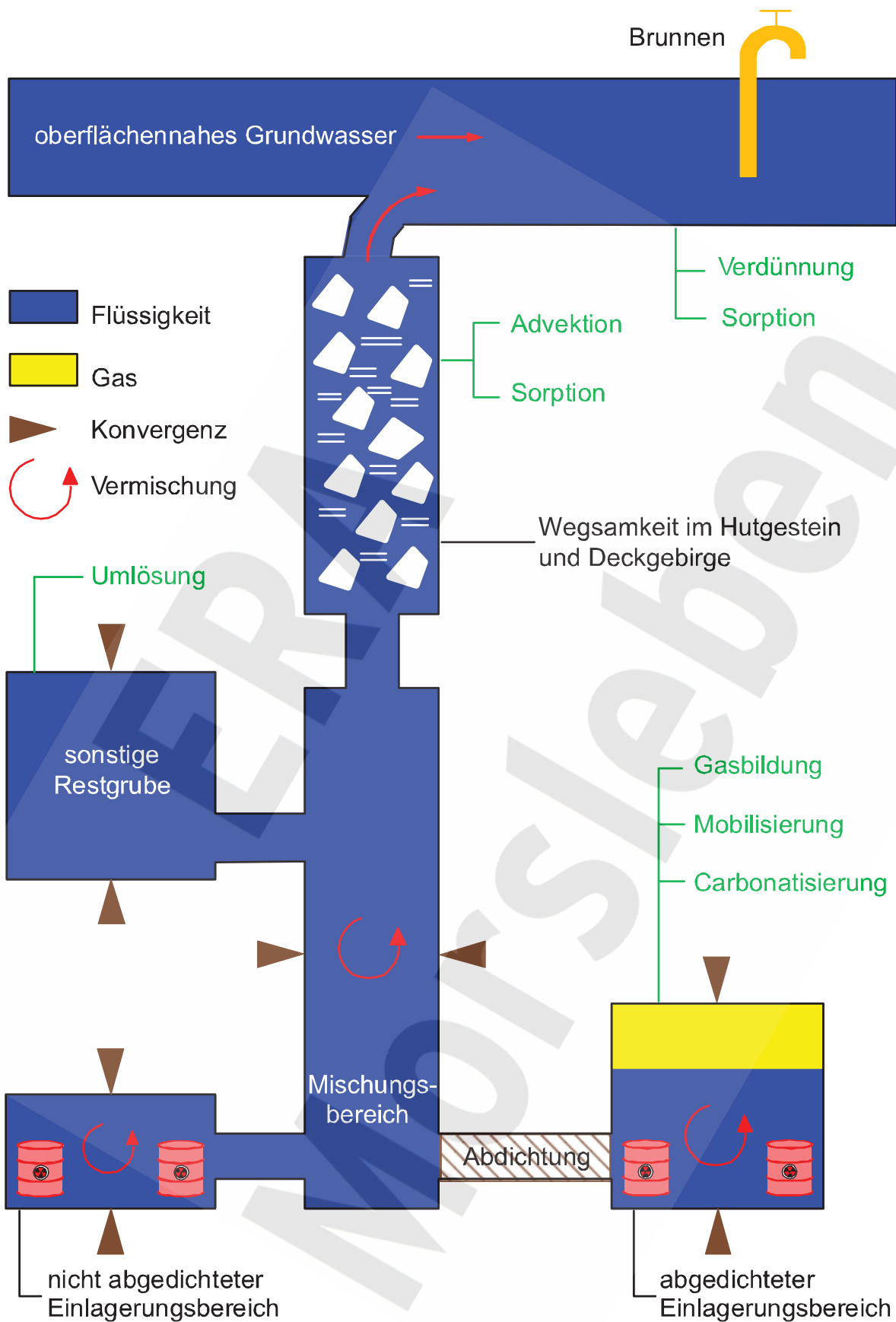


Abbildung 6-11: Ausgewählte, bei der Modellierung der Ausbreitung auf dem Lösungspfad berücksichtigte Prozesse und Orte ihrer Wirkung im Endlagersystem.

## 6.6.3 Ergebnisse für das Referenzszenario

### Deterministische Modellrechnungen für den Referenzfall

Die mit den beiden Modellen berechneten potenziellen jährlichen Strahlenexpositionen für das Referenzszenario mit den erwarteten quantitativen Merkmalen des Systemzustands und der Systementwicklung (d. h. für den Referenzfall<sup>50</sup>, vgl. Einleitung zu Kapitel 3.4) zeigt Abbildung 6-12. Dargestellt ist zum einen der zeitliche Verlauf der mit PROSA berechneten Strahlenexposition für die drei Fälle der Wirkung von Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung, die Fälle „oo“, „mo“ und „mm“ (vgl. Kapitel 6.6.1). Zum anderen zeigt Abbildung 6-12 den zeitlichen Verlauf der mit EMOS berechneten Strahlenexposition für zwei Werte des Gaseindringdrucks der Abdichtungen ( $p_E = 2 \text{ MPa}$  und  $p_E = 0,2 \text{ MPa}$ ). Die mit EMOS ermittelte Strahlenexposition wurde unter der Annahme einer Übertrittsstelle in der Grube Bartensleben ermittelt (vgl. Kapitel 6.6.1, speziell Abbildung 6-9). Die ausführliche Darstellung der Ergebnisse enthalten [Colenco 2009] und [GRS 2009b].

Die Ergebnisse der Modellrechnungen mit den beiden Modellen stimmen relativ gut überein. Sie zeigen ein erstes Dosismaximum zwischen  $0,0002 \text{ mSv/a}$  und  $0,0008 \text{ mSv/a}$  nach knapp 10 000 Jahren (Ausnahme im Fall „oo“:  $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ mSv/a}$  nach gut 10 000 Jahren), welches durch die Freisetzung von Radionukliden aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen, zur Hauptsache aus dem ELB NF, verursacht wird. Die dosisbestimmenden Radionuklide sind gelöstes  $^{14}\text{CH}_4$  (nur gemäß PROSA<sup>51</sup>),  $^{126}\text{Sn}$  und  $^{99}\text{Tc}$ .

Ein zweites Dosismaximum tritt in beiden Modellen nach rund 40 000 bis 50 000 Jahren auf, welches auf die Freisetzung von Radionukliden aus dem abgedichteten ELB WSF zurückzuführen ist. Das in Abbildung 6-12 sichtbare kurzzeitige Absinken der berechneten Strahlenexposition vor dem zweiten Dosismaximum gemäß EMOS geht auf die Unterbrechung der Lösungsauspressung aus der Grube zurück, die auftritt, wenn die Abdichtung zum ELB WSF durchkorrodiert und kurzzeitig ein starker Lösungszutritt aus der Restgrube in diesen Einlagerungsbereich stattfindet. Sofern Gas nicht (PROSA, Fall „mo“) oder erst nach Überwinden eines hohen Gaseindringdrucks der Abdichtungen (EMOS, Variante  $p_E = 2 \text{ MPa}$ ) aus dem Einlagerungsbereich entweichen kann und deshalb stark zur Lösungsauspressung aus dem Einlagerungsbereich beiträgt, beträgt das Dosismaximum  $0,003 \text{ mSv/a}$  und liegt damit um den Faktor 100 unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Die Ergebnisse der beiden Programme für dieses Dosismaximum stimmen innerhalb von weniger als 20 % überein. Sofern Gas mit keinem oder mäßigem hydraulischem Widerstand (PROSA, Fälle „oo“ und „mm“) bzw. nach Überwinden eines geringen Gaseindringdrucks (EMOS, Variante  $p_E = 0,2 \text{ MPa}$ ) aus dem Einlagerungsbereich entweichen kann, liegt das zweite Dosismaximum um etwa einen Faktor 10 niedriger. Nach den Modellrechnungen mit EMOS erfolgt im Referenzfall keine Freisetzung von Radionukliden aus dem ELB OF in oberflächennahes Grundwasser, nach jenen mit PROSA setzt die Freisetzung von Radionukliden in oberflächennahes Grundwasser nach rund 150 000 Jahren (Fälle „mo“ und „mm“) bzw. nach rund 300 000 Jahren (Fall „oo“) ein, allerdings auf sehr niedrigem Niveau. Das zweite Dosismaximum wird durch die Freisetzung von  $^{126}\text{Sn}$  und  $^{99}\text{Tc}$  verursacht, wobei  $^{99}\text{Tc}$  nur zwischen 15 % und 20 % beiträgt. Weitere Beiträge im Prozentbereich stammen von der Freisetzung von  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{59}\text{Ni}$ ,  $^{79}\text{Se}$ ,  $^{129}\text{I}$  und  $^{135}\text{Cs}$ .

Zinn (und damit  $^{126}\text{Sn}$ ) wird im Hutgestein und Deckgebirge als nicht sorbierend, Technetium ( $^{99}\text{Tc}$ ) als gering sorbierend angesetzt. Für Zinn ist die Annahme sehr konservativ und auf fehlende belastbare Daten zurückzuführen; unter Süßwasserverhältnissen zeigt Zinn eine starke Sorption an tonigen Materialien. Actiniden und deren Zerfallsprodukte, d. h. Thorium-, Uran-, Neptunium-, Plutonium-, Americium-, Curium-, Ra-

<sup>50</sup> Die deterministischen Modellrechnungen zum Referenzszenario in [Colenco 2009] betreffen nur den Referenzfall und keine alternativen Varianten. Vereinfachend werden sie dort mit „Berechnungen für das Referenzszenario“ bezeichnet.

<sup>51</sup> Im Nachweis der Langzeitsicherheit mit EMOS wird die Freisetzung von gelöstem  $^{14}\text{CH}_4$  in einer gesonderten Rechnung untersucht.

dium- und Blei-Isotope, werden im Hutgestein und Deckgebirge praktisch vollständig zurückgehalten; die berechneten Freisetzungsraten ergeben Dosisbeiträge im Bereich von  $10^{-7}$  mSv/a und weniger.

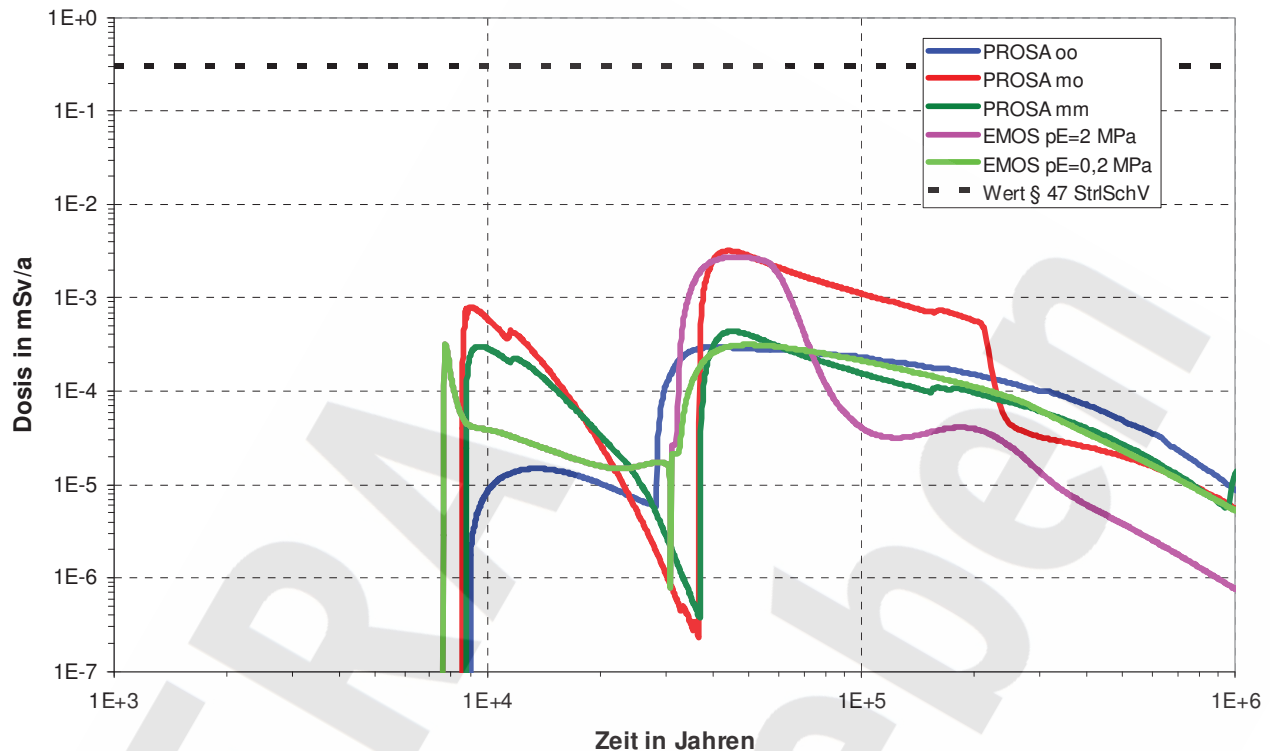


Abbildung 6-12: Zeitlicher Verlauf der berechneten potenziellen Strahlenexposition im Referenzfall (Erläuterungen im Text).

Der qualitativ unterschiedliche zeitliche Verlauf der Strahlenexposition im Fall „mo“ gemäß PROSA und in der vergleichbaren Variante  $p_E = 2$  MPa von EMOS ab rund 60 000 Jahren ist auf abweichende konzeptuelle Modellannahmen zurückzuführen. Während im Fall „mo“ das im Einlagerungsbereich gebildete Gas dauerhaft dort verbleibt und bei Überdruck im Einlagerungsbereich ausschließlich (kontaminierte) Lösung ausgepresst wird, entweicht in der Variante  $p_E = 2$  MPa Gas aus dem Einlagerungsbereich, sobald der Gasdruck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Lösungsdruck auf der 3. Sohle um den Gaseindringdruck  $p_E = 2$  MPa übersteigt. Dadurch fällt der Druck im Einlagerungsbereich rasch ab und die Lösungsauspressrate geht als Folge stark zurück.

Die Widerstandszeit des Abdichtsystems des ELB WSF beträgt im Referenzfall je nach zeitlicher Entwicklung des Gasdrucks im Einlagerungsbereich knapp 20 000 Jahre bis gut 25 000 Jahre; sie widerspiegelt sich im zeitlichen Abstand zwischen dem ersten und dem zweiten Dosismaximum in Abbildung 6-12. Die deutlich längeren Abdichtungen zum ELB OF korrodieren nicht durchgehend, der Fluidruck steigt vorher durch Gasbildung und Konvergenz der Hohlräume über den hydrostatischen Lösungsdruck in der Restgrube an.

Der Ort der Wegsamkeit zwischen Grubengebäude und Hutgestein ist von geringem Einfluss. Dies zeigt eine Modellrechnung mit EMOS: Bei einem Auspressen der Lösung über die Grube Marie ist das erste Dosismaximum um weniger als einen Faktor 2 höher und das zweite Dosismaximum um rund 20 % niedriger als bei einem Lösungsaustritt über die Grube Bartensleben (Abbildung 6-12).

Die Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition für die anderen in Anlage VII, Teil B StrlSchV genannten Altersgruppen als für Erwachsene ergibt, dass der Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis für alle Altersgruppen deutlich unterschritten wird.



## Probabilistische Modellrechnungen

Die Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen sind in Abbildung 6-13 dargestellt. Die Abbildung zeigt die komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Maxima der potenziellen Strahlenexposition bei relevantem Lösungszutritt in die Grube unabhängig vom Zeitpunkt des Maximums. Dargestellt ist damit die durch das Eintreten der Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ bedingte Wahrscheinlichkeit, dass der auf der Abszisse aufgetragene Wert der Dosis zu irgendeiner Zeit überschritten wird.

Es ist zu betonen, dass die berechneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen auf der Annahme von großen Bandbreiten für die Parameter beruhen und damit erhebliche Abweichungen von der erwarteten Systementwicklung einschließen. Dadurch decken die probabilistischen Modellrechnungen auch zahlreiche alternative Szenarien ab. So erstreckt sich die Bandbreite für die Anfangspermeabilität der Abdichtungen aus Salzbeton z. B. bis zu einem Wert von  $10^{-16} \text{ m}^2$ , jene der Anfangspermeabilität der Abdichtung zum ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton gar bis  $10^{-15} \text{ m}^2$ . Bei diesen Anfangspermeabilitäten stellen die Abdichtungen der korrosiven Wirkung von Mg-haltiger bzw. Mg-armen Lösung keinen signifikanten Widerstand entgegen, wie aus den Ausführungen in Kapitel 6.4.2 und speziell Tabelle 6-1 abgeleitet werden kann. Die probabilistischen Modellrechnungen decken damit auch die alternativen Szenarien „Auflockerungszone um Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit“ und „Unwirksame Abdichtungen“ ab (vgl. Kapitel 4.5.2). Ein weiteres Beispiel ist die Bandbreite des Parameters, der den Anteil der an der Gasbildung teilnehmenden Stoffmenge beschreibt. Das untere Ende der Bandbreite wurde mit 10 % angesetzt, d. h. dass im Extremfall nur 10 % der maximal möglichen Gasmenge gebildet wird. Dies entspricht (fast) dem alternativen Szenario „Keine Gasbildung“. Das letzte hier anzuführende Beispiel betrifft die Sorption der Radionuklide während des Transports durch Hutgestein und Deckgebirge. Bei den probabilistischen Modellrechnungen werden die  $K_d$ -Werte aller Radionuklide für den Transportabschnitt Hutgestein/Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) korreliert mit einem gemeinsamen Faktor variiert. Als unteres Ende der Bandbreite dieses Faktors wurde 0,1 angesetzt, wodurch im Extremfall alle  $K_d$ -Werte um den Faktor 10 geringer sind als im Referenzfall. Die probabilistischen Modellrechnungen decken damit mit signifikanter Eintretenswahrscheinlichkeit auch den Fall ab, dass die stärker sorbierenden langlebigen Actiniden, und insbesondere  $^{238}\text{U}$  als Vorläuferringradionuklid des radioökologisch relevanten  $^{226}\text{Ra}$ , während des Betrachtungszeitraums von 1 Mio. Jahre ins oberflächennahe Grundwasser freigesetzt und nicht – wie im Referenzfall – vollständig im Hutgestein und Deckgebirge zurückgehalten werden. Die deterministischen Modellrechnungen zu den alternativen Szenarien sind Gegenstand von Kapitel 6.6.4.

Die berechneten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Maxima der potenziellen Strahlenexpositionen von EMOS und von PROSA (für die beiden Fälle der Wirkung von Gasbildung/-speicherung „oo“ und „mm“) stimmen sehr gut überein. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung gemäß PROSA für den Fall „mo“ ergibt Dosiswerte, die um einen Faktor 3 bis 5 höher sind als die Dosiswerte, welche in den anderen Fällen oder gemäß EMOS mit der gleichen Wahrscheinlichkeit überschritten werden. Der Gaseindringdruck der Abdichtungen  $p_E$ , welcher bei den deterministischen Modellrechnungen die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von EMOS mit jenen von PROSA regelt (Fälle „mo“ bzw. „oo“ und „mm“, s. vorangehendes Unterkapitel), wird in den probabilistischen Modellrechnungen mit EMOS uniform zwischen 0 und 2,4 MPa variiert. Damit kann Gas in den meisten Rechenfällen von EMOS relativ früh aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen entweichen, womit die bessere Vergleichbarkeit der Wahrscheinlichkeitsverteilung von EMOS mit jenen von PROSA für die Fälle „oo“ und „mm“ begründet ist.

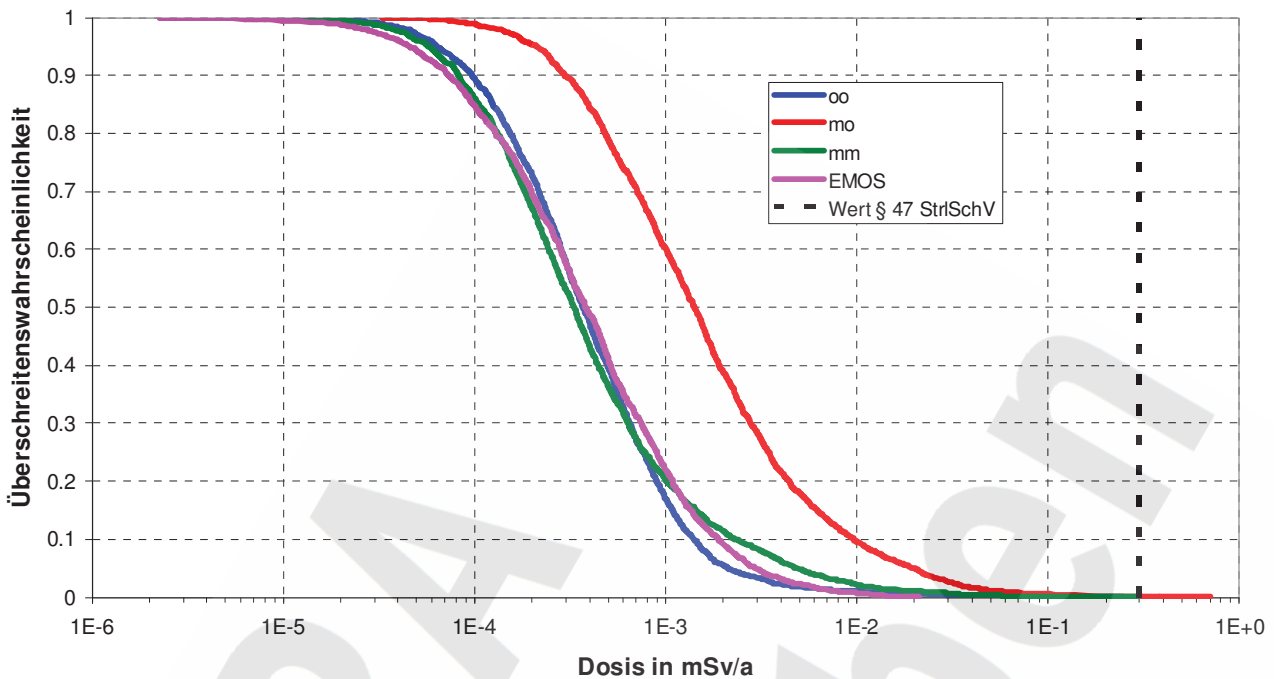


Abbildung 6-13: Komplementäre kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung (Überschreitenswahrscheinlichkeit) des Maximums der potenziellen Strahlenexposition bei relevantem Lösungszutritt in die Grube.

Der Medianwert des zeitlichen Maximums der potenziellen Strahlenexposition liegt nach EMOS und nach PROSA (Fälle „oo“ und „mm“) zwischen 0,0003 mSv/a und 0,0004 mSv/a, also rund um den Faktor 1000 unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Der 95-Perzentilwert des Maximalwerts der Dosis (ohne PROSA-Fall „mo“) liegt zwischen 0,002 mSv/a und 0,005 mSv/a, also zwischen einem Faktor 60 und 150 unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Der Wert von Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis wird in keinem Rechenfall überschritten<sup>52</sup>.

Sofern Gas zu keiner Zeit aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen entweichen kann (Fall „mo“ der Modellrechnungen mit PROSA) beträgt der Medianwert des Maximums der potenziellen Strahlenexposition 0,0014 mSv/a und der 95-Perzentilwert 0,018 mSv/a. In vier von 2000 Rechenfällen wird der Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis überschritten. Der höchste berechnete Wert beträgt 0,7 mSv/a und liegt damit unterhalb des Schwankungsbereichs der natürlichen Strahlenexposition in Deutschland. Der Wert von 0,03 mSv/a, der um den Faktor 10 unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis liegt, wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 97 % (bei einem Konfidenzgrad von 80 %) unterschritten.

Die Maxima der potenziellen Strahlenexposition werden nach PROSA – mit abnehmender Häufigkeit – durch die Radionuklide  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{14}\text{C}$  (als gelöstes  $^{14}\text{CH}_4$ ),  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{237}\text{Np}$  und  $^{234}\text{U}$  verursacht, letzteres aufgrund des implizit über den Dosiskonversionsfaktor<sup>53</sup> mitberücksichtigten Folgeprodukts  $^{226}\text{Ra}$ . Nach EMOS bewirkt das

<sup>52</sup> Bei den probabilistischen Modellrechnungen mit PROSA für den Fall „mm“ lag von 2000 Rechenfällen einer knapp unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Der Wert von 0,03 mSv/a, der um den Faktor 10 kleiner ist, wird nach den Modellrechnungen für den Fall „mm“ mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % (bei einem Konfidenzgrad von 90 %) unterschritten.

<sup>53</sup> Als Folge der vereinfachenden Berechnung des Transports von Radionuklidzerfallsreihen durch Hutgestein und Deckgebirge mit PROSA werden einzelne Radionuklide mehrfach berücksichtigt, einerseits durch die explizite Berechnung ihrer Freisetzung in das oberflächennahe Grundwasser, andererseits durch Zuschlag ihres Dosiskonversionsfaktors zu jenem ihres längerlebigen Vorläuferradionuklids (vgl. [Colenco 2009], Anhang A, Kapitel A.11).

Radionuklid  $^{126}\text{Sn}$  in rund 90 % der Realisierungen das Dosismaximum; in den anderen Realisierungen sind es – mit abnehmender Häufigkeit – die Radionuklide  $^{14}\text{C}$  (als gelöstes  $^{14}\text{CO}_2$ ),  $^{226}\text{Ra}$  und  $^{99}\text{Tc}$ .

### Sicherheitsrelevante Systemeigenschaften (Parameter)

Relevante Parameter eines Endlagersystems sind solche, bei denen eine Änderung des Parameterwerts innerhalb einer plausiblen Bandbreite eine signifikante Änderung des Maximalwerts der potenziellen Strahlenexposition verursacht. Das Ausmaß der Änderung der Strahlenexposition kann jedoch stark vom Wert der übrigen Parameter abhängen. In probabilistischen Modellrechnungen zeigt sich der Einfluss eines Parameters in seiner Korrelation mit dem Dosismaximum. Aufgrund der hohen Zahl an Parametern mit Einfluss sind die Korrelationen jedoch nicht besonders ausgeprägt (niedrige Korrelationskoeffizienten). Dies erfordert ein sorgfältiges Vorgehen bei der Bestimmung der relevanten Parameter und bei der Interpretation der Ergebnisse. Sowohl die Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen mit PROSA als auch jene mit EMOS wurden statistisch nach verschiedenen Methoden ausgewertet, um die relevanten Parameter zu ermitteln. Dabei konnten die wichtigeren Parameter verlässlich identifiziert werden, auch wenn die verschiedenen Methoden nicht die gleichen Ergebnisse im Detail ergaben. Tabelle 6-2 zeigt das Ergebnis der statistischen Auswertungen und illustriert – durch Vergleich der Ergebnisse von PROSA und EMOS – die Signifikanz der ermittelten Ränge.

Tabelle 6-2: Relevante Parameter gemäß den statistischen Auswertungen der Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen mit PROSA und EMOS.

Rang	PROSA (Fall „mo“)	Rang	EMOS
1	verdünnender oberflächennaher Grundwasserfluss	1	verdünnender oberflächennaher Grundwasserfluss
2	Konvergenzrate im ELB WSF	2	Anfangspermeabilität der Abdichtungen aus Salzbeton
3	Gasbildungsrate im ELB WSF zur repräsentativ späten Zeit	3	Referenzkonvergenzrate
4	wirksamer Anteil des Inventars an Gas bildenden Stoffen im ELB WSF	4	Gaseindringdruck der Abdichtungen
5	Konvergenzrate in der übrigen Grube	5	Verhältnis der Konvergenzrate im Südfeld zur Referenzkonvergenzrate
6	Anfangspermeabilität der Abdichtung zum ELB WSF	6	Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube
7	$K_d$ -Werte in Hutgestein und Deckgebirge	7	transportwirksamer Querschnitt der Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge
8	transportwirksamer Querschnitt der Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge	8	Magnesiumgehalt der an den Abdichtungen anstehenden Lösung
9	Volumen des ELB WSF außerhalb der Einlagerungsgrubenbaue	9	Rate der Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung organischer Stoffe
10	Magnesiumgehalt der an den Abdichtungen anstehenden Lösung	10	$K_d$ -Werte in Hutgestein und Deckgebirge

Im Fall „mm“ der Wirkung von Gasbildung/-speicherung gemäß PROSA führen fast die gleichen Parameter die Liste der relevanten Parameter an: Zusätzlich relevant sind der Parameter für den Gasfluss durch die Abdichtung des ELB WSF und die Gasbildungsrate zu repräsentativ frühen Zeiten in den beiden abgedich-

teten Einlagerungsbereichen. Nicht unter den zehn relevantesten Parametern sind nach der statistischen Auswertung für den Fall „mm“ die Anfangspermeabilität der Abdichtung zum ELB WSF, das Volumen des ELB WSF außerhalb der Einlagerungsgrubenbaue und der Magnesiumgehalt der an den Abdichtungen anstehenden Lösung.

In Anbetracht der Unterschiede in den Modellkonzepten und der unterschiedlichen Parametrisierung von verschiedenen Prozessen stimmen die Ergebnisse i. A. gut überein. Der Gaseindringdruck der Abdichtungen, der als relevanter Parameter für die Modellrechnungen mit EMOS identifiziert wurde, kann bei den Modellrechnungen mit PROSA nicht auftreten, weil er in PROSA nicht als Parameter verwendet wird. In den Modellrechnungen mit PROSA wird das Entweichen von Gas aus den Einlagerungsbereichen mit der Simulation der drei Fälle „oo“, „mo“ und „mm“ sowie mit einem Parameter für den Gasfluss durch die Abdichtungen im Fall „mm“ untersucht. Wesentliche Unterschiede weisen die beiden Modelle auch in Bezug auf die Parametrisierung der Gasbildung auf: Während in EMOS unterschiedliche Parameter für die Gasbildungsrate durch Metallkorrosion und durch mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen auftreten, enthält das PROSA-Modell Parameter für die Gasbildungsrate zu repräsentativ frühen und für die Gasbildungsrate zu repräsentativ späten Zeiten, ohne Unterscheidung von Metallkorrosion und mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen. Dies erklärt die etwas unterschiedliche Einstufung der Relevanz von Parametern zur Gasbildung. Ein gewisser Unterschied in der Einstufung der Relevanz von direkt vergleichbaren Parametern besteht in Bezug auf die Anfangspermeabilität der Abdichtungen aus Salzbeton bzw. zum ELB WSF und den Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube.

Abgesehen vom Parameter „Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube“ lassen sich die relevanten Parameter in vier Gruppen gliedern:

- Parameter des Hutgesteins und des Deckgebirges:
  - transportwirksamer Querschnitt der Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge
  - $K_d$ -Werte in Hutgestein und Deckgebirge
  - verdünnender oberflächennaher Grundwasserfluss
- Parameter, welche die Widerstandszeit der Abdichtungen zu den Einlagerungsbereichen, in erster Linie zum ELB WSF, beeinflussen:
  - Anfangspermeabilität der Abdichtungen (hohe Werte entsprechen einem Ausfall der Abdichtungen, s. o.)
  - Magnesiumgehalt der an den Abdichtungen anstehenden Lösung
- Antriebskräfte für das Auspressen kontaminierter Lösung aus den Einlagerungsbereichen und aus der Grube:
  - Konvergenzraten
  - Parameter der Gasbildung
- Parameter, die den Einfluss von Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung beschreiben:
  - Gaseindringdruck der Abdichtungen (EMOS) bzw. Fallunterscheidung („mm“, „oo“, „mo“) und Parameter für den Gasfluss durch die Abdichtung des ELB WSF im Fall „mm“ (PROSA)

Alle relevanten Parameter sind entweder innerhalb einer ausreichend engen Bandbreite zuverlässig bekannt oder wurden in den Modellrechnungen mit einem ungünstigen Referenzwert und/oder großen Bandbreiten berücksichtigt.

In Anbetracht der Unterschiede zwischen EMOS und PROSA in Bezug auf die Umsetzung der konzeptuellen Modelle, welche zusammen das Gesamtsystem „Endlager Morsleben“ beschreiben, ist die Übereinstimmung der Ergebnisse der beiden Programme in Bezug auf die Maximaldosis, deren Wahrscheinlichkeitsverteilung, die maßgebenden Radionuklide und die relevanten Parameter gut.



## 6.6.4 Ergebnisse für alternative Szenarien

Nachfolgend werden die mit deterministischen Modellrechnungen ermittelten potenziellen jährlichen Strahlenexpositionen angeführt, die sich als Folge eines relevanten Lösungszutritts in die Grube bei Sachverhalten oder Entwicklungen des Endlagersystems ergeben, die sich in qualitativer Weise vom Referenzszenario unterscheiden. Diese Sachverhalte und Entwicklungen definieren alternative Szenarien und „what-if“-Szenarien, diese sind in Kapitel 4.5.2 kurz beschrieben. Ausführliche Beschreibungen der alternativen Szenarien und „what-if“-Szenarien sowie Darstellungen der zugehörigen Modellrechnungen und ihrer Ergebnisse enthalten [Colenco 2009] und [GRS 2009b]. Dem Auftreten der alternativen Szenarien wird eine geringere Wahrscheinlichkeit zugeordnet als dem Referenzszenario. „What-if“-Szenarien beschreiben Systementwicklungen, deren Eintreten im Rahmen der praktischen Vernunft ausgeschlossen wird und die analysiert werden, um die Robustheit des Endlagersystems zu zeigen.

Die nachfolgenden Aussagen zu Ergebnissen von deterministischen Modellrechnungen mit EMOS beziehen sich – sofern nicht anders vermerkt – immer auf Modellrechnungen mit einem Gaseindringdruck der Abdichtungen von  $p_E = 2$  MPa.

### Lösungszutritt zum ELB OF entlang des Hauptanhydrit

In diesem alternativen Szenario führt eine Wegsamkeit, bestehend aus einem vernetzten System von Kluftscharen, vom Zentralteil durch den Hauptanhydrit in den ELB OF. Gestützt auf gemessene Daten und Beobachtungen wurden ein Modell für das System der Kluftscharen entwickelt und ein plausibler Satz der integralen hydraulischen Parameter des Kluftscharen-Systems abgeleitet. Als plausibler Wert des hydraulischen Widerstands der Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit bei ausgedehnter Vernetzung von Kluftscharen ergab sich ein Wert, der fast drei Größenordnungen geringer ist als jener der Abdichtungen vor Einsetzen der Korrosion durch Mg-haltige oder Mg-arme Lösung. In Bezug auf die Langzeitsicherheit wirkt die Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit wie eine Abdichtung mit geringem hydraulischem Widerstand, der sich allerdings mit der Zeit nicht verändert. Entsprechend wurden die potenziellen Auswirkungen dieses alternativen Szenarios mit den beiden Modellen (PROSA und EMOS) ermittelt.

Die unterstellte hydraulische Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit führt nach PROSA dazu, dass der ELB OF in kürzerer Zeit vollläuft als der ELB WSF und dass Radionuklide aus dem ELB OF ausgetragen und in das oberflächennahe Grundwasser freigesetzt werden, bevor die Abdichtung zum ELB WSF durchkorrodiert ist. Nach EMOS dauert die Zutrittsphase in den ELB OF in diesem Szenario ungefähr gleich lang wie die Korrosion der Abdichtungen zum ELB WSF und damit dessen Volllaufen. Dies ist eine Folge von etwas unterschiedlichen Annahmen für die Transmissibilität der Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit in den Modellrechnungen.

Nach den Modellrechnungen mit PROSA läuft der Einlagerungsbereich OF bei einer Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit mit hydraulischen Eigenschaften entsprechend den Referenzwerten innerhalb von ca. 12 000 Jahren voll. In allen Fällen bezüglich der Auswirkungen von Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung („mm“, „oo“, „mo“) erhöht sich die maximale potenzielle jährliche Strahlenexposition dadurch gegenüber jener im Referenzfall jedoch nur geringfügig (im Bereich von 10 %). Sie wird wie im Referenzfall hauptsächlich durch Radionuklidfreisetzung aus dem ELB WSF verursacht.

Mit den Modellrechnungen mit EMOS wurde die Permeabilität der unterstellten Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit in einem weiten Bereich variiert, die maximale betrachtete Permeabilität betrug  $10^{-14}$  m<sup>2</sup>. Keine der Modellrechnungen ergab einen nennenswerten Anstieg der potenziellen Strahlenexposition durch Freisetzung von Radionukliden aus dem ELB OF. Die maximale potenzielle Strahlenexposition ist nach EMOS praktisch unabhängig von der Permeabilität der Wegsamkeit im Hauptanhydrit und um rund 25 % höher als im Referenzfall. Bei höher durchlässiger Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit zeigt sich jedoch ein günstiger Nebeneffekt: Durch den stärkeren Lösungszutritt aus der Restgrube in den ELB OF als im Referenzszenario ist die Lösungsauspressrate aus der Grube in das Hutgestein während einer gewissen Zeit

nach Volllaufen der Restgrube geringer. In der Folge ergeben sich niedrigere Dosiswerte bis zum Zeitpunkt des Volllaufens des ELB OF.

### **Auflockerungszone um Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit**

In diesem Alternativszenario wird angenommen, dass die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle im Hauptanhydrit von einer hydraulisch wirksamen Auflockerungszone umgeben ist, welche einen deutlich geringeren hydraulischen Gesamt Widerstand der Abdichtung und deshalb grundsätzlich auch eine kürzere Widerstandszeit der Abdichtung zur Folge hat (vgl. Kapitel 6.4.2). Gleichwohl wird in diesem Alternativszenario, in dem wie im Referenzfall ein Mg-Gehalt der an der Abdichtung anstehenden Lösung von 10 % des Werts von IP21-Lösung angenommen wird, die Abdichtung nicht durchgehend korrodiert. Je nach Wirksamkeit von Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung korrodiert das Bauwerk über eine Länge von 20 % bis 60 % seiner Gesamtlänge. Auf den Maximalwert der Strahlenexposition hat die Auflockerungszone unter den getroffenen Annahmen keinen Einfluss, er ist gleich wie im Referenzfall.

### **Extreme Lösungszusammensetzung bei den Abdichtungen: IP21-Lösung**

Im Referenzfall weist die Lösung, welche an den Abdichtungen ansteht und somit deren Korrosion bestimmt, einen Mg-Gehalt von 10 % des Werts von IP21-Lösung auf. Bei dieser Lösungszusammensetzung korrodieren sowohl die Abdichtungen aus Salzbeton als auch die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton. In diesem „what-if“-Szenario wird angenommen, dass die Zusammensetzung der Lösung, welche in die Abdichtungsbauwerke eindringt, IP21-Lösung ist, d.h. Lösung, welche mit Kalisalz ins Lösungsgleichgewicht gelangt ist und anschließend auf dem Transportweg zur betrachteten Abdichtung keinen chemischen Kontakt mit nicht korrodiertem Salzbeton hatte. In Kontakt mit dieser Lösung korrodieren die Abdichtungen aus Salzbeton sehr rasch, während die Abdichtung aus Magnesiabeton geochemisch stabil ist (vgl. Kapitel 6.4.2).

Unter den angenommenen Bedingungen ist die Widerstandszeit des Abdichtsystems zum ELB WSF relativ kurz, so dass Radionuklidfreisetzungen aus diesem Einlagerungsbereich in oberflächennahes Grundwasser bereits nach etwa 12 000 Jahren einsetzen und sich mit Freisetzungen aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen überlagern. Nach PROSA steigen die Maximalwerte der potenziellen Strahlenexposition für die drei Fälle der Wirkung von Gasbildung/-speicherung dadurch um jeweils etwa einen Faktor 2 an, nach EMOS fällt der Maximalwert um rund einen Faktor 2 ab<sup>54</sup>. Die Auswirkung ist in beiden Modellen im Betrag mäßig, der qualitative Unterschied in der Aussage zur Systemreaktion ist auf die unterschiedliche konzeptuelle Modellierung der Auswirkungen von Gasbildung/ -speicherung auf die Lösungsbewegung zurückzuführen.

### **Extreme Lösungszusammensetzung bei den Abdichtungen: NaCl-Lösung**

In diesem „what-if“-Szenario wird angenommen, dass die an den Abdichtungen anstehende Lösung keinen Kontakt zu Kalisalzen hatte und deshalb auch keine Mg-Ionen enthält. In Kontakt mit dieser Lösung sind die Abdichtungen aus Salzbeton geochemisch stabil. Die Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton korrodiert jedoch deutlich schneller als im Referenzfall (vgl. Kapitel 6.4.2).

Bei diesem Szenario zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden Modellen in bezug auf die Auswirkung von Gasbildung/-speicherung noch deutlicher als im vorangehend diskutierten „what-if“-Szenario. Nach EMOS führen unter diesen Bedingungen Radionuklidfreisetzungen aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen zu deutlich geringeren maximalen Strahlenexpositionen als Radionuklidfreisetzungen aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen, d. h. im wesentlichen aus dem ELB NF. Die raschere Korrosion der

---

<sup>54</sup> PROSA: Fall „oo“: 0,0006 mSv/a; Fall „mm“: 0,0007 mSv/a; Fall „mo“: 0,006 mSv/a; EMOS:  $p_E = 2 \text{ MPa}$ : 0,0012 mSv/a

Abdichtung aus Magnesiabeton hat keinen Einfluss auf den Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition. Dieser beträgt nach EMOS in diesem Szenario 0,0003 mSv/a, rund ein Faktor 10 weniger als im Referenzfall mit  $p_E = 2$  MPa.

Aufgrund der konzeptuellen Annahmen in PROSA bewirken Radionuklidfreisetzungen aus dem ELB WSF auch in diesem Szenario potenzielle Strahlenexpositionen, welche mit jenen aufgrund von Freisetzungen aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen vergleichbar sind. Lediglich im Fall der Auswirkung von Gasbildung/-speicherung „mo“ übersteigt der Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition aufgrund von Freisetzungen aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen mit 0,0008 mSv/a geringfügig jenen, der durch Freisetzungen aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen verursacht wird. In den beiden anderen Fällen ist es umgekehrt, die Maximalwerte betragen 0,00013 mSv/a bzw. 0,0003 mSv/a. Quantitativ führen die beiden Modelle zu ähnlichen Ergebnissen.

## Unwirksame Abdichtungen

Das alternative Szenario „Unwirksame Abdichtungen“ setzt voraus, dass die Einlagerungsbereiche WSF und OF nicht gegen den Zentralteil abgedichtet sind. Wie im „what-if“-Szenario „Extreme Lösungszusammensetzung bei den Abdichtungen: IP21-Lösung“ ergeben die beiden Modelle qualitativ deutlich unterschiedliche Ergebnisse.

In den Modellrechnungen mit PROSA wurde den Modellabdichtungen für die Analyse eine Permeabilität von  $10^{-14}$  m<sup>2</sup> zugewiesen. Das rasche Volllaufen der Einlagerungsbereiche WSF und OF und das früh einsetzende Auspressen von Lösung aus diesen führt nicht nur zu einer frühen und hohen Austrittsrate von Radionukliden aus der Grube in das Hutgestein, sondern auch zu einem raschen Transport durch Hutgestein und Deckgebirge. Dies resultiert in höheren potenziellen Strahlenexpositionen als im Referenzszenario. Aufgrund der wirksamen Sorption in Hutgestein und Deckgebirge werden jedoch auch in diesem alternativen Szenario keine Actiniden<sup>55</sup> freigesetzt. Die berechneten maximalen Dosiswerte sind um den Faktor 2,5 bis 3 höher als die maximalen Strahlenexpositionen in den entsprechenden Fällen im Referenzfall<sup>56</sup>.

In den Modellrechnungen mit EMOS wurde dieses alternative Szenario mit einer Parametervariation der Permeabilität der Modellabdichtungen untersucht, die maximale betrachtete Permeabilität betrug  $6,7 \cdot 10^{-15}$  m<sup>2</sup>. Bei dieser Permeabilität ist das Abdichtsystem des ELB WSF nach weniger als 1000 Jahren nach Volllaufen der Restgrube durchkorrodiert und damit unwirksam. In den Modellrechnungen mit EMOS führen die Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche WSF und OF im Vergleich mit dem Referenzfall zunächst zu einer Verringerung der Lösungsauspressrate aus der Grube in das Hutgestein während einer gewissen Zeit nach Volllaufen der Restgrube<sup>57</sup>. Nach dem frühen Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche dauert das Auspressen von radionuklidhaltiger Lösung länger als im Referenzfall, was zu einer geringeren Radionuklidfreisetzungsrates und damit einem niedrigeren Maximalwert der Strahlenexposition als im Referenzfall führt. Dieser beträgt nach EMOS in diesem Szenario (mit  $p_E = 2$  MPa) 0,0013 mSv/a, d. h. rund ein Faktor 2 weniger als im Referenzfall.

## Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube

Im alternativen Szenario „Korrosion des Salzbetons in der übrigen Grube“ wird entgegen den begründeten Erwartungen unterstellt, dass der Massenversatz in der übrigen Grube durch Wechselwirkung mit Mg-haltiger Lösung in großem Ausmaß korrodiert. Da bei den Modellrechnungen außerhalb der Abdichtungen

---

<sup>55</sup> außer in einem Fall der Auswirkung von Gasbildung/-speicherung jene der 4N+1-Zerfallsreihe, <sup>237</sup>Np und Folgeprodukte nach annähernd 1 Mio. Jahre

<sup>56</sup> PROSA: Fall „oo“: 0,0009 mSv/a; Fall „mm“: 0,0011 mSv/a; Fall „mo“: 0,008 mSv/a

<sup>57</sup> Die Auswirkung der Lösungszutritte aus der Restgrube in die Einlagerungsbereiche WSF und OF auf die Lösungsauspressrate aus der Grube in das Hutgestein wird in den Modellrechnungen mit PROSA nicht berücksichtigt.

kein hydraulischer Widerstand angenommen wird, beschränkt sich die Auswirkung dieses Prozesses in den Modellen darauf, dass aus dem nicht kompaktierbaren Salzbetonversatz ein kompaktierbarer Versatz entsteht. Unter der Annahme, dass dieser kompaktierbare Versatz die Stützwirkung und das Konvergenzverhalten von Salzgrus aufweist und die Anfangsporosität des korrodierten Salzbetons jener des nicht korrodierten Salzbetons entspricht, ergeben Modellrechnungen mit PROSA eine um ca. 20 % höhere Rate der Lösungsauspressung aus der Grube in das Hutgestein als im Referenzszenario. Diese Änderung der Auspressrate ist geringer als jene, die die Variation der Konvergenzrate der übrigen Grube bei den probabilistischen Modellrechnungen für das Referenzszenario verursacht. Eine Berechnung der potenziellen Strahlenexposition für dieses alternative Szenario ist deshalb nicht erforderlich.

## **Keine Gasbildung**

Im Alternativszenario „Keine Gasbildung“ wird unterstellt, dass im Endlager weder Gasbildung durch Metallkorrosion noch durch mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen stattfindet. Die Modellrechnungen wurden mit EMOS durchgeführt. Das Szenario entspricht in Bezug auf die Lösungsbewegung im Endlager-System dem Fall „oo“ der Auswirkung von Gasbildung/-speicherung von PROSA.

Bei vollständig fehlender Gasbildung im Grubengebäude tritt nach der Modellrechnung mit EMOS zu frühen Zeiten nach dem Volllaufen der Restgrube kein relatives Dosismaximum auf: Die berechnete potenzielle Strahlenexposition steigt nach rund 10 000 Jahren in den nSv/a-Bereich an, bis die Abdichtung zum ELB WSF durchkorrodiert ist und die Radionuklidfreisetzung aus diesem Einlagerungsbereich beginnt. Das anschließende Dosismaximum ist geringfügig niedriger als im Referenzfall mit  $p_E = 0,2$  MPa. Der zeitliche Verlauf der potenziellen Strahlenexposition gemäß EMOS stimmt innerhalb von etwa 50 % mit den Ergebnissen von PROSA für den Fall „oo“ überein.

## **Keine mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen**

Im Alternativszenario „Keine mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen“ wird unterstellt, dass im Endlager zwar Gasbildung durch Metallkorrosion stattfindet, jedoch keine Gasbildung durch mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen erfolgt. Die Modellrechnungen wurden mit EMOS durchgeführt.

Sofern keine mikrobielle Gasbildung stattfindet, werden die Carbonatmengen in den Einlagerungsgrubenbauten um Größenordnungen niedriger sein als im Referenzszenario. Eine Rückhaltung von  $^{14}\text{CO}_2$  durch Carbonatisierung kann deshalb nicht mehr angenommen werden. Im Weiteren wird in diesem Szenario angenommen, dass die  $^{14}\text{C}$ -haltigen organischen Substanzen aus den Abfällen unverändert und vollständig in Lösung gehen und ohne Rückhaltung durch Sorption im Hutgestein und Deckgebirge transportiert werden. Die Umwandlung in  $^{14}\text{CO}_2$  erfolgt im Szenario erst im oberflächennahen Grundwasser.

Unter Berücksichtigung dieser Effekte ergibt die Modellrechnung ein deutlich höheres erstes Maximum der potenziellen Strahlenexposition von rund 0,026 mSv/a, das nach knapp 10 000 Jahren auftritt. Das durch die Freisetzung von Radionukliden aus dem ELB WSF verursachte zweite Dosismaximum ist aufgrund der geringeren und früher abklingenden Gasbildung im Einlagerungsbereich niedriger als das erste Dosismaximum und als das zweite Dosismaximum im Referenzfall (mit  $p_E = 2$  MPa).

## **Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein**

Im alternativen Szenario „Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“ wird unterstellt, dass sich nach einigen 10 000 Jahren aufgrund von geologischen Prozessen im Hutgestein eine neue Wegsamkeit bildet. Für die Modellrechnungen wird angenommen, dass dies nach 30 000 Jahren erfolgt, wobei die Parameter „transportwirksame Länge“, „Fließquerschnitt“ und „Fließporosität“, welche den Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge bestimmen, im Vergleich mit dem Referenzfall unverändert bleiben. Die Folge



der Veränderung im Hutgestein besteht darin, dass beim Transport entlang der neuen Wegsamkeit keine Sorption stattfindet. Modellrechnungen zu diesem Szenario wurden mit PROSA und EMOS durchgeführt

Die Modellergebnisse von PROSA weichen erst ab 30 000 Jahren von jenen für den Referenzfall ab. Als Folge der nun fehlenden Transportverzögerung durch Sorption entlang des Transportwegs durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) kommt es im Vergleich mit dem Referenzfall zu einer erheblich verstärkten Radionuklidfreisetzung in das oberflächennahe Grundwasser. Dies betrifft vor allem die an tonigen und mergeligen Gesteinen gut sorbierenden Actiniden, insbesondere die Elemente Uran und Thorium mit den Radionukliden  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$  und  $^{230}\text{Th}$ , welche Vorläufernuklide von  $^{226}\text{Ra}$  sind. Im Unterschied zum Referenzfall werden diese Radionuklide in diesem Szenario nicht während der gesamten Betrachtungsdauer im Hutgestein und Deckgebirge zurückgehalten. Dies führt bei keinem oder mäßigem Einfluss der Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung (Fälle „oo“ und „mm“) rechnerisch auf Maximalwerte für die Strahlenexposition von 0,025 mSv/a bis 0,038 mSv/a und für den Fall „mo“ mit starkem Einfluss sogar von 0,28 mSv/a. Zu diesen Modellergebnissen ist folgende Anmerkung anzubringen: Die Maximalwerte der Strahlenexposition werden in allen Fällen durch die Freisetzung der Radionuklide der  $^{238}\text{U}$ -Zerfallskette verursacht, die Radionuklide anderer Zerfallsketten tragen weniger als 10 % zur Maximaldosis bei. Bei fehlender Sorption im Hutgestein und Deckgebirge bewirkt der in PROSA verwendete vereinfachte Algorithmus zur Berechnung der Freisetzung von Radionuklid-Zerfallsreihen eine Überschätzung des Beitrags der  $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe zur potenziellen Strahlenexposition um den Faktor 2 bis 3. Die berechnete potenzielle Strahlenexposition bleibt damit noch um den Faktor 2 oder mehr unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Eine weitere relativierende Bewertung dieser Modellergebnisse erfolgt in Kapitel 6.6.5.

Für die Modellrechnung mit EMOS zum alternativen Szenario „Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“ wurde neben den oben beschriebenen Annahmen die zusätzliche Annahme getroffen, dass das Volllaufen der Restgrube erst mit der Bildung der neuen Wegsamkeit nach 30 000 Jahren einsetzt und dann rasch erfolgt. Damit sind die Grubenbaue zum Zeitpunkt des Lösungszutritts bereits stark konvergiert, und die Konvergenz verursacht deshalb nur noch geringe Lösungsbewegungen im Grubengebäude und aus dem Grubengebäude in das Hutgestein. In der Folge ist auch der Transport von nicht sorbierenden Radionukliden durch das Hutgestein und Deckgebirge langsamer als im Referenzfall. Da Uran im Hutgestein und Deckgebirge jedoch nicht durch Sorption zurückgehalten wird, dominiert die Freisetzung von  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  und dessen Zerfallsprodukten die Strahlenexposition. Bei einem relativ hohen Gaseindringdruck der Abdichtungen ( $p_E = 2 \text{ MPa}$ ) führt dies insgesamt zu einem Maximum der potenziellen Strahlenexposition, das deutlich niedriger ist als jenes im Referenzfall. Bei einem niedrigen Gaseindringdruck ( $p_E = 0,2 \text{ MPa}$ ) ist das Dosismaximum zwar etwas höher als in der entsprechenden Variante des Referenzfalls, liegt aber noch unter 0,001 mSv/a.

### **Mangelhafte Abdichtung Schacht Bartensleben**

In diesem „what-if“-Szenario wird angenommen, dass die Abdichtung von Schacht Bartensleben, welche Teil des Barrierensystems des ELB WSF ist, trotz ihrem Aufbau aus drei in Serie geschalteten Dichtelementen einen hydraulischen Widerstand aufweist, der gegenüber der Auslegungsanforderung um bis zu einem Faktor 1000 geringer, d. h. schlechter ist. Die möglichen quantitativen Auswirkungen wurden mit speziellen Modellrechnungen untersucht [Colenco 2009].

Unter den Bedingungen des Szenarios dauert es 4000 Jahre oder länger, bis der ELB WSF aufgrund des Lösungszutritts entlang des Schachtes vollgelaufen ist. Die Korrosion des Abdichtsystems zwischen dem ELB WSF und der Restgrube wird durch den Lösungszutritt entlang des Schachts nicht verstärkt. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass der ELB WSF und die Restgrube frühestens nach etwa 20 000 Jahren hydraulisch verbunden sind. Modellrechnungen mit PROSA ergeben für diese Bedingungen, dass die Auspressrate von Lösung entlang des Schachts ab ca. 4000 Jahre bis etwa 20 000 Jahre höchstens  $1 \text{ m}^3/\text{a}$ , und später – sofern das Abdichtsystem durchkorrodiert – bis etwa  $8 \text{ m}^3/\text{a}$  betragen kann.

Der Schacht Bartensleben durchquert unmittelbar oberhalb des Hutgesteins den Schilfsandstein, der im obersten Bereich sandig ausgebildet und deshalb erhöht durchlässig ist. Der Porenwasserdruck im Schilf-

sandstein ist nach den Ergebnissen der Felduntersuchungen hydrostatisch, schwach artesische Verhältnisse sind möglich. Unter der ungünstigen Annahme, dass oberhalb des Schilfsandstein bis in das oberflächennahe Grundwasser aufgrund der geringen hydraulischen Durchlässigkeit des Gebirges kein Lösungsaustausch zwischen der Schachtröhre und dem umgebenden Gestein stattfindet, können die Druck- und damit auch die Fließverhältnisse entlang der Schachtröhre analytisch berechnet werden. Die Eingangsgrößen sind

- eine vorgegebene und als zeitlich konstant angenommene Auspressrate von Lösung entlang des Schachts aus der Grube,
- die hydraulische Leitfähigkeit der Schachtverfüllung oberhalb des Schilfsandstein,
- die hydraulische Leitfähigkeit<sup>58</sup> des Schilfsandstein,
- der ungestörte Porenwasserdruck im Schilfsandstein (in Bezug auf den hydrostatischen Wert) und
- das ungestörte Dichteprofil des Porenwassers im Deckgebirge entlang des Schachts.

Die Analyse führte zu folgenden Ergebnissen:

- Bei hydrostatischen und bei unterhydrostatischen Verhältnissen im Schilfsandstein ist ein Austrag von Grubenlösung entlang des Schachts bis in das oberflächennahe Grundwasser nicht möglich. Die aus der Grube ausgepresste Lösung, welche mindestens die Dichte von NaCl-Lösung aufweist und damit deutlich schwerer als das Porenwasser im Deckgebirge ist, fließt in den Schilfsandstein ab.
- Bei relativ hohen Raten der Lösungsauspressung aus der Grube und für plausible Verhältnisse (Eingangsgrößen) trifft dies auch bei artesischem Überdruck im Schilfsandstein zu.
- Ab einem gewissen artesischen Überdruck im Schilfsandstein stellt sich in der Schachtröhre ein nach oben gerichteter Lösungsfluss ein. Dieser kann in beschränktem Maße Grubenlösung bis in das oberflächennahe Grundwasser transportieren. Aufgrund des Dichteunterschieds zwischen der Grubenlösung und dem Porenwasser im Deckgebirge ist die mögliche Austragsrate allerdings beschränkt.
- Mit den Referenzwerten der Eingangsgrößen, insbesondere bei schwach artesischen Verhältnissen im Schilfsandstein und einem querschnittgemittelten  $k_f$ -Wert der Schachtverfüllung oberhalb des Schilfsandstein von  $10^{-8}$  m/s, können auch bei einer mangelhaften Abdichtung des Schachts Bartensleben höchstens einige wenige Liter Grubenlösung pro Jahr entlang der Schachtröhre in das oberflächennahe Grundwasser gelangen. Die resultierende potenzielle Strahlenexposition liegt im Bereich von 0,0001 mSv/a. Selbst bei einem artesischen Überdruck, der am oberen Ende des plausiblen Bereichs liegt, und einer 10fach höher durchlässigen Schachtverfüllung als oben angegeben beträgt die Austragsrate entlang der Schachtröhre höchstens 800 l/a, entsprechend einer potenziellen Strahlenexposition von 0,10 mSv/a.

### **Instantanes Volllaufen der übrigen Grube**

Die Analyse dieses „what-if“-Szenarios dient dem Nachweis der Robustheit des Endlagersystems. Das Szenario unterscheidet sich vom Referenzszenario dadurch, dass ein hypothetisches, extrem rasches Volllaufen der Restgrube angenommen wird. Bei den Modellrechnungen wird ein instantanes Volllaufen angesetzt.

Nach den Modellrechnungen mit PROSA wird der Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition in diesem Szenario bei den Fällen mit Einfluss der Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung („mo“ und „mm“) durch die Freisetzung von Radionukliden aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen verursacht. Den Hauptbeitrag liefert die Freisetzung von gelöstem  $^{14}\text{CH}_4$ . Betragsmäßig liegt der Maximalwert im Fall „mo“ um rund 30 % unter, im Fall „mm“ um rund 20 % über dem entsprechenden Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition im Referenzfall. Sofern die Gasbildung/-speicherung keinen Einfluss auf die Lösungsbewegung hat (Fall „oo“), verursachen auch in diesem Szenario die Freisetzungen aus dem ELB WSF das Dosismaximum. Dieses liegt um rund 20 % über dem Maximalwert im Referenzfall.

---

<sup>58</sup> genauer: die Transmissivität des Schilfsandstein

Nach den Modellrechnungen mit EMOS, bei denen die Freisetzung von gelöstem  $^{14}\text{CH}_4$  nicht simuliert wird, verändert sich das relative Dosismaximum, welches durch Radionuklidfreisetzung aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen verursacht wird, in der Höhe praktisch nicht; es tritt nur wesentlich früher auf. Der Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition, welcher auf Radionuklidfreisetzung aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen zurückzuführen ist, ist unabhängig vom Gaseindringdruck geringer als im Referenzfall, bei  $p_E = 0,2 \text{ MPa}$  um etwa 20 %.

Die Maximalwerte der potenziellen Strahlenexposition unterscheiden sich damit bei einem extrem raschen Volllaufen der Restgrube nicht wesentlich von jenen, die für ein Volllaufen nach einer plausiblen Zeitperiode berechnet werden. Dies ist eine Folge von mehreren Prozessen, die sich in entgegengesetztem Sinn auf die Maximaldosis auswirken.

## **Schlussfolgerungen für die alternativen Szenarien und die „what-if“-Szenarien**

Außer in den alternativen Szenarien „keine mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen“ und „Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“ führen alle betrachteten alternativen Szenarien und „what-if“-Szenarien im Vergleich mit dem Referenzfall zu ähnlichen bis wenig abweichenden Maximalwerten der potenziellen Strahlenexposition. Die größten Abweichungen treten nach PROSA bei unwirksamen Abdichtungen (Faktor 2,5) und bei einer anstehenden Lösung bei den Abdichtungen, welche den Mg-Gehalt von IP21-Lösung aufweist, (Faktor 1,7) auf. Bei diesen Szenarien ergeben die Modellrechnungen mit EMOS Ergebnisse, die in vergleichbar geringer, jedoch qualitativ andersartiger Weise von den Ergebnissen für den Referenzfall abweichen. Die größte Abweichung nach oben tritt nach EMOS bei einer Wegsamkeit zum ELB OF durch den Hauptanhydrit auf (Faktor 1,2).

Falls keine mikrobielle Gasbildung stattfindet, ergibt sich nach den Modellrechnungen mit EMOS ein Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition, der um den Faktor 10 über dem Maximalwert im Referenzfall, aber immer noch um rund einen Faktor 10 unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis liegt. Dieses Alternativszenario wurde mit PROSA nicht analysiert.

Das alternative Szenario „Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“, bei dem die Entstehung einer neuen Wegsamkeit ohne Sorptionskapazität im Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) nach 30 000 Jahren unterstellt wird, führt zu wesentlich höheren potenziellen Strahlenexpositionen als im Referenzfall. Unter Berücksichtigung des Umstandes, dass das Dosismaximum durch PROSA in diesem Szenario um den Faktor 2 – 3 überschätzt wird, ergibt sich bei keinem oder geringem Einfluss der Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung (Fälle „oo“ und „mm“) ein Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition, der um den Faktor 15 oder mehr unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis liegt. Sofern die Gasbildung/-speicherung die Lösungsbewegung stark beeinflusst (Fall „mo“), liegt das berechnete Dosismaximum nur knapp unter  $0,3 \text{ mSv/a}$ . Eine relativierende Bewertung dieses Modellergebnisses enthält Kapitel 6.6.5.

Unter den Verhältnissen des Referenzfalls mit Einfluss auf die Widerstandszeit der Abdichtungen hat der Zeitpunkt, zu dem die neue Wegsamkeit entsteht, keinen Einfluss auf die maximale potenzielle Strahlenexposition. Im Referenzfall läuft der ELB WSF erst kurz vor oder nach dem unterstellten Zeitpunkt von 30 000 Jahren voll. Selbst bei einem früheren Entstehen der neuen Wegsamkeit kann der Radionuklidtransport aus dem ELB WSF durch Hutgestein und Deckgebirge, maßgebend für das Dosismaximum, erst nach einem Versagen der Abdichtungen einsetzen.

Die charakteristischen Auswirkungen der alternativen Szenarien in Bezug auf die Entwicklung des Endlagersystems werden durch die probabilistischen Modellrechnungen zum Referenzszenario, für die große Bandbreiten der maßgebenden Parameter angesetzt wurden, weitgehend abgedeckt. Probabilistische Modellrechnungen für die alternativen Szenarien sind deshalb nicht erforderlich.



## 6.6.5 Schlussfolgerungen aus den Modellrechnungen zum Radionuklidaustrag in Lösung

Die Modellrechnungen zum Radionuklidaustrag in Lösung bei einer Systementwicklung „mit relevantem Lösungszutritt“ ergeben für eine große Bandbreite der Systemparameter und für alle alternativen Szenarien und „what-if“-Szenarien zeitliche Maxima der potenziellen Strahlenexposition, die meistens deutlich unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis liegen. Ausnahmen bilden die alternativen Szenarien „keine mikrobielle Zersetzung von organischen Stoffen“ und „Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“, wobei die berechneten Dosismaxima auch für diese Szenarien kleiner als der in § 47 StrlSchV genannte Wert sind. Bei den probabilistischen Modellrechnungen zum Referenzszenario, mit denen im Ergebnis auch die alternativen Szenarien weitgehend abgedeckt werden und bei denen auch das gleichzeitige Eintreten von mehreren ungünstigen Systemzuständen unterstellt wird, wird der Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis immer oder fast<sup>59</sup> immer unterschritten.

Die Transportpfade, entlang derer Lösung bei einem relevanten Lösungszutritt in die Grube zu den Abfällen vordringt und – nach Mobilisierung von Schadstoffen – wieder durch die Grube zur Übertrittsstelle in das Hutgestein gelangt, können nicht im Detail prognostiziert werden. Ebenso wenig lassen sich Zeitpunkte und Reihenfolge des Volllaufens der verschiedenen Grubenteile, das sich in den Einlagerungsgrubenbauen einstellende geochemische Milieu, die Wirkung von Gasbildung und –speicherung auf die Lösungsbewegung im Grubengebäude oder die Transportpfade vom Salzspiegel bis in die Biosphäre im Detail vorhersagen. Mit abstrahierenden und vereinfachenden quantitativen Analysen können die möglichen Auswirkungen dieser und weiterer potenziell relevanter Prozesse jedoch abdeckend ermittelt werden. Dies erfolgte mit den Modellrechnungen mit EMOS und mit PROSA. Die Modellrechnungen mit den beiden Programmen beruhen auf dem gleichen konzeptuellen Modell für das Endlagersystem und dem gleichen Basisdatensatz, setzen diese jedoch in unterschiedlicher Weise um. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Vorgehensweisen stimmen die Ergebnisse der beiden Modellrechnungen im Wesentlichen überein und führen insbesondere zu den gleichen Schlussfolgerungen.

Durch die Analyse von verschiedenen Szenarien und die Variation der Systemparameter über weite Bandbreiten wurden die potenziellen Auswirkungen eines relevanten Lösungszutritts in die Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie in Bezug auf eine Freisetzung von Radionukliden abdeckend untersucht. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Im Referenzfall, d.h. im Referenzszenario und mit den Referenzwerten der Parameter, liegt der berechnete Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition (berechnet für die Altersgruppe „Erwachsene“) je nach Wirkung von Gasbildung/-speicherung auf die Lösungsbewegung zwischen 0,0003 mSv/a und 0,003 mSv/a und damit deutlich unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Auch die potenziellen Strahlenexpositionen, welche für die anderen in Anlage VII, Teil B StrlSchV genannten Altersgruppen berechnet werden, unterschreiten diesen Wert deutlich.
- Selbst bei konservativer Vernachlässigung verschiedener Prozesse<sup>60</sup> und breiter Variation der Systemparameter liegt die potenzielle jährliche Strahlenexposition durch Freisetzung von Radionukliden deutlich (meistens um mehrere Größenordnungen) unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Die berechneten 95-Perzentilwerte der zeitlichen Maxima der potenziellen Strahlenexposition liegen zwischen 0,002 mSv/a und 0,018 mSv/a.
- Die Auswirkungen der alternativen Szenarien unterscheiden sich nur wenig von jenen des Referenzszenarios. Eine Ausnahme bildet die Entstehung einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein ohne Sorptionskapazität nach wenigen 10 000 Jahren, sofern die Restgrube vorher und unabhängig davon vollläuft (s. u.). Eine zweite Ausnahme stellt das Ausbleiben der mikrobiellen Zersetzung von organischen Stoffen dar.

---

<sup>59</sup> bis auf wenige Realisierungen von PROSA für den Fall der Auswirkung von Gasbildung/-speicherung „mo“ (siehe Kap. 6.6.3, Probabilistische Modellrechnungen)

<sup>60</sup> vor allem der Sorption an den Versatzmaterialien im Grubengebäude



- Der Maximalwert der potenziellen Strahlenexposition wird meistens durch Radionuklidfreisetzungen aus dem ELB WSF verursacht. Radionuklidfreisetzungen aus dem ELB OF sind in den deterministischen Modellrechnungen immer von untergeordnetem Einfluss und in den probabilistischen Modellrechnungen selten dominant. Diese relative Bedeutung des ELB OF ergibt sich insbesondere aufgrund der großen Länge der Abdichtungen zum ELB OF. Die Radionuklidfreisetzung aus dem ELB NF bestimmt in gut 10 % der Realisierungen das Dosismaximum.
- Die dosisdominierenden Radionuklide sind in den meisten Fällen  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{14}\text{C}$  (als gelöstes  $^{14}\text{CH}_4$ ), und  $^{99}\text{Tc}$ . Die Rückhaltung der Actiniden im Hutgestein und Deckgebirge ist meistens vollständig. Für  $^{126}\text{Sn}$  sind die Ergebnisse sehr konservativ und auf die getroffene Annahme zurückzuführen, dass Zinn im Hutgestein und Deckgebirge nicht sorbiert.
- Bei geringer Sorption in Hutgestein und Deckgebirge (z. B. als Folge der Bildung einer neuen Wegsamkeit durch das Hutgestein nach wenigen 10 000 Jahren) ist mit einer Freisetzung der drei Actiniden-Zerfallsreihen 4N, 4N+2 und 4N+3 in das oberflächennahe Grundwasser zu rechnen. In diesem Fall wird die maximale potenzielle Strahlenexposition durch  $^{226}\text{Ra}$  (als Glied der  $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe) und dessen Zerfallsprodukte dominiert. Das Dosismaximum ist dann um ein bis zwei Größenordnungen höher als bei Sorption entsprechend der Referenzwerte, jedoch noch um den Faktor 2 oder mehr unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis, sofern die übrigen Systemparameter ungefähr den Referenzwerten entsprechen.
- Die Transportpfade, welche vom Salzspiegel durch das sogenannte intakte Hutgestein in den Oberkreidetrog führen und im Hutgestein keine oder nur eine geringe Sorptionskapazität aufweisen, verlaufen ab der Basis des Trogs dichtebedingt über eine Transportdistanz im Bereich von 100 m oder mehr in den Oberen Alleringerslebener Schichten. In den Modellrechnungen mit EMOS und PROSA wurden in pessimistisch vereinfachender Weise dennoch eine kurze Transportdistanz und eine hohe Transportgeschwindigkeit für diesen Transportabschnitt angenommen, welche in erster Linie die Konzentrationsverhältnisse innerhalb von Zerfallsreihen beeinflussen, jedoch keine eigentliche Barrierewirkung des Transportabschnitts zur Folge haben.

Nach den Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung (Kapitel 6.2) sind bei den Ausbreitungspfaden vom Typ (i) jedoch Transportzeiten nicht sorbierender Radionuklide von über 1000 Jahren für den Transportabschnitt entlang der Oberen Alleringerslebener Schichten zu erwarten, vergleichbar mit der Transportzeit durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) in den Modellrechnungen mit PROSA und EMOS. Außer für das Element Uran liegen zudem die Kd-Werte der potenziell dosisrelevanten Radionuklide in den Oberen Alleringerslebener Schichten innerhalb der in den Modellrechnungen angesetzten Bandbreite der Sorption für die Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge. Außer für die Freisetzung der Uran-Isotope und deren im Hutgestein und Deckgebirge durch Zerfall entstehenden Tochternuklide decken die Modellrechnungen damit auch den direkten Transport durch das Hutgestein entlang einer nichtsorbierenden Wegsamkeit ab. Aufgrund der nur in den Modellrechnungen mit EMOS berücksichtigten Trennung von Südfeld und Westfeld (vgl. Kapitel 3.3.2), welches den größten Anteil des  $^{238}\text{U}$ - und  $^{234}\text{U}$ -Inventars enthält, der wahrscheinlichen, in den Modellrechnungen jedoch vernachlässigten Ausbreitung von kontaminierter Lösung in Grubenbereiche außerhalb der Mischungsbereiche und der wahrscheinlichen, in den Modellrechnungen jedoch vernachlässigten Sorption von Uran am Salzbetonversatz, kann auch für nicht sorbierende Wegsamkeiten durch das Hutgestein von einer sicheren Unterschreitung des Wertes von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis ausgegangen werden.

Diese Argumente treffen auch auf das alternative Szenario „Entstehung alternativer Wegsamkeiten im Hutgestein“ zu und relativieren die für dieses Szenario ermittelten Maximalwerte der potenziellen Strahlenexposition.

- Keine der Systemeigenschaften zeigt eine ausgeprägte Korrelation mit dem zeitlichen Maximum der potenziellen Strahlenexposition. Dies bedeutet, dass die Langzeitsicherheit nicht von einer oder wenigen Sicherheitsfunktionen abhängt, sondern dass sich das System durch mehrere wirksame Sicherheitsfunktionen auszeichnet. Die wichtigsten, in den Modellrechnungen berücksichtigten Sicherheitsfunktionen sind

- die starke zeitliche Verzögerung des Lösungszutritts zu den meisten Abfällen,
- die geringe Auspressung von eventuell kontaminierter Lösung aus den Einlagerungsbereichen in die übrige Grube sowie von der übrigen Grube in das Hutgestein (geringe Konvergenzraten der Grubenbaue und geringe konvergierende Volumen),
- die Transportverzögerung in Hutgestein und Deckgebirge und
- die mehrstufige Verdünnung der Lösung aus den Einlagerungsgrubenbauen bei einem Transport bis in oberflächennahes Grundwasser.

Sie sind diversitär und ergänzen sich gegenseitig. Durch die lokalisierten Stellen, über die kontaminierte Lösung aus den Einlagerungsbereichen in die übrige Grube und aus der Grube in das Hutgestein austreten, ist auch die mehrstufige Mischung von kontaminierter Lösung mit nicht kontaminierter Lösung und die damit verbundene Verdünnung in der Grube gesichert. Eine weitere Verdünnung erfolgt beim Übertritt von kontaminierter Lösung in das oberflächennahe Grundwasser, eine Mindestverdünnung ist durch den hohen Salzgehalt der aus der Grube ausgepressten Lösung zwingend für die intensive Nutzung des Grundwassers als Trinkwasser und für die Herstellung von Lebensmitteln.

## 6.7 MODELLRECHNUNGEN ZUM RADIONUKLIDAUSTRAG IN DER GASPHASE

Die Szenarien für die Ermittlung der potenziellen Auswirkungen als Folge eines Radionuklidaustrags aus dem Endlager in der Gasphase wurden in Kapitel 4.5.3 kurz beschrieben. Sie betreffen die Freisetzung von  $^{14}\text{CH}_4$  in der Gasphase für die möglichen Entwicklungen des Endlagers „trockene Grube“ und „mit relevantem Lösungszutritt“<sup>61</sup>.

Für beide Szenarien setzen sich die Modellrechnungen aus folgenden Schritten zusammen:

- Berechnen des Druckanstiegs in der Gasphase in der Restgrube und Ermitteln des Zeitpunkts, zu dem der Übertritt von Gas aus der Grube in das Hutgestein einsetzt. Für die Berechnung des Druckanstiegs wird Gasbildung, Konvergenz und die Abnahme des gasgefüllten Gesamthohlraumvolumens durch den Lösungszutritt berücksichtigt. Als Kriterium für den beginnenden Gasaustritt in das Hutgestein wird entweder nur das Erreichen des hydrostatischen Lösungsdrucks im Höchsten des gasgesättigten Bereichs in der Grube oder das Erreichen der Summe dieses hydrostatischen Lösungsdrucks und des Gaseindringdrucks der Wegsamkeit im Hutgestein angesetzt.
- Ermitteln der  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration in der Gasphase zum Zeitpunkt des beginnenden Gasübertritts in das Hutgestein. Für diese Berechnung werden instantane Mobilisierung des  $^{14}\text{C}$  und Bildung des  $^{14}\text{CH}_4$ , die Abnahme des Inventars durch radioaktiven Zerfall sowie eine gute Durchmischung der Gasphase oder örtlich ähnliche Verhältnisse von  $^{14}\text{CH}_4$ - und Gasbildung angenommen. Die  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration ergibt sich dann aus dem  $^{14}\text{CH}_4$ -Inventar, dem Volumen der Gasphase, dem Gasdruck, der Lösungsmenge, jeweils zum Zeitpunkt des beginnenden Gasübertritts in das Hutgestein, sowie der Henry-Konstanten. Das Volumen der Gasphase hängt von der Gasbildung und dem Volumen der beim Endlagerverschluss eingeschlossenen Luft ab. Der Wert wurde, wie jener des Lösungsvolumens, den Modellrechnungen zum Lösungspfad entnommen.

Im Fall der „trockenen Grube“ wird ein vollständiger Übergang des  $^{14}\text{C}$ -Inventars in die Gasphase unterstellt (vgl. Kapitel 4.5.3). Für diesen Fall bezeichnet nachfolgend der Begriff  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration die  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Gasphase.

- Ermitteln der Rate des Gasübertritts aus der Restgrube in das Hutgestein. Die Methoden zur Berechnung dieser Größe unterscheiden sich in [Colenco 2009] und [GRS 2009b] signifikant. Dies wird weiter unten kurz ausgeführt. Der Umstand, dass beide Methoden zur gleichen Bewertung der potenziellen

<sup>61</sup> Szenariengruppe „Natürliche Entwicklung / mit relevantem Lösungszutritt / Radionuklidtransport in der Gasphase“

Auswirkungen einer Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad führen, verstärkt die Zuverlässigkeit der Schlussfolgerung.

- Die Übertrittsrate des  $^{14}\text{CH}_4$  in das Hutgestein ergibt sich als Produkt der  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration zu Beginn des Gasaustritts und der Gasaustrittsrate aus dem Endlager. Mit fortschreitender Zeit nimmt die  $^{14}\text{CH}_4$ -Übertrittsrate durch radioaktiven Zerfall ab.
- Der Transport durch das Hutgestein und das Deckgebirge wird – außer bei den Modellrechnungen mit dem 2-Phasen-Fluss-Programm TOUGH2, s. u. – als instantan angenommen und die Abnahme der  $^{14}\text{CH}_4$ -Konzentration in der Gasphase durch radioaktiven Zerfall entsprechend vernachlässigt. Außer bei den Modellrechnungen mit TOUGH2 bleibt auch der Übertritt von  $^{14}\text{CH}_4$  aus der Gasphase in das Grundwasser von Hutgestein und Deckgebirge und die daraus resultierende Abnahme der  $^{14}\text{CH}_4$ -Freisetzungsrates in der Gasphase in konservativer Weise unberücksichtigt. Die Übertrittsrate des  $^{14}\text{CH}_4$  in das Hutgestein entspricht somit in den Modellrechnungen der Freisetzungsrates in die Biosphäre<sup>62</sup>.
- Als Referenzfall für die Biosphäre wird angesetzt, dass die Freisetzung in eine landwirtschaftlich genutzte Fläche von 1 ha erfolgt, von der sich eine kleine Gruppe von Personen ausschließlich ernährt. Dazu wird in konservativer Weise angenommen, dass das  $^{14}\text{CH}_4$  in den ungesättigten Bodenschichten vollständig in  $^{14}\text{CO}_2$  umgewandelt wird, bevor es in die bodennahe Luftschicht austritt oder durch perkolierendes Niederschlagswasser gelöst wird und in das genutzte Grundwasser gelangt. Die Strahlenexposition nach dem Übertritt in die Luft erfolgt im Modell durch Assimilation des  $^{14}\text{CO}_2$  durch Pflanzen der Nahrungsmittelkette und durch Inhalation. Bei einer Wiederauflösung von  $^{14}\text{CO}_2$  im Grundwasser bewirkt dessen Nutzung als Trinkwasser und zur Erzeugung von Lebensmitteln eine Strahlenexposition. Die Berechnung folgt der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV.

In [Colenco 2009] wird als alternativer und extremer Fall zusätzlich untersucht, welche potenzielle Strahlenexposition die Kanalisierung des aufsteigenden Gases in Oberflächennähe durch eine Gasbarriere (z. B. eine Schicht mit hohem Gaseindringdruck), die anschließende örtlich konzentrierte Freisetzung in den unbefestigten Keller eines Wohnhauses und die Inhalation des  $^{14}\text{CO}_2$  durch dessen Bewohner hätte.

Weitere Angaben zu den Modellkonzepten enthalten Anhang P in [Colenco 2009] und [GRS 2009b].

### Freisetzung in der Gasphase bei „trockener“ Grube

Überschlagsrechnungen mit den Referenzparametern zeigen, dass es – je nach Gasdurchlässigkeit der Abdichtungen des ELB WSF – etwa 30 000 Jahre bis weit mehr als 50 000 Jahre dauert, bis der Gasdruck in der Restgrube den hydrostatischen Druck am Salzspiegel (2,4 MPa) überschreitet. Bis dahin ist das  $^{14}\text{C}$  aber weitgehend zerfallen.

Wie die nachfolgend erläuterten Modellrechnungen mit dem 2-Phasen-Fluss-Programm TOUGH2 zeigen, kann der Gasfluss in die Biosphäre in zulässiger Näherung durch die Abnahme des Gesamthohlraumvolumens in der Grube als Folge der Konvergenz, umgerechnet vom Gasdruck in der Grube bei Einsetzen des Gasaustritts auf Atmosphärendruck, abgeschätzt werden.

Im Fall der „trockenen“ Grube ist die maximale Freisetzungsrates von  $^{14}\text{CH}_4$  in die Biosphäre trotz der anfänglich höheren  $^{14}\text{C}$ -Konzentration in der Gasphase im Endlager um rund drei Größenordnungen geringer als im Fall mit relevantem Lösungszutritt in die Restgrube [GRS 2009b]. Auf eine weitere Diskussion des Falls „trockene Grube“ wird deshalb hier verzichtet.

### Freisetzung in der Gasphase bei relevantem Lösungszutritt in die Restgrube

In [Colenco 2009] wurden der Übertritt von Gas aus der Salzstruktur in das Hutgestein und der Gasaufstieg durch das Hutgestein mit dem 2-Phasen-Fluss-Programm TOUGH2 [Pruess 1999] modelliert. Das Modell

<sup>62</sup> Die Lösung von Gas im Grundwasser von Hutgestein und Deckgebirge ist auch in den Modellrechnungen mit TOUGH2 ein Prozess mit geringem Einfluss. Die Aussage gilt somit näherungsweise für alle Modellrechnungen.



umfasst den obersten Bereich des Grubengebäudes und die als widerstandsfrei angenommene Wegsamkeit durch das Salinar zum Salzspiegel in starker, stilisierter Vereinfachung sowie die darüber anschließende, als Transportweg betrachtete Struktur des Hutgesteins. Im Modell ist dies entweder die Schichtenfolge DGL oder ein homogener Zylinder „intakten“ Hutgesteins. Der Fluss innerhalb der Schichtenfolge DGL erfolgt durch den tonig-schluffigen Salzton. Tone weisen allerdings häufig sehr hohe Gaseindringdrücke auf, so dass die Schichtenfolge DGL für den Gaspfad – im Unterschied zum Lösungspfad – keinen präferenziellen Fließweg darstellt. Deshalb wird alternativ zur Schichtenfolge DGL das „intakte“ Hutgestein als Transportweg betrachtet. Dabei wird angenommen, dass die geringe Durchlässigkeit des „intakten“ Hutgesteins durch ein vernetztes System teilweise geöffneter, dünner Klüfte erzeugt wird, welche einen relativ niedrigen Gaseindringdruck aufweisen. In diesem Fall kann der Transport durch das Hutgestein über einen großen Querschnitt mit vielen vernetzten Klüften erfolgen. Dies kompensiert die geringe hydraulische Durchlässigkeit des intakten Hutgesteins.

Die Auswirkungen von Konvergenz und Gasbildung werden im Modell durch geeignet gewählte und parametrisierte Randbedingungen simuliert.

Als Übertrittsfläche in das Hutgestein am Salzspiegel wurde für die Modellrechnung mit der Schichtenfolge DGL eine Fläche<sup>63</sup> von 250 m<sup>2</sup>, für jene mit dem „intakten“ Hutgestein ein ungünstig großer Wert von 314 m<sup>2</sup> (Radius 10 m) angenommen. Die Transportdistanz für das Gas im Modell wurde in Anlehnung an die geometrischen Abmessungen des Hutgesteins über dem Zentralteil der Grube Bartensleben angesetzt. Das Modell schließt damit das Deckgebirge und dessen Auswirkungen auf den Gasaufstieg nicht mit ein. Der Transport durch das Deckgebirge geht als instantaner Prozess in die Berechnung der Freisetzungsrates in die Biosphäre ein.

Die Modellrechnungen mit dem Programm TOUGH2 wurden sowohl für Referenzwerte der Parameter als auch für zahlreiche und breite Variationen der Parameter durchgeführt. Untersucht wurde zum einen der Einfluss der Verhältnisse im Grubengebäude wie z. B. die Wirksamkeit der Abdichtung des ELB WSF hinsichtlich Rückhaltung von Gas (und damit auch des <sup>14</sup>CH<sub>4</sub>) im Einlagerungsbereich, der Gasbildung, der Konvergenz und der Übertrittsfläche in das Hutgestein. Gegenstand einer weiteren Serie von Parametervariationen waren die hydraulischen Eigenschaften der Wegsamkeit im Hutgestein und insbesondere auch ihre 2-Phasen-Eigenschaften. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen (Anhang P in [Colenco 2009]):

- Aufgrund des geringeren Gaseindringdrucks setzt der Übertritt von Gas in das „intakte“ Hutgestein früher ein als in die Schichtenfolge DGL. Außer bei geringen Unterschieden des Gaseindringdrucks oder bei sehr niedriger Permeabilität des intakten Hutgesteins bleibt der Druckanstieg im Grubengebäude verhältnismäßig gering (< ca. 0,6 MPa), so dass ein Eindringen von Gas in und damit ein Gasfluss entlang der Schichtenfolge DGL sehr unwahrscheinlich ist.
- Der Übertritt von Gas aus der Grube in das Hutgestein setzt relativ bald nach dem Ende des Lösungszutritts in die Restgrube ein. Die Gasfront steigt danach rasch durch das Hutgestein auf, so dass die Gasfreisetzung in die Biosphäre (ohne Berücksichtigung der Transportverzögerung im Deckgebirge) nach einigen hundert bis wenigen tausend Jahren beginnt. Anschließend steigt die Gasfreisetzungsrates innerhalb von wenigen tausend Jahren auf einen mehr oder weniger stationären Wert an.
- In keinem der Rechenfälle für die Wegsamkeit „intaktes“ Hutgestein und nur bei geringem Gaseindringdruck der Schichtenfolge DGL (und gleichzeitig unterdrücktem Transport durch das „intakte“ Hutgestein) steigt die Gasfreisetzungsrates zunächst auf einen hohen Wert an, bevor sie auf einem niedrigeren Niveau ungefähr stationär wird. Die näherungsweise, analytische Berechnung der für die Langzeitsicherheit maßgebenden Gasfreisetzungsrates unter Annahme von stationären Bedingungen ist deshalb zulässig. Bei diesen Berechnungen sind außer dem Gaseindringdruck der Wegsamkeit im Hutgestein – und dieser in einfach nachvollziehbarer Weise – keine 2-Phasen-Effekte von Einfluss. Dies ermöglicht die Überprüfung der Modellergebnisse und fördert das Vertrauen in die berechnete Freisetzungsrates von <sup>14</sup>CH<sub>4</sub>.

<sup>63</sup> in Anlehnung an die Begründung für den Transportquerschnitt, der für die Berechnung des Radionuklidtransports in Lösung gewählt wurde (vgl. Kapitel 6.2)



- Das Maximum der Gasaustrittsrate aus dem Modell und damit die maximale Gasfreisetzungsrates in die Biosphäre variiert in allen Modellrechnungen zur Wegsamkeit „intaktes“ Hutgestein um weniger als einen Faktor 6. (Dies entspricht nicht der Variabilität der sich daraus ableitenden Strahlenexposition, da die Zeitpunkte und damit der Einfluss des radioaktiven Zerfalls unterschiedlich sind.) Die Gasaustrittsrate ergibt sich im Wesentlichen aus der Abnahme des Gesamthohlraumvolumens in der Restgrube – bei gasdurchlässigem Abdichtsystem des ELB WSF oder ELB OF zuzüglich der Abnahme des Gesamthohlraumvolumens im betroffenen Einlagerungsbereich – als Folge der Konvergenz beim sich einstellenden Fluiddruck in der Grube.
- Der Druckanstieg im Grubengebäude beträgt in allen Modellrechnungen zur Wegsamkeit „intaktes“ Hutgestein 0,6 MPa oder weniger, außer bei Annahme eines sehr hohen Gaseindringdrucks der Wegsamkeit von 1 MPa oder einer sehr geringen Permeabilität des „intakten“ Hutgesteins von  $5 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ . In den beiden letztgenannten Fällen liegt der Druckanstieg im Grubengebäude im Bereich von 1,5 MPa.

Die in [Colenco 2009] berechneten potenziellen Strahlenexpositionen als Folge einer Radionuklidfreisetzung auf dem Gaspfad in eine landwirtschaftlich genutzte Fläche liegen zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-5}$  mSv/a, sofern die Abdichtungen zu den Einlagerungsbereichen WSF und OF gasdicht sind. Diese Berechnungen vernachlässigen die Wiederauflösung des in der ungesättigten Bodenschicht aus der Oxidation von  $^{14}\text{CH}_4$  entstandenen  $^{14}\text{CO}_2$  im genutzten Grundwasser<sup>64</sup>. Im Fall mit gasdurchlässigem Abdichtsystem zum ELB WSF beträgt die analog berechnete maximale Strahlenexposition 0,00011 mSv/a. Im extremen Fall einer Freisetzung in den Keller eines Wohnhauses ist die berechnete Strahlenexposition um den Faktor 25 höher. Alle berechneten Dosiswerte liegen damit sehr deutlich unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis. Mit den Referenzwerten der Parameter (u. a. gasundurchlässiges Abdichtsystem des ELB WSF) beträgt die ermittelte Freisetzungsrates von  $^{14}\text{C}$  in die Biosphäre  $1,3 \cdot 10^6$  Bq/a.

In [GRS 2009b] wurde die Rate des Gasübertritts aus dem Grubengebäude in das Hutgestein – und damit die Rate der Gasfreisetzung in die Biosphäre – zum einen für das Gas aus der Restgrube (mit dem  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB NF) und zum andern für das Gas aus dem ELB WSF berechnet. Aufgrund der Abdichtungen zwischen dem ELB WSF und der Restgrube treten diese Gasübertritte in das Hutgestein zeitlich getrennt auf. Der Gasübertritt aus der Restgrube wurde unter der pessimistischen Annahme berechnet, dass zwei Wegsamkeiten zwischen der Grube und dem Hutgestein bestehen, von denen eine vom Grubenhöchsten und die andere von einem etwas tieferen Ort in der Grube weggeht. Damit setzt der Gasübertritt über die erstgenannte Wegsamkeit ein, sobald der Gasdruck in der Restgrube den hydrostatischen Druck im Grubenhöchsten überschreitet. Über die andere Wegsamkeit tritt weiterhin Lösung aus dem Hutgestein in die Restgrube zu. Der Gasübertritt endet mit dem Volllaufen der Restgrube. Mit dieser Annahme und dem Referenzwert für den Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube dauert der Gasübertritt in das Hutgestein rund 2800 Jahre und endet 7500 Jahre nach Endlagerverschluss. Die Rate des Gasübertritts wird während dieser Zeit als konstant angenommen. Der Gasübertritt aus dem ELB WSF setzt erst ein, wenn der Gasdruck im Einlagerungsbereich den hydrostatischen Druck in der Restgrube erreicht. Dieser Zeitpunkt und die anschließende Dauer des Gasübertritts aus dem ELB WSF wurden der deterministischen Modellrechnung mit EMOS für den Referenzfall, Variante  $p_E = 0,2$  MPa, entnommen (vgl. Kapitel 6.6.3). Der Gasübertritt aus dem ELB WSF in die Restgrube erfolgt im Referenzfall nach gut 30 000 Jahren und dauert 80 Jahre. Unter der Annahme, dass der Transport durch die Restgrube ohne weitere Zeitverzögerung und zeitliche Streckung erfolgt, gelten Zeitpunkt und Dauer auch für den Gasübertritt in das Hutgestein. Mit diesen Modellannahmen ergeben sich Freisetzungsrates von  $^{14}\text{C}$  in die Biosphäre von  $1,1 \cdot 10^7$  Bq/a für das  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB NF und von  $6,9 \cdot 10^8$  Bq/a für das  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB WSF. Diese Ergebnisse sind um die Faktoren 8 bzw. 17 größer als vergleichbare Ergebnisse in [Colenco 2009].

Die in [GRS 2009b] ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen betragen für dieses Szenario bei einer Freisetzung in die Atmosphäre über landwirtschaftlich genutzter Fläche 0,0019 mSv/a bei der Freisetzung aus dem ELB WSF und rund 60mal weniger als Folge der Freisetzung von  $^{14}\text{C}$  aus dem ELB NF. Sofern das  $^{14}\text{C}$  oberflächennah in genutztes Grundwasser übergeht und dieses zur Lebensmittelerzeugung verwendet

<sup>64</sup> Die potenzielle Strahlenexposition als Folge der Wiederauflösung des entstehenden  $^{14}\text{CO}_2$  im oberflächennahen Grundwasser wird später angesprochen.

wird, ergibt sich eine potenzielle Strahlenexposition von 0,018 mSv/a für die Freisetzung aus dem ELB NF und rund 50mal weniger für die Freisetzung aus dem ELB WSF<sup>65</sup>.

In Anbetracht der pessimistischen Annahmen in [GRS 2009b] bei der Ermittlung der Gasfreisetzungsraten führen beide Modellrechnungen übereinstimmend zum Ergebnis, dass die potenzielle Strahlenexposition als Folge einer Freisetzung von Radionukliden in der Gasphase deutlich unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis liegt.

In der Atmosphäre entsteht durch natürliche Prozesse dauernd <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>. Dadurch besteht in der Biosphäre ein natürliches, konstantes Isotopenverhältnis <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C von 226 Bq/kg<sub>C</sub>. Nach dem Modell für die Freisetzung von <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> aus dem ELB WSF in die Atmosphäre von [GRS 2009b] erhöht sich dieser Wert über der betrachteten landwirtschaftlich genutzten Fläche um rund 3%. Dies ist ein weiterer Indikator, der zeigt, dass die Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad zu keinen relevanten Auswirkungen in der Biosphäre führt.

## 6.8 MODELLRECHNUNGEN ZUM MENSCHLICHEN EINDRINGEN

Die für die Bewertung der potenziellen Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens betrachteten Szenarien werden durch das Abteufen einer Bohrung in den ELB WSF ausgelöst, die nach Beendigung der Bohrtätigkeit rückgebaut und sachgemäß verfüllt wird. Die Beschreibung der Szenarien erfolgte in Kapitel 4.5.4.

Bei der Entwicklung „trockene Grube“ tritt Lösung ausschließlich entlang der Bohrung in den ELB WSF zu. Unter Annahme von plausiblen Werten für die Charakteristiken der Bohrung wurde die Zutrittsrate für atmosphärischen Druck im Einlagerungsbereich berechnet. Aufgrund des ansteigenden Drucks der Gasphase im Einlagerungsbereich nimmt die Zutrittsrate mit fortschreitender Zeit ab. Die Modellrechnungen zur Konvergenz der Grubenbaue in den Einlagerungsbereichen WSF und OF für den Fall der „trockenen“ Grube (vgl. Kapitel 6.5) ergeben andererseits die nach 1 Mio. Jahren noch vorhandenen fluidzugänglichen Volumen in den beiden Einlagerungsbereichen. Diese sind für beide Einlagerungsbereiche größer als die während dieser Zeitperiode entlang der Bohrung zugetretene Lösungsmenge, selbst wenn die Abnahme der Zutrittsrate als Folge des Druckanstiegs in den Einlagerungsbereichen vernachlässigt wird [GRS 2009b]. Während des Betrachtungszeitraums von einer Million Jahren kann somit bei der Entwicklung „trockene Grube“ keine Lösung entlang der Bohrung austreten, sofern die Bohrung den Einlagerungsbereich auf einer der oberen Sohlen trifft.

Im zweiten zu untersuchenden Szenario werden ein rasches Volllaufen der Restgrube nach dem Verschluss der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie und ein Durchkorrodieren der Abdichtungen zum ELB WSF entsprechend dem Referenzfall (Lösungspfad) unterstellt. Bei der Ausbildung einer großen Gasblase im Endlager an der Übertrittsstelle vom Grubengebäude in das Hutgestein, dem Ort des Lösungszutritts in die Restgrube, steigt der Fluiddruck im Grubengebäude aufgrund des hydraulischen Widerstands des Deckgebirges und der 2-Phasen-Effekte im Bereich der Übertrittsstelle bei Annahme der Referenzwerte für die entsprechenden Parameter um rund 0,6 MPa, unter extremen Bedingungen bis um 2 MPa über den hydrostatischen Wert an (Kapitel 6.7 sowie Anhang P in [Colenco 2009]). Unterstellt man, mit einem zusätzlichen Sicherheitszuschlag, einen Lösungsüberdruck im Einlagerungsbereich von 2,5 MPa sowie lösungsgesättigte Verhältnisse am Ort, wo die Bohrung den Einlagerungsbereich trifft, dann treten entlang der Bohrung jährlich 2,7 l Lösung aus dem Einlagerungsbereich in das Hutgestein über. Dieser Wert beruht auf der Annahme der gleichen Charakteristiken der Bohrung wie beim Szenario für die Entwicklung „trockene Grube“, u. a. eine ungünstig hohe hydraulische Durchlässigkeit von 10<sup>-8</sup> m/s.

---

<sup>65</sup> Der Übertritt von <sup>14</sup>C in das Grundwasser hängt vom Isotopenverhältnis <sup>14</sup>C:<sup>12</sup>C in der Gasphase ab. Dieses ist unterschiedlich in den Gasphasen der beiden Einlagerungsbereiche zum Zeitpunkt der entsprechenden Freisetzungen in die Biosphäre. Dies erklärt die unterschiedliche Bedeutung der beiden Einlagerungsbereiche bei den zwei Expositionspfaden.

Für die quantitative Abschätzung der potenziellen Auswirkungen dieses Lösungsaustritts werden zwei weitere einfache Annahmen getroffen: (1) Die Radionuklidkonzentration in der entlang der Bohrung austretenden Lösung entspricht der über den Einlagerungsbereich gemittelten Radionuklidkonzentration in Lösung bei vollständiger Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen. (2) Die entlang der Bohrung in das Hütgestein austretende Lösung gelangt in das oberflächennahe Grundwasser und wird nach der Verdünnung in einem Grundwasserfluss von  $10\,000\text{ m}^3/\text{a}$  (untere Grenze der Bandbreite gemäß Kapitel 4.5.2, Unterkapitel Referenzszenario) genutzt.

Mit diesen Annahmen ergibt sich für die potenzielle Strahlenexposition als Folge eines menschlichen Eindringens ein Wert von  $0,0002\text{ mSv/a}$  [Colenco 2009].

Die Bewertung der möglichen Arten eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager oder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich der Plausibilität (Kapitel 4.5.4) und die oben dargestellte Abschätzung der potenziellen Auswirkungen der einzigen plausiblen Einwirkung, dem Abteufen einer Explorationsbohrung, ergeben, dass ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen keine relevante Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des Endlagers zur Folge hat.

## 6.9 BEURTEILUNG DER GEWÄHRLEISTUNG DER UNTERKRITIKALITÄT

Als Folge der in den Endlagerbedingungen festgeschriebenen radionuklidspezifischen Inventarbegrenzungen enthalten die eingelagerten Abfälle nur sehr geringe Mengen an Spaltstoffen. Die eingelagerten Spaltstoffmassen der relevanten, durch thermische Neutronen spaltbaren Radionuklide  $^{233}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  und  $^{241}\text{Pu}$  sind, summiert über das gesamte Endlager, um mindestens eine Größenordnung kleiner als die entsprechenden kritischen Massen bei Kugelform, ohne „Verdünnung“ durch andere Stoffe sowie optimaler Moderation und Reflexion durch Wasser. Die eingelagerte Masse an  $^{235}\text{U}$  im gesamten Endlager übersteigt zwar die analog definierte kleinste kritische Kugelmasse von  $800\text{ g}$  um knapp  $30\%$ , nicht jedoch die in den einzelnen Einlagerungshohlräumen eingelagerten Mengen. Auch summiert über alle Einlagerungshohlräume des Westfelds, dem Endlagerbereich mit dem höchsten  $^{235}\text{U}$ -Inventar, wird die kleinste kritische Masse noch nicht erreicht. Durch den radioaktiven Zerfall des Vorläufernuklids  $^{239}\text{Pu}$  steigt die  $^{235}\text{U}$ -Masse im Laufe der Zeit im Endlager nur noch um rund  $3\%$  an.

Die Möglichkeit einer Kritikalität in der Phase nach Verschluss des Endlagers kann damit aufgrund von einfachen Mengenüberlegungen ausgeschlossen werden. Ergänzende Angaben enthält [BfS 2006].

## 7 WERTUNG UND SCHUSSFOLGERUNGEN

Die radiologischen Schutzziele zur Langzeitsicherheit umfassen den Schutz kommender Generationen vor unzulässigen Auswirkungen durch Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen und die Gewährleistung der Unterkritikalität im Endlager. Das Sicherheitskonzept und die darauf aufbauenden, geplanten Verfüll- und Verschlussmaßnahmen gewährleisten das Einhalten dieser Schutzziele. Dies wurde in den vorangegangenen Kapiteln dargelegt. Im vorliegenden Kapitel werden die Nachweise zur radiologischen Langzeitsicherheit einer zusammenfassenden Wertung unterzogen. Maßgebend ist die mögliche Freisetzung von Radionukliden aus dem Endlager. Eine solche kann – bei relevantem Lösungszutritt in die Restgrube – auf dem Lösungs- und auf dem Gaspfad stattfinden.

### 7.1 WERTUNG DER QUALITATIVEN ANALYSE

Das System „Endlager Morsleben“ ist ein im Detail komplexes System, dessen Zustand und künftige Entwicklung von zahlreichen internen und externen Einflussfaktoren abhängen und das diesbezüglich einen hohen Grad an Ungewissheiten aufweist. Beispielhaft zu nennen sind Zeit, Ort und Rate eines eventuellen künftigen Lösungszutritts in das Grubengebäude, die Rückhaltung von Gas durch den eingebrachten Versatz, insbesondere durch die Abdichtungen, und – nach einem Lösungszutritt – die Zusammensetzung der Lösungen, welche die Abdichtungen erreichen. Entsprechend beruhen das Sicherheitskonzept, die darauf aufbauenden Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des Endlagers und der Nachweis der Langzeitsicherheit auf einer umfassenden Analyse von gesicherten und möglichen Sachverhalten, Ereignissen und Prozessen (FEP) mit Einfluss (oder möglichem Einfluss) auf die Langzeitsicherheit.

Zahlreiche Einflussfaktoren und Prozesse beeinflussen die künftige Entwicklung des Endlagersystems. Verschiedene Prozesse können dabei sowohl einen günstigen als auch einen ungünstigen Einfluss auf die Langzeitsicherheit ausüben. Bei einem Lösungszutritt in die Restgrube behindert z. B. eine hohe Gasbildungsrate zunächst einen Lösungszutritt in die abgedichteten Einlagerungsbereiche und verringert die zutretende Lösungsmenge, kann aber später das Auspressen von kontaminierter Lösung aus dem Einlagerungsbereich verstärken. Ein weiteres Beispiel ist die Konvergenzrate: Eine hohe Konvergenzrate verkürzt die Phase eines potenziellen Lösungszutritts und führt zu frühem Auspressen von Lösung mit hoher Rate. Sie bewirkt aber auch – besonders wenn die Restgrube erst spät vollläuft – geringere fluidzugängliche Volumina in den Einlagerungsbereichen, eine verminderte Zugänglichkeit der Abfälle für Lösung, eine frühere Stützwirkung des Versatzes und letzten Endes geringere Auspressraten zu späteren Zeiten.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit deckt eine große Zahl von möglichen Zuständen und künftigen Entwicklungen des Gesamtsystems ab. Er beruht auf einer modellhaften Nachbildung der maßgebenden Prozesse in Verbindung mit einer abstrahierten Darstellung des Endlagersystems. Verschiedene, für die Langzeitsicherheit günstige Sachverhalte und Prozesse bleiben beim Nachweis komplett unberücksichtigt oder werden nur in stark vereinfachter, konservativer Weise einbezogen.

Insgesamt beruht die Langzeitsicherheit auf dem Wirken verschiedener Sachverhalte und Prozesse, die diversitär sind und sich gegenseitig ergänzen. Die Langzeitsicherheit hängt nicht von der Wirksamkeit einer einzelnen, ausgezeichneten Sicherheitsfunktion ab. Die im Nachweis der Langzeitsicherheit belasteten Sachverhalte und Prozesse werden nachfolgend nochmals zusammengestellt. Gleichzeitig wird aufgezeigt, von welchen Sachverhalten und Prozessen der Langzeitsicherheitsnachweis nicht abhängt, d. h. welche der bestehenden Ungewissheiten ohne Einfluss auf den Nachweis sind. Abschließend wird zusammenfassend dargelegt, welche günstigen, die Langzeitsicherheit fördernden Prozesse im Nachweis unberücksichtigt bleiben.

Angesichts der begrenzten Zahl der im Nachweis der Langzeitsicherheit belasteten Sachverhalte und Prozesse ist die durchgeführte qualitative Systemanalyse trotz des im Detail komplexen Endlagersystems und der bestehenden Ungewissheiten vollständig. In den Grenzen der praktischen Vernunft gibt es keine Zu-



stände und Entwicklungen des Endlagersystems, die vom durchgeführten Langzeitsicherheitsnachweis nicht abgedeckt sind.

Die nachfolgende Aufzählung von Sachverhalten, Ereignissen und Prozessen (FEP) und die Darlegung ihrer Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN) bei relevantem Lösungszutritt in das Grubengebäude zeigen, dass die für den Nachweis relevanten FEP verlässlich und ausreichend gut bekannt sind. Zusammen mit den Ergebnissen der quantitativen Analysen folgt daraus, dass das System „Endlager Morsleben“ robust ist.

Sachverhalt, Ereignis, Prozess	Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)
Lösungszutritt in die Restgrube - Ort des Lösungszutritts  - Rate des Lösungszutritts	Der Ort des Lösungszutritts ist ohne Bedeutung für den LZSN. Ein Lösungszutritt in die Grube Marie führt zu einem späteren Vordringen von Lösung zu den Abdichtungen der ELB als ein Zutritt in die Grube Bartensleben. (vgl. Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube).  Die Rate des Lösungszutritts bestimmt den → Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube
Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube	Der LZSN geht von einem Volllaufen während wenigen 1000 Jahren bis mehr als 20 000 Jahren aus. Diese Bandbreite beruht auf den Modellergebnissen zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge und schließt auch das Auftreten von wenig plausiblen, hohen Lösungszutrittsraten ein. Die Modellrechnungen zeigen, dass der Zeitpunkt des Volllaufens – außer beim Zusammentreffen von mehreren ungünstigen FEP – nur von mäßigem Einfluss auf die Ergebnisse des LZSN ist. Die potenziellen Auswirkungen eines sehr raschen (instantanen) Volllaufens der Restgrube werden im Rahmen eines „what-if“-Szenario zur Ergänzung des Nachweises der Robustheit des Endlagersystems ebenfalls untersucht.
Auflösung von Halit und Umlösung an Kalisalzen	Der LZSN schließt den Zutritt von teil- und ungesättigten Lösungen, deren Aufsättigung im Grubengebäude an Halit und die Umlösung an Kalisalzen bis zum invarianten Punkt IP21 ein. Wesentlich für den Nachweis ist, dass die Aufsättigung am Halit keine Beeinträchtigung der Barrieren der abgedichteten ELB und keine erheblichen gebirgsmechanischen Auswirkungen im Hutgestein und im Deckgebirge zur Folge hat.
Komponenten der Barriere um abgedichtete ELB - intaktes Steinsalz  - Abdichtungen in den Auffahrungen  - potenziell hydraulisch leitende Horizonte  - potenziell umlösbbare Schichten	Das die abgedichteten ELB umgebende intakte Steinsalz wird als undurchlässig angenommen. Dies ist wesentlich für den LZSN. Wesentlich ist ebenfalls, dass sämtliche potenziellen Wegsamkeiten durch das Salzgestein zwischen dem ELB und der Restgrube bzw. dem Hutgestein / Deckgebirge (Auffahrungen, potenziell leitende Horizonte wie Hauptanhydritschollen, umlösbbare Schichten wie Kalilager) identifiziert und quantitativ berücksichtigt wurden.  Die Abdichtungen in den Auffahrungen behindern den → Lösungszutritt aus der Restgrube in den ELB. Wesentlich für den LZSN ist die Zeitspanne der Behinderung, welche vor allem durch den anfänglichen hydraulischen Widerstand bestimmt wird. Eine mögliche Begrenzung dieser Zeitspanne ist durch die → Korrosion der Abdichtungen durch Wechselwirkung mit eindringender Lösung gegeben.  Als potenziell hydraulisch leitender Horizont durch die Barriere eines abgedichteten ELB wird im LZSN der Hauptanhydrit zwischen dem Zentralteil und dem ELB OF betrachtet.  Als potenziell umlösbbare Schicht wird das Kalilager C zwischen den Unterwerksbauten des Südfeldes (ELB WSF) und dem Zentralteil betrachtet.



Sachverhalt, Ereignis, Prozess	Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)
Gasbildung in der übrigen Grube	Die Gasbildung in der übrigen Grube kann den Lösungsfluss und dadurch auch den → Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge beschleunigen. In den Modellrechnungen mit PROSA wird angenommen, dass die Gasbildung zeitlich begrenzt erfolgt, zum → Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube weitgehend abgeschlossen ist und daher keinen oder höchstens einen geringen Einfluss auf das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein hat. Diese Annahme ist von wesentlicher Bedeutung für den LZSN. Der potenzielle Effekt der Gasbildung in der Restgrube wird durch andere FEP abgedeckt. In den Modellrechnungen mit EMOS wird der Effekt explizit berücksichtigt.
Konvergenz der ELB	Die Konvergenz der ELB bewirkt – evtl. zusammen mit der Gasbildung im jeweiligen ELB – das Auspressen von (kontaminierter) Lösung aus den ELB in die übrige Grube. Der Umstand, dass die Konvergenzraten der ELB niedrig sind, ist von wesentlicher Bedeutung für den LZSN.
Konvergenz der Grubenbaue in der übrigen Grube	Die Konvergenz der Grubenbaue in der übrigen Grube bewirkt einerseits die Lösungsbewegung im Grubengebäude. Diesbezüglich ist sie für den LZSN ohne Einfluss.  Die Konvergenz der Grubenbaue in der übrigen Grube ist andererseits der wesentliche Prozess für das Auspressen von (kontaminierter) Lösung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein sowie für den Lösungsfluss und dadurch auch den → Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge. Der Umstand, dass die Konvergenzraten der Grubenbaue in der übrigen Grube niedrig sind, ist von wesentlicher Bedeutung für den LZSN.
Strömungswiderstände im Grubengebäude	Die einzigen für den LZSN relevanten Strömungswiderstände sind jene der potenziellen Wegsamkeiten durch die → Barrieren der abgedichteten ELB: Abdichtungen in Auffahrungen, potenziell leitende Horizonte. Andere Strömungswiderstände in der Grube werden nicht belastet.

Sachverhalt, Ereignis, Prozess	Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)
Transportverzögerung im Grubengebäude	<p>Die Transportverzögerung in den Abdichtungen der ELB ist formal Bestandteil des LZSN, wegen vernachlässigter Sorption in den Abdichtungen aber meistens gering. Für den weiteren Transport bis zur Übertrittsstelle in das Hutgestein wird im LZSN angenommen, dass es keine Transportverzögerung im Grubengebäude gibt.</p> <p>Die einzige Ausnahme bildet <math>^{226}\text{Ra}</math> aus der Radium-VBA, für das eine Transportverzögerung durch rein diffusiven Transport durch den Salzbetonversatz des Streckenstummels bis in durchströmbare Grubenbau des ELB OF mit Rückhaltung durch Sorption am Salzbeton angenommen wird. Diese Transportverzögerung ist wesentlich für den LZSN, sie beruht auf belastbaren Sachverhalten.</p>
Verdünnung im Grubengebäude	<p>Für den LZSN von primärer Bedeutung ist der Aktivitätsfluss (z. B. in Bq/a) eines Radionuklids<sup>66</sup>, mit dem dieses in das Hutgestein ausgepresst wird, nicht jedoch die Radionuklidkonzentration (z. B. in Bq/m<sup>3</sup>) in der ausgepressten Lösung, die sich aus dem Aktivitätsfluss und der Lösungsauspressrate ergibt.</p> <p>Die Verdünnung im Grubengebäude ist deshalb nur dann von Bedeutung für den LZSN, wenn sie zu einer Verlängerung der Zeitperiode führt, während der eine gewisse Menge an Radionukliden in das Hutgestein ausgepresst wird.</p> <p>Das Modell setzt ein relativ kleines Mischungsvolumen in der übrigen Grube voraus, in das im Modell die Radionuklide aus den ELB übertreten und durch das im Modell der gesamte Lösungsfluss aus dem Grubengebäude in das Hutgestein geführt wird. Dadurch beruht der LZSN auf einer Verdünnung der o. g. Art, die nur für kurzzeitig andauernde Austritte von Radionukliden aus einem ELB eine dämpfende Wirkung besitzt. Jedoch auch ohne diese Verdünnung im Grubengebäude würden solche kurzzeitig andauernden Austritte aus einem ELB und dann aus dem Grubengebäude durch die anschließende Dispersion beim Transport durch das Hutgestein und Deckgebirge zu zeitlich ausgehenden Freisetzungen in das oberflächennahe Grundwasser führen.</p> <p>Die Verdünnung im Grubengebäude ist deshalb nicht von wesentlicher Bedeutung für den LZSN.</p>

<sup>66</sup>

sofern die Rate der Lösungsauspressung aus der Salzstruktur in das Deckgebirge kleiner als 0,2 % des verdünnenden oberflächennahen Grundwasserflusses, bei dessen Referenzwert also < 30 m<sup>3</sup>/a, ist.



Sachverhalt, Ereignis, Prozess	Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)
<p>Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär)</p>	<p>Die hydrogeologischen Modellrechnungen ergeben ohne Auspressen von Lösung aus der Grube eine sehr geringe Lösungsbewegung im Hutgestein, die in der Schichtenfolge DGL zudem nach unten gerichtet ist. Trajektorien mit Startpunkt am Salzspiegel verlaufen nach Südwesten, steigen dann in den Oberkreide-Trog auf und führen – entlang dessen Basis ansteigend – gegen Nordosten, bis sie in der Umgebung der Aller in Oberflächennähe aufsteigen. Die berechneten advektiven Transportzeiten (ohne Sorption) übersteigen für alle Trajektorien 80 000 Jahre und weisen einen Mittelwert von rund 200 000 Jahren auf.</p> <p>Der LZSN nimmt deshalb an, dass der Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge ausschließlich durch das Auspressen von Lösung aus der Grube angetrieben wird und in einer seitlich begrenzten Wegsamkeit erfolgt. Der LZSN beruht damit auf folgenden Annahmen bzw. direkten Konsequenzen der Annahmen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Annahme: Transportdistanz = 220 m</li> <li>- Annahme: Transportquerschnitt 150 m<sup>2</sup> mit 30 % Porosität, beide Parameter variiert</li> <li>- Konsequenz: Transportgeschwindigkeit während der Zeitperiode von rund 100 Jahren bis rund 100 000 Jahren derart, dass Transportzeit (ohne Sorption) = 1000 Jahre, anschließend langsam abnehmende Transportgeschwindigkeit aufgrund abnehmender Konvergenz im Grubengebäude</li> <li>- Annahme: Sorption wie für das Material der Schichtenfolge DGL ermittelt, variiert</li> </ul> <p>Die genannte Transportzeit, welche sich aus den Annahmen zu Transportdistanz, Transportquerschnitt und transportwirksamer Porosität sowie der Annahme des ausschließlichen Antriebs des Radionuklidtransports durch das Auspressen von Lösung aus der Grube ergibt, liegt im Bereich der kürzesten Transportzeiten, die mit dem Modell zur Grundwasserbewegung im Hutgestein und Deckgebirge ermittelt wurden.</p> <p>Die Annahme einer seitlich begrenzten Wegsamkeit mit Parameterwerten für Transportdistanz, Transportquerschnitt, Porosität und Sorption ist für den LZSN wesentlich. Die Transportgeschwindigkeit bzw. –zeit ist eine Folge dieser Annahme und der Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein. Bei einer seitlich nicht begrenzten Wegsamkeit und sonst gleichen Verhältnissen sind die Transportzeiten länger.</p>
<p>Radionuklidtransport durch die Oberen Alleringerslebener Schichten</p>	<p>Die Oberen Alleringerslebener Schichten weisen andere Sorptionsverhältnisse als der Transportweg durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) auf und bilden einen wesentlichen Bestandteil des Oberkreide-Troges. Bei einem Radionuklidtransport durch diese Schichten verändern sich die Konzentrationsverhältnisse in Lösung. Dies wird im LZSN berücksichtigt.</p> <p>Die Bedeutung der Oberen Alleringerslebener Schichten ist je nach Radionuklid und zudem in den Modellrechnungen mit PROSA und mit EMOS unterschiedlich, insgesamt für den vorliegenden LZSN jedoch gering.</p>

Sachverhalt, Ereignis, Prozess	Bedeutung für den Langzeitsicherheitsnachweis (LZSN)
Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser	<p>Die Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser ist wesentlich für den LZSN.</p> <p>Der Referenzwert des verdünnenden oberflächennahen Grundwasserflusses beträgt <math>15\,000\text{ m}^3/\text{a}</math> und entspricht ungefähr dem jährlichen Wasserverbrauch einer kleineren, sich selbst versorgenden Bevölkerungsgruppe. Dies entspricht für die Zeiten der berechneten Dosismaxima einer Verdünnung der aus der Grube ausgepressten Lösung um den Faktor von rund 1500.</p> <p>Insgesamt muss Lösung aus der Grube mindestens um den Faktor 500 mit Süßwasser verdünnt werden, damit das Gemisch aufgrund des verbleibenden Salzgehaltes in relevantem Maße am Biosphärenkreislauf teilnehmen kann.</p> <p>Eine gewisse Verdünnung im oberflächennahen Grundwasser kann auch für späte Zeiten, nach Änderungen der hydrogeologischen Verhältnisse im Deckgebirge, angenommen werden.</p>

Das Ziel der geplanten Maßnahmen zum Verfüllen und Verschließen des ERAM ist in erster Linie, die Integrität der Steinsalz-Barriere möglichst aufrecht zu erhalten<sup>67</sup> und einen Lösungszutritt in das Grubengebäude unwahrscheinlich zu machen bzw. zu verzögern und zu behindern (vgl. Kapitel 3.2.2). Bei einem Lösungszutritt in die Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie verfolgen die geplanten Maßnahmen die vier Ziele:

- (1) Zum einen verringern sie die Bewegung von Salzlösung im Grubengebäude und verzögern damit sowohl deren Zutritt in die Einlagerungsbereiche als auch die anschließende Auspressung von kontaminierter Salzlösung.  
Zur Verstärkung und Sicherstellung dieser Auswirkungen werden zwischen den potenziellen Zutrittsstellen von Wässern aus dem Hutgestein in das Grubengebäude und den Einlagerungsbereichen Abdichtungen und transportverzögernde Elemente errichtet.
- (2) Zum zweiten verzögern sie durch Sorptionswirkung am Versatzmaterial den Radionuklidtransport (im Langzeitsicherheitsnachweis nicht belastet).
- (3) Zum dritten wirken sie durch ihre Stützwirkung der Konvergenz und der weiteren Ausbildung von Auflockerungszonen entgegen und erhalten die Standsicherheit des Grubengebäudes und die Integrität der Salzbarriere.
- (4) Viertens begrenzen sie das Lösungsvolumen im Grubengebäude und damit das Ausmaß von Lösungs- und Umlöseprozessen.

Beim Nachweis unberücksichtigt blieben die nachfolgend aufgeführten, die Langzeitsicherheit fördernden Sachverhalte und Prozesse. Sie blieben unberücksichtigt, da sie nicht ausreichend belastbar quantifiziert werden können.

- Hydraulischer Widerstand des Salzbeton-Massenversatzes im Grubengebäude außerhalb der Abdichtungen,
- Begrenzung der Mobilisierung von Radionukliden in den Einlagerungsgrubenbauen durch begrenzte Löslichkeiten von Radionukliden (bzw. der entsprechenden Elemente) und durch Sorption von Radionukliden an Festphasen in den Einlagerungsgrubenbauen (in den Modellrechnungen nur für  $^{14}\text{CO}_2$  in allen ELB und für  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA berücksichtigt),

<sup>67</sup> soweit die Integrität heute besteht und unter Beachtung der Verhältnismäßigkeit im Sinne von § 6, Absatz 2 StrlSchV.

- wahrscheinliche Ausbreitung von kontaminierter Lösung in größere Bereiche des Grubengebäudes außerhalb der Einlagerungsbereiche als lediglich in den in den Modellrechnungen angenommenen Mischungsbereich, dadurch eine stärkere zeitliche Streckung des Radionuklidübertritts in das Hutgestein,
- Rückhaltung von Radionukliden im Grubengebäude durch Sorption am Salzbeton und an Korrosionsprodukten des Salzbetons (in den Modellrechnungen nur für  $^{226}\text{Ra}$  aus der Radium-VBA im Streckenstummel am Ende des Ostquerschlags auf der 4. Sohle im ELB OF berücksichtigt),
- Diffusion von Radionukliden in stagnierende Porenlösung des Salzbeton-Massenversatzes,
- Aufteilung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung auf verschiedene Ausbreitungspfade mit unterschiedlichen Transportzeiten, dadurch eine zusätzliche zeitliche Streckung der Freisetzung von Radionukliden in das oberflächennahe Grundwasser und
- geringere Transportgeschwindigkeit in den Oberen Alleringerslebener Schichten als in den Modellrechnungen, u. a. aufgrund der vernachlässigten Anisotropie ihrer hydraulischen Durchlässigkeit (wirksam bei einem Radionuklidtransport durch das Hutgestein in den Oberkreide-Trog).

## 7.2 WERTUNG DER QUANTITATIVEN ANALYSE

Die durchgeführten deterministischen und probabilistischen Modellrechnungen decken ein sehr breites Spektrum an möglichen Zuständen und Entwicklungen des Endlagersystems ab. Die berechneten Dosismaxima für die Szenarien „mit relevantem Lösungszutritt“ in die Grube sind in Abbildung 7-1 als zusammenfassende Übersicht dargestellt.

Explizit untersucht wurden neben dem Referenzszenario sämtliche identifizierten alternativen Szenarien sowie ausgewählte „what-if“-Szenarien, jeweils unter Annahme von Referenzwerten für die Parameter. Dabei zeigte sich, dass alle alternativen Szenarien mit relevantem Lösungszutritt in die Grube aufgrund der gewählten großen Bandbreiten der Parameter in den probabilistischen Modellrechnungen zum Referenzszenario durch diese weitgehend abgedeckt werden. In Bezug auf die maßgebende Auswirkung, die Freisetzung der langlebigen Actiniden und deren Folgeprodukte, gilt dies in gewissem Ausmaß auch für das alternative Szenario der Entstehung einer neuen Wegsamkeit ohne Sorptionskapazität im Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) nach einigen 10 000 Jahren. Damit wurden implizit die alternativen Szenarien auch für Parameterwerte untersucht, die von den Referenzwerten abweichen. Die Auswirkungen einer möglichen künftigen Vergletscherung des Standortes nach über 150 000 Jahren wurden nicht explizit quantitativ untersucht. Die Folgen einer Eisüberdeckung des Standortes in Bezug auf die Langzeitsicherheit sind ein Anstieg der Konvergenz der Grubenbaue gegenüber dem Wert vor der Vergletscherung und möglicherweise eine Verminderung der Barrierenwirksamkeit von Hutgestein und Deckgebirge. Da die probabilistischen Modellrechnungen jedoch auch Realisierungen einschließen, bei denen die Konvergenzraten im Grubengebäude gegenüber den Referenzwerten deutlich erhöht sind und gleichzeitig ein rascher Transport durch Hutgestein und Deckgebirge stattfindet, sind auch die möglichen Auswirkungen einer späteren Vergletscherung des Standortes (ohne Bildung einer tiefen glazialen Rinne) implizit im Langzeitsicherheitsnachweis einbezogen. Die Entstehung einer tiefen glazialen Rinne am Standort mit größeren Auswirkungen auf das Endlager als jene, die in den betrachteten Szenarien berücksichtigt wurden<sup>68</sup>, ist sehr unwahrscheinlich und braucht deshalb im Langzeitsicherheitsnachweis nicht unterstellt zu werden. Diese Überlegungen erlauben die Aussage, dass die durchgeführten Modellrechnungen sämtliche in den Grenzen der praktischen Vernunft möglichen Zustände und künftigen Entwicklungen des Endlagersystems abdecken.

<sup>68</sup> einschließlich des Szenarios „Entstehen neuer Wegsamkeiten im Hutgestein“, in dem der Radionuklidtransport weder im Hutgestein noch im Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) durch Sorption zurückgehalten wird.

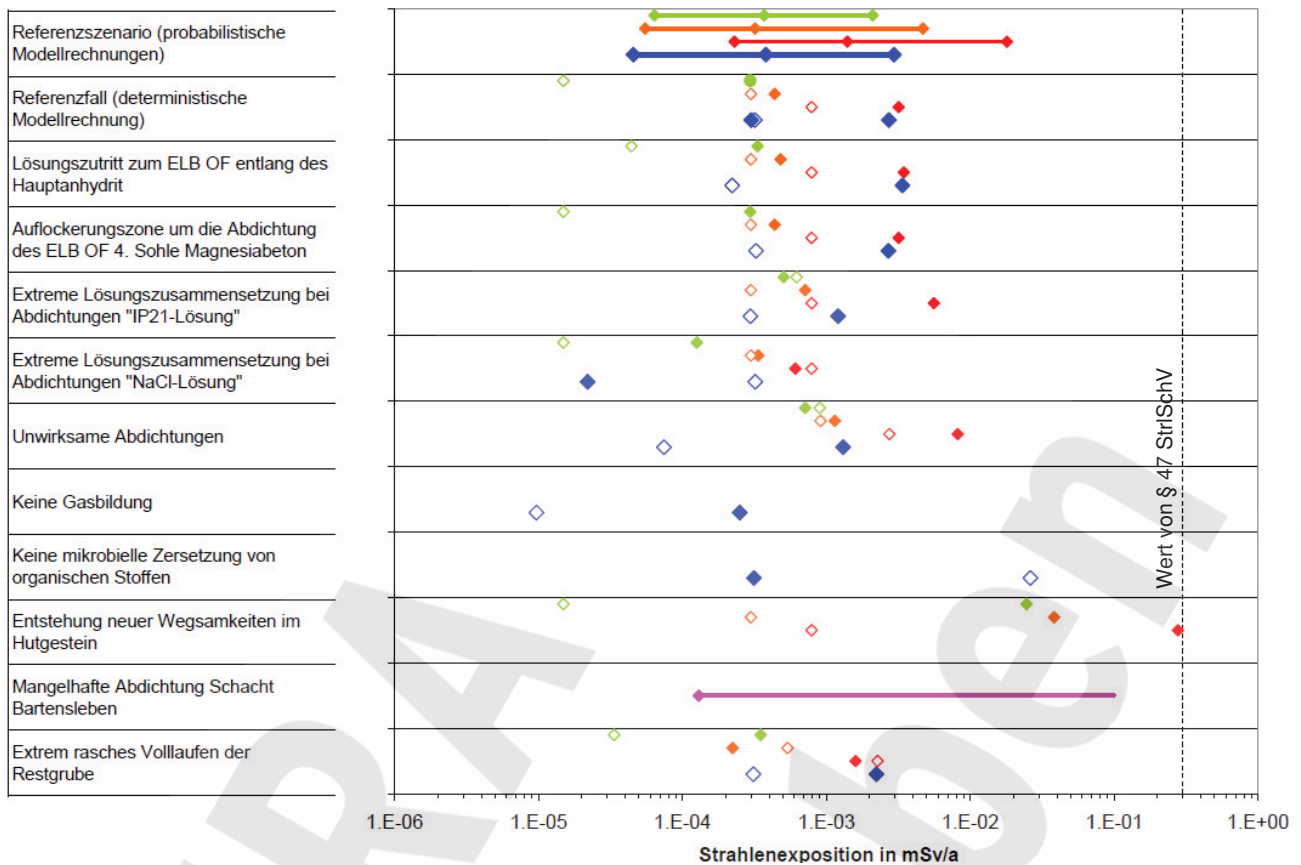


Abbildung 7-1: Übersicht über die berechneten maximalen Strahlenexpositionen in den Szenarien mit relevantem Lösungszutritt in das Grubengebäude<sup>69</sup> (Ergebnisse PROSA: grün = Fall „oo“, orange = Fall „mm“, rot = Fall „mo“, vgl. Kapitel 6.6.1; Ergebnisse EMOS: blau; bei deterministischen Modellrechnungen: offene Symbole = 1. Maximum, volle Symbole = 2. Maximum; lila: Ergebnis einer Spezialrechnung mit Referenzwerten (volles Symbol) und Bandbreite).

Die Modellrechnungen wurden mit zwei Rechenprogrammen (EMOS und PROSA) durchgeführt. Sie beruhen dabei auf dem gleichen konzeptuellen Modell für das Endlagersystem und einem einheitlichen Basisdatensatz. Die beiden Rechenprogramme setzen das konzeptuelle Endlagermodell und den Basisdatensatz in unterschiedlicher Weise in numerischen Modellen um. Die Entwicklung des konzeptuellen Endlagermodells, des Basisdatensatzes und die Durchführung der Modellrechnungen erfolgten zeitgleich und parallel durch zwei unabhängige Teams, wobei die Ergebnisse periodisch ausgetauscht und eingehend diskutiert wurden. In einer ersten Phase entstanden mit diesem Vorgehen das konzeptuelle Endlagermodell und der Basisdatensatz als gemeinsame Grundlage, in einer zweiten Phase wurden die Modellrechnungen zum Langzeitsicherheitsnachweis durchgeführt. Die Ergebnisse der beiden Modellrechnungen stimmen weitgehend überein und führen insbesondere zu den gleichen Schlussfolgerungen. Das geschilderte Vorgehen gewährleistet eine hohe Zuverlässigkeit der durchgeführten quantitativen Analysen zur Langzeitsicherheit des ERAM.

Zusätzlich zur Vernachlässigung der in Kapitel 7.1 aufgezählten, die Langzeitsicherheit fördernden Sachverhalte und Prozesse wurden bei den Modellrechnungen die folgenden konservativen Vereinfachungen und Näherungen verwendet:

<sup>69</sup> Die Ergebnisse der probabilistischen Modellrechnungen sind der Medianwert und die Bandbreite vom 5-Perzentilwert bis zum 95-Perzentilwert. Die Ergebnisse der deterministischen Rechnungen sind das erste und zweite zeitliche Dosismaximum. Für den Referenzfall werden als Ergebnis der deterministischen Modellrechnungen mit EMOS das zweite Dosismaximum sowohl für einen hohen als auch für einen niedrigen Gaseindringdruck der Abdichtungen angeführt, für die alternativen Szenarien und die „what-if“-Szenarien nur die Dosismaxima für einen hohen Gaseindringdruck.



- Annahme des Zutritts von Süßwasser ab Beginn eines relevanten Lösungszutritts in die Grube,
- Annahme der irreversiblen Bildung von hochdurchlässigen hydraulischen Fracs bei einem Ansteigen des Gasdrucks über den lithostatischen Druck (nur in den Modellrechnungen mit PROSA),
- Annahme von relativ geringen Volumen für die Mischungsbereiche, in denen sich die (kontaminierte) Lösung aus den ELB mit der Lösung aus der übrigen Grube mischt,
- Annahme von nur einer hydraulischen Wegsamkeit zwischen Grubengebäude und Hutgestein bei relevantem Lösungszutritt in die Grube,
- Annahme eines kanalisiertem Transports durch Hutgestein und Deckgebirge,
- Annahme einer relativ niedrigen Dichte (gesättigte NaCl-Lösung, niedriger Mg-Gehalt) der in das Hutgestein ausgepressten Lösung in den Modellrechnungen zu den Ausbreitungspfaden im Hutgestein und Deckgebirge,
- vernachlässigte bzw. als gering angesetzte Barrierenwirkung der Oberen Alleringerslebener Schichten in den Szenarien mit Entstehung neuer Wegsamkeiten im Hutgestein,
- Vernachlässigung der wahrscheinlich signifikanten Rückhaltung von Zinn durch Sorption beim Transport durch das Hutgestein und Deckgebirge,
- stark vereinfachte Modellierung des Transports von Zerfallsreihen durch das Hutgestein und Deckgebirge, relevant bei einer berechneten Freisetzung von Radionukliden der  $^{238}\text{U}$ -Zerfallsreihe und damit u. a. von  $^{226}\text{Ra}$  (nur in den Modellrechnungen mit PROSA).

Bei der Wertung der Ergebnisse aus den Modellrechnungen ist zu berücksichtigen, dass diese ein komplexes System beschreiben, zu dem die bestehenden Kenntnisse zwar umfangreich sind, aber auch nicht behebbare Ungewissheiten enthalten. Die Modellrechnungen beruhen deshalb auf Vereinfachungen sowie systematisch – oder wenigstens tendenziell – ungünstigen Annahmen. Die Ungewissheiten betreffen insbesondere auch die künftige Entwicklung des Systems „Endlager Morsleben“. Soweit die Ungewissheiten die Komponenten des Systems in größerer Teufe betreffen, wurden sie durch die Analyse von verschiedenen Szenarien, die Anwendung unterschiedlicher konzeptueller Modelle sowie deterministische und probabilistische Parametervariationen berücksichtigt. Die Ungewissheiten zu der künftigen Entwicklung der oberflächennahen Systemkomponenten, speziell der menschlichen Lebens- und Ernährungsgewohnheiten, der landwirtschaftlichen Techniken, der Nutzung der Biosphäre und oberflächennahen Geosphäre durch den Menschen sowie der klimatischen Einflüsse auf die oberflächennahe Geosphäre, sind derart, dass sie sich nicht in gleicher Weise in den quantitativen Analysen berücksichtigen lassen. In Übereinstimmung mit internationalen Empfehlungen (z. B. [OECD/NEA 1999] und [OECD/NEA 2004]) und dem international anerkannten Vorgehen wurden für die oberflächennahen Systemkomponenten stilisierte Modelle verwendet, d. h. Modelle, die die Wirkung der oberflächennahen Systemkomponenten hinsichtlich der radiologischen Auswirkungen des Endlagers für einen oder mehrere repräsentative Zustände der entsprechenden oberflächennahen Systemkomponente beschreiben. Ein typisches Beispiel für ein stilisiertes Modell ist die AVV zu § 47 StrlSchV. Die stilisierten Modelle für die oberflächennahen Systemkomponenten ermöglichen es, die Freisetzung von Radionukliden aus dem tieferen Systemteil, der alle langzeitwirksamen Barrieren des Endlagersystems enthält und hinsichtlich Ungewissheiten systematisch analysiert wurde, in bewertbare Größen, z. B. die jährliche Strahlenexposition, umzurechnen. Aufgrund der getroffenen Vereinfachungen und ungünstigen Annahmen sowie der Verwendung von stilisierten Modellen sind die Ergebnisse der quantitativen Analysen Indikatoren für die Langzeitsicherheit des Endlagersystems und keine Prognosen für dessen tatsächliche künftige Auswirkungen.

Die Ergebnisse der quantitativen Analysen – einschließlich jener zur Gewährleistung der Unterkritikalität (Kapitel 6.9) – lassen sich wie folgt kurz zusammenfassen (ausführlichere Zusammenfassungen enthalten die entsprechenden Unterkapitel in Kapitel 6, insbesondere das Unterkapitel 6.6.5):

- Bei der plausiblen Entwicklung „trockene Grube“, bei der in der Phase nach Verschluss des Endlagers höchstens eine vernachlässigbar geringe Lösungsmenge in die Grube Marie Zutritt, können frühestens nach über 100 000 Jahren und dann nur unter ungünstigen Verhältnissen geringe Mengen an Radionukliden aus dem Endlager austreten. Es treten praktisch keine Umweltauswirkungen auf.

- Bei einem relevanten Lösungszutritt in das Grubengebäude liegt die potenzielle jährliche Strahlenexposition durch Freisetzung von Radionukliden selbst bei breiter Variation der Systemparameter deutlich (meistens um mehrere Größenordnungen) unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis, wobei bei den Modellrechnungen noch verschiedene, die Langzeitsicherheit fördernde Prozesse vernachlässigt (vgl. Kapitel 7.1) und konservative Vereinfachungen und Näherungen verwendet wurden (s. o.). Die berechneten 95-Perzentilwerte der maximalen potenziellen Strahlenexposition liegen zwischen 0,002 mSv/a und 0,018 mSv/a.
- Auch bei Existenz einer Wegsamkeit durch das Hutgestein ohne Sorptionskapazität kann von einer sicheren Unterschreitung des Wertes von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis durch Freisetzung von Radionukliden ausgegangen werden.
- Bei wirksamer Sorption im Hutgestein/Deckgebirge werden die Radionuklide der Uran- und Thorium-Zerfallsreihen praktisch vollständig in der Geosphäre zurückgehalten.
- Eine Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad ist nur für  $^{14}\text{CH}_4$  in potenziell relevantem Ausmaß möglich. Die aus einer eventuellen Freisetzung resultierende potenzielle jährliche Strahlenexposition liegt deutlich – auch nach Berechnungen mit ungünstigen Annahmen um mehr als eine Größenordnung – unter dem Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis.
- Die Abschätzung der möglichen Auswirkungen eines menschlichen Einwirkens – plausibel ist einzig das Abteufen einer Explorationsbohrung – ergibt keine relevante Beeinträchtigung der Langzeitsicherheit des Endlagers.
- Die anhaltende Unterkritikalität des Radionuklidinventars im Endlager ist gewährleistet.

Die Modellrechnungen bestätigen die in Kapitel 7.1 zusammengefassten Ergebnisse der qualitativen Systemanalyse, wonach die für den Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit wesentlichen Sachverhalte und Prozesse die vier folgenden Sicherheitsfunktionen bewirken:

- (i) Behinderung des Lösungszutritts zu den Abfällen, quantifizierbar gewährleistet durch die Abdichtungen für die meisten der eingelagerten Abfälle
- (ii) Begrenzung der Auspressung von eventuell kontaminierter Lösung aus den Einlagerungsbereichen in die übrige Grube sowie aus der übrigen Grube in das Hutgestein (geringe Konvergenzraten der Grubenbaue und geringe konvergierende Volumen)
- (iii) Rückhaltung und zeitliche Verzögerung beim Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge
- (iv) mehrstufige Verdünnung von Lösungen aus Einlagerungsgrubenbauen bei einem Transport in oberflächennahes Grundwasser

Die Modellrechnungen ergeben, dass auch eine verminderte Wirksamkeit oder sogar ein Ausfall einzelner dieser Sicherheitsfunktionen zu keiner Verletzung der Schutzziele führt<sup>70</sup>. Das System „Endlager Morsleben“ ist damit auch in quantitativer Hinsicht robust.

In Anbetracht der Robustheit des Endlagersystems ist die Datenlage für den vorgelegten Nachweis der Langzeitsicherheit ausreichend bis gut. Dies wird nachfolgend für die vier genannten Sicherheitsfunktionen dargelegt:

- ad (i): Die Behinderung des Lösungszutritts zu den Abfällen stützt sich im Nachweis der Langzeitsicherheit auf die Unversehrtheit der geologischen Barriere um die abgedichteten Einlagerungsbereiche mit den genannten Ausnahmen: die mit Abdichtungen versehenen Auffahrungen und die eventuelle hydraulische Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit in den ELB OF.

Die Behinderung des Lösungszutritts entlang der mit Abdichtungen versehenen Auffahrungen beruht auf deren geringen Anfangspermeabilität und der erforderlichen Lösungsmenge für die Korrosion der

<sup>70</sup> Ein vollständiger Ausfall der Sicherheitsfunktion „Begrenzung der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude“ und „Verdünnung“ kann ausgeschlossen werden.

Abdichtungen durch Mg-haltige bzw. Mg-arme Lösung. Die Anfangspermeabilität wird durch das qualifizierte Errichten der Abdichtungen sichergestellt. Die für die Korrosion der Abdichtungen aus Salzbeton erforderliche Lösungsmenge wurde experimentell ermittelt, jene für die Korrosion der Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle aus Magnesiabeton mit einer chemischen Bilanzrechnung bestimmt. In Bezug auf die Zusammensetzung der Lösung wurde in den Modellrechnungen keine Einschränkung gegenüber den aus der Chemie salzhaltiger Lösungen gut bekannten möglichen Lösungszusammensetzungen gemacht.

Die Daten einer eventuellen Wegsamkeit durch den Hauptanhydrit wurden aus experimentellen Daten vom Standort abgeleitet, die Permeabilität wurde in den Modellrechnungen zusätzlich um mehrere Größenordnungen variiert.

- ad (ii): Die Begrenzung der Auspressung von eventuell kontaminierter Lösung aus den Einlagerungsbereichen in die übrige Grube und aus dem Grubengebäude in das Hutgestein beruht auf der geringen Konvergenzrate der Grubenbaue, dem begrenzten konvergierbaren Hohlraumvolumen in den entsprechenden Grubenteilen sowie auf der begrenzten möglichen Wirkung von Gasbildung und -speicherung. Die geringe Konvergenzrate unter heutigen Bedingungen ist experimentell gesichert und diejenige für zukünftige Verhältnisse durch qualifizierte Modellrechnungen belegt. Die dabei verwendete modellhafte Abbildung der Stützwirkung des Fluiddrucks bei einem Volllaufen der Restgrube ist gesichert. Die weniger belastbare modellhafte Quantifizierung der Stützwirkung von kompaktierbarem Versatz bei gleichzeitig wirkendem Fluiddruck ist von geringem Einfluss auf die Modellergebnisse. Zur Absicherung wurden die Konvergenzraten in den Modellrechnungen über eine Bandbreite von einer Größenordnung variiert.

Das konvergierbare Volumen ist durch die weitgehende Verfüllung des Grubengebäudes mit dem Massenversatz Salzbeton beschränkt. In den Modellrechnungen wurde in konservativer Weise unterstellt, dass bei einem Lösungszutritt in das Grubengebäude ausschließlich und von Anfang an Süßwasser zutritt, sich dieses an Steinsalz und Kalisalzen bis zum invarianten Punkt IP21 aufsättigt und dadurch konvergierbares Volumen bildet. Eine signifikante Unterschätzung des konvergierbaren Volumens kann damit ausgeschlossen werden.

Die Gasbildungsraten wurden aus Literaturdaten abgeleitet, die kumuliert gebildeten Gasmengen stöchiometrisch ermittelt. Die Parameter der Gasbildung in den Modellrechnungen mit EMOS und PROSA wurden in einem breiten Intervall variiert.

- ad (iii): Die Rückhaltung und die zeitliche Verzögerung beim Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge beruhen auf der geringen Fließgeschwindigkeit des Grundwassers (Transportzeit von nicht sorbierenden Spezies) und auf der Wirksamkeit von Sorptionsprozessen.

Die geringen Fließraten von Grundwasser im Hutgestein unter heutigen Bedingungen ergeben sich sowohl aus Modellrechnungen als auch aus dem nachgewiesenen hohen Alter der tiefen Porenwässer. Dies erlaubt, den Transport von Radionukliden durch das Hutgestein und Deckgebirge für den Langzeitsicherheitsnachweis als Transport entlang einer Röhre zu modellieren, deren Abmessungen und Porosität aus den Standortgegebenheiten abgeleitet sind, und in der der Lösungsfluss durch die Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude gegeben ist. Die umfangreichen numerischen Modellrechnungen zur Grundwasserbewegung im Deckgebirge dienen „lediglich“ dazu, dieses Vorgehen zu rechtfertigen.

Experimentelle Sorptionsdaten vom Standort liegen für potenziell sicherheitsrelevante Radionuklide und für die Schichtenfolge DGL vor. Die Sorptionsdaten der übrigen Radionuklide für die Schichtenfolge DGL wurden aus den im Langzeitsicherheitsnachweis für das Endlager Konrad verwendeten Daten abgeleitet, wobei das Verfahren zur Ableitung mit den nachträglich durchgeführten Experimenten an ausgewählten Radionukliden erfolgreich überprüft wurde. In den Modellrechnungen wurden die für die Schichtenfolge DGL ermittelten Sorptionsdaten für die Wegsamkeit durch Hutgestein und Deckgebirge (ohne Kreide und Quartär) verwendet und in die ungünstige Richtung um eine Größenordnung variiert. Damit wird der beschränkten Datenlage in Bezug auf die Sorption im Hut-

gestein und im Deckgebirge einschließlich der Ausbreitung entlang Wegsamkeiten außerhalb der Schichtenfolge DGL Rechnung getragen.

ad (iv): Die kumulierte Verdünnung von Lösung aus den Einlagerungsgrubenbauen bei einem Transport bis in das oberflächennahe Grundwasser hängt einzig vom Verhältnis des oberflächennahen Grundwasserflusses, der bei einer Radionuklidfreisetzung aus dem Endlager von dieser betroffen ist, zu der Lösungsauspressrate aus dem betreffenden Einlagerungsbereich ab. Der potenziell betroffene Grundwasserfluss wurde aus dem heutigen Grundwasserumsatz im Standortgebiet und einer vorsichtig niedrigen Schätzung der räumlichen Ausdehnung einer eventuellen Radionuklidfreisetzung abgeleitet. Der resultierende Grundwasserfluss (Referenzwert) liegt im Bereich des Wasserverbrauchs einer kleinen, sich von den lokalen Erzeugnissen ernährenden Personengruppe. In den Modellrechnungen wurde der verdünnende Grundwasserfluss über eine Größenordnung variiert.

Insgesamt sind die quantitativen Analysen, d. h. die Modellrechnungen mit EMOS und PROSA zu den radiologischen Auswirkungen, belastbar. Sie belegen die Langzeitsicherheit des Systems „Endlager Morsleben“, die Robustheit des Endlagersystems und die Angemessenheit der geplanten Maßnahmen.

### 7.3 ERGÄNZENDE ARGUMENTE BETREFFEND LANGZEITSICHERHEIT

Die nachfolgend beschriebene einfache Handrechnung und die weiteren angeführten ergänzenden Argumente sollen erlauben, die durchgeführte qualitative Systemanalyse zur radiologischen Langzeitsicherheit des ERAM und die mit den Modellrechnungen mit EMOS und PROSA ermittelten Werte für die potenzielle jährliche Strahlenexposition bei einem relevanten Lösungszutritt in das Grubengebäude grob nachzuvollziehen, die Bedeutung der in Kapitel 7.2 aufgeführten, für den Nachweis dominanter Sicherheitsfunktionen direkt zu erfassen und die Ergebnisse in einem größeren Zusammenhang zu bewerten. Es ist noch einmal hervorzuheben, dass Systementwicklungen mit relevantem Lösungszutritt in das Grubengebäude nach Verschluss des Endlagers nur eine Gruppe der möglichen künftigen Systementwicklungen darstellen und dass auch Systementwicklungen ohne relevanten Lösungszutritt und damit ohne nennenswerte Radionuklidfreisetzung eintreten können.

Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 zeigen die zeitliche Entwicklung des Toxizitätsindikators der im Endlager eingelagerten Abfälle, definiert als Produkt von Aktivitätsinventar und den radionuklidspezifischen Dosiskoeffizienten für Ingestion sowie summiert über alle Radionuklide (Kapitel 2.3.3). Die im ERAM eingelagerte Toxizitätsmenge ist relativ gering und zum größten Teil auch verhältnismäßig kurzlebig. Dies wird nachfolgend mit einer Abschätzung deutlich gemacht.

Der Toxizitätsindikator der Abfälle in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen sinkt nach 1000 Jahren auf unter 100 Sv. Werden die Radionuklide aus diesen Einlagerungsbereichen in den folgenden 1000 Jahren durch Konvergenz und Gasbildung/-speicherung aus dem Grubengebäude in das Hutgestein ausgepresst, dann entspricht dies – ohne Berücksichtigung des weiteren radioaktiven Zerfalls – einer Toxizitätsaustrittsrate aus dem Grubengebäude von 0,1 Sv/a.

Der Toxizitätsindikator in den abgedichteten Einlagerungsbereichen beträgt (ohne  $^{226}\text{Ra}$  in der Radium-VBA) nach 3000 Jahren rund 43 000 Sv, nach 30 000 Jahren rund 8800 Sv und nach 300 000 Jahren noch rund 2200 Sv. Die Referenzkonvergenzraten unverteilter Hohlräume ohne Stützwirkung eines Fluiddrucks betragen  $4 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  im Südfeld,  $5 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$  im Westfeld und  $1 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  im Ostfeld. Für die einfache Abschätzung wird von einer mittleren Konvergenzrate von  $1 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$  ausgegangen. Bei einem Verhältnis von (hydrostatischem) Fluiddruck und (lithostatischem) Gebirgsdruck von 1:2 verringert sich die Konvergenzrate durch die Stützwirkung des Fluiddrucks auf etwa 3 %, d. h. auf  $3 \cdot 10^{-7} \text{ a}^{-1}$ . Das fluidzugängliche Volumen in den abgedichteten Einlagerungsbereichen nimmt somit im Mittel mit einer Rate von  $1 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$  ab (bei 30 % mittlerer Porosität). Nimmt man nun an, dass der Austritt von Radionukliden aus den abgedichteten Einlagerungsbereichen verzögert durch das Andauern des Lösungszutritts in die Restgrube und den Widerstand der Abdichtungen



nach 30 000 Jahren einsetzt und mit der Rate der Abnahme des fluidzugänglichen Volumens erfolgt, dann ergibt sich eine Toxizitätsaustrittsrate von 0,009 Sv/a. Gasbildung und -speicherung haben nach dieser Zeit nur noch einen geringen Einfluss auf die Rate der Lösungsauspressung.

Nimmt man weiter an, dass der Radionuklidtransport durch Hutgestein und Deckgebirge ohne Rückhaltung und zeitliche Verzögerung erfolgt, die Freisetzung in einen oberflächennahen Grundwasserfluss von 15 000 m<sup>3</sup>/a (Referenzwert in den Modellrechnungen) erfolgt und die Radionuklidaufnahme durch eine betroffene Person der Aufnahme von 1 m<sup>3</sup>/a Wasser, d. h. einem Anteil von 1:15 000, entspricht, dann ergibt sich für die Radionuklidfreisetzung aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen eine grob abgeschätzte jährliche Strahlenexposition von 0,007 mSv/a und für die abgedichteten Einlagerungsbereiche eine solche von 0,0006 mSv/a. Dabei ist zu bedenken, dass der Toxizitätsindikator der Abfälle in den abgedichteten Einlagerungsbereichen durch sorbierende Radionuklide dominiert wird, die im Hutgestein und Deckgebirge erheblich (im Referenzfall der Modellrechnungen praktisch vollständig) zurückgehalten werden. Andererseits entspricht diese grobe Abschätzung einer potenziellen Strahlenexposition, die ausschließlich durch das Trinken von radionuklidhaltigem Grundwasser erfolgt, und berücksichtigt dadurch die sehr unterschiedlichen Wirkungen und Akkumulationen der Radionuklide bei anderen Expositionspfaden nicht. Durch die Beschränkung auf den Expositionspfad „Trinken“ wird die kumulierte Wirkung über alle Expositionspfade wie folgt unterschätzt: für die <sup>238</sup>U-Zerfallsreihe um gut eine Größenordnung, für die Pu-Isotope um den Faktor 3 und für <sup>129</sup>Xe, dessen Inventar in den Abfällen des ERAM kumuliert allerdings nur einem Toxizitätsindikator von etwa 1 Sv entspricht und das deshalb in Abbildung 2-4 nicht auftritt, um rund den Faktor 3000. Gleichwohl hilft diese grobe Abschätzung, die Ergebnisse der Modellrechnungen mit EMOS und PROSA besser zu verstehen und fördert dadurch das Vertrauen in die Ergebnisse.

Das Gesamtinventar der <sup>238</sup>U-Zerfallsreihe im ERAM beträgt rund 10<sup>9</sup> Bq (ohne eingelagertes <sup>226</sup>Ra, angegeben als Inventare der langlebigen Radionuklide <sup>238</sup>U und <sup>234</sup>U) und ist fast ausschließlich in den abgedichteten Einlagerungsbereichen eingelagert (Tabelle 2-2). Mit der oben dargelegten einfachen Abschätzung ergibt sich eine Austrittsrate von <sup>238</sup>U und <sup>234</sup>U von jeweils 1000 Bq/a und – unter Vernachlässigung einer Rückhaltung in Hutgestein und Deckgebirge – eine Konzentration dieser Uran-Isotope im oberflächennahen Grundwasser von 0,07 Bq/m<sup>3</sup>, ohne Berücksichtigung der Konzentrationsminderung im Grundwasserleiter durch Sorption. Dieser Wert ist um rund zwei Größenordnungen niedriger als die im Grundwasser nahe Morsleben gemessenen <sup>234</sup>U- und <sup>238</sup>U-Konzentrationen von einigen Bq/m<sup>3</sup> bis einigen 10 Bq/m<sup>3</sup> [BfS 1999].

Die Rückhaltung von Radionukliden im System „Endlager Morsleben“ wird sehr anschaulich durch eine Darstellung der Radionuklidverteilung auf die verschiedenen Komponenten des Systems und deren Änderung mit der Zeit gezeigt. Summarisch lässt sich der Radionuklidgehalt in einer Komponente durch den Toxizitätsindikator quantifizieren. In Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 sind die Toxizitätsindikatoren der Radionuklidinventare in den abgedichteten Einlagerungsbereichen, in der Restgrube, im Hutgestein und Deckgebirge, das kumuliert freigesetzte „Toxizitätsinventar“ sowie die Summe aller dieser Toxizitätsindikatoren als Funktion der Zeit dargestellt. Die Summe der Toxizitätsindikatoren nimmt nur durch radioaktiven Zerfall ab, sie entspricht dem summierten Toxizitätsindikator in Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5. In Abbildung 7-2 sind die Beiträge aller Einlagerungsbereiche, in Abbildung 7-3 nur jene der abgedichteten Einlagerungsbereiche berücksichtigt. Die Berechnungen erfolgten für den Referenzfall und mit dem Programm EMOS [GRS 2009b].

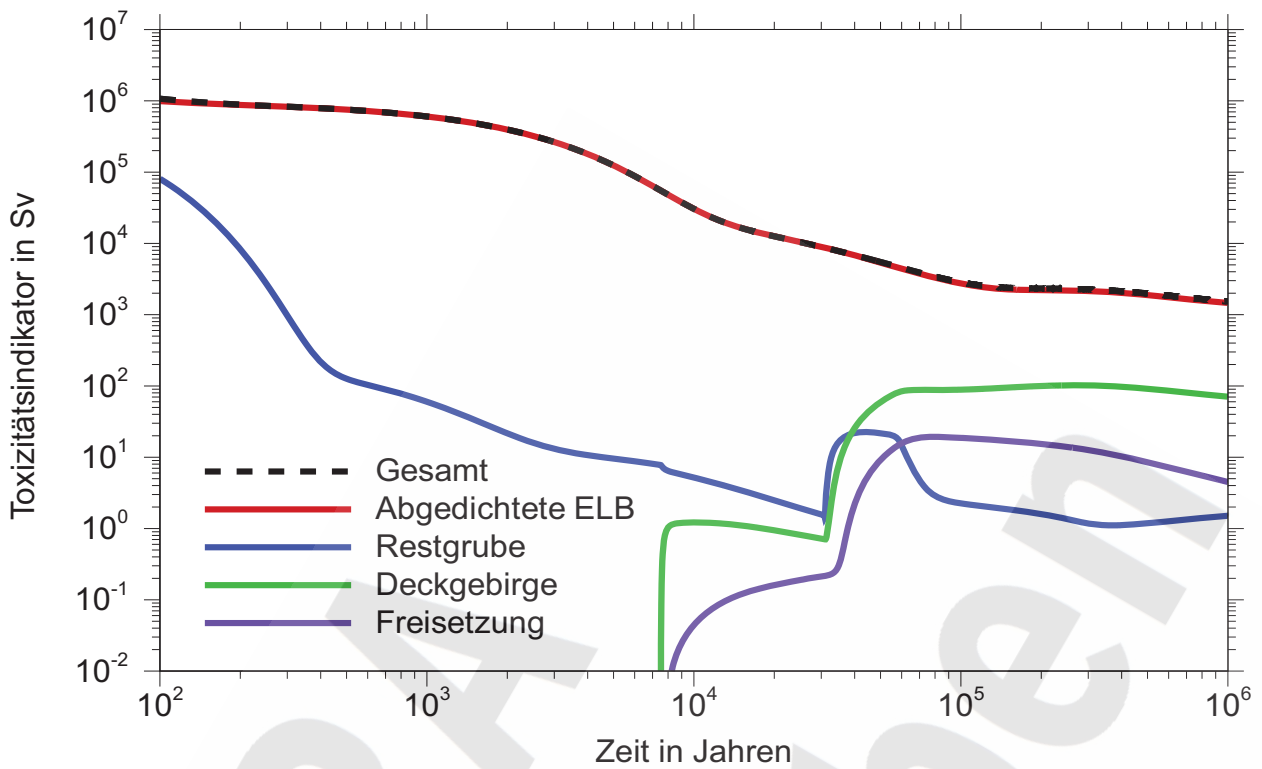


Abbildung 7-2: Verteilung der Radionuklide auf die Komponenten des Systems „Endlager Morsleben“ als Funktion der Zeit, summarisch quantifiziert durch den Toxizitätsindikator; Beitrag aller Einlagerungsbereiche.

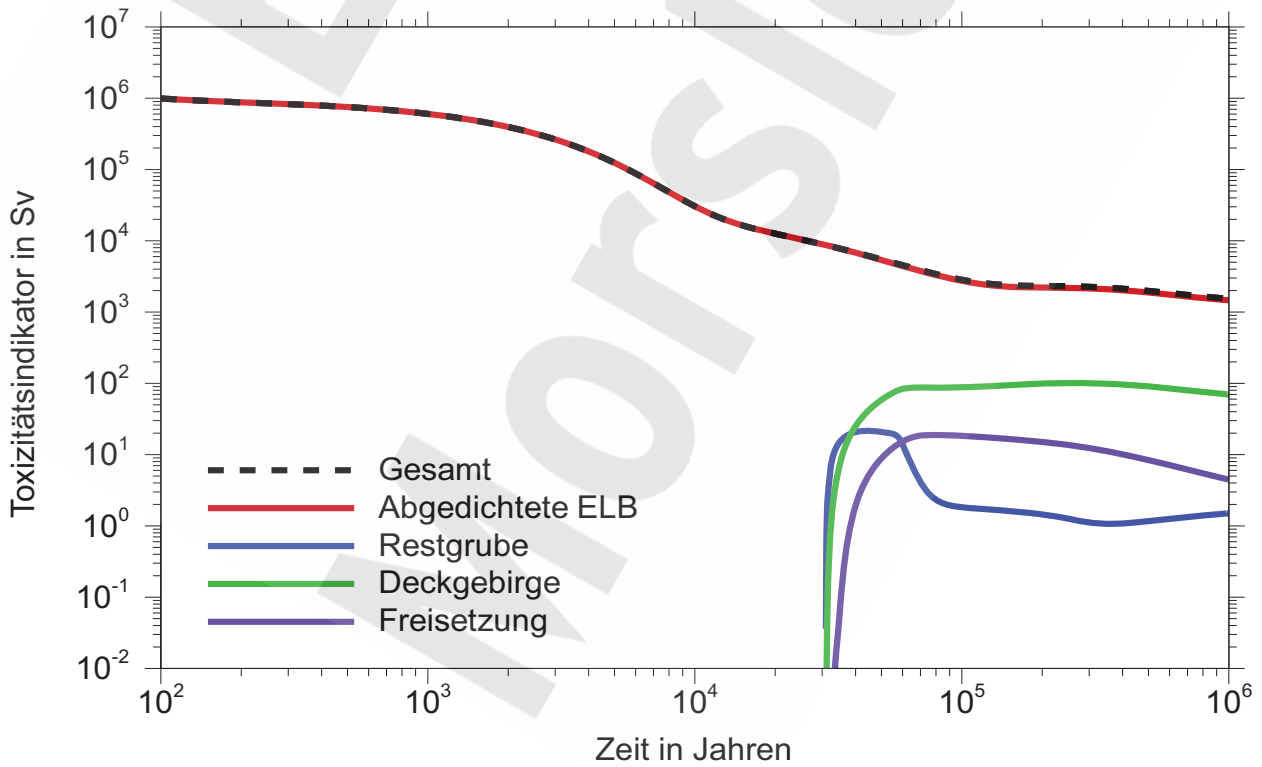


Abbildung 7-3: Verteilung der Radionuklide auf die Komponenten des Systems „Endlager Morsleben“ als Funktion der Zeit, summarisch quantifiziert durch den Toxizitätsindikator; Beitrag der abgedichteten Einlagerungsbereiche.

Unmittelbar nach Verschluss des Endlagers befindet sich jeweils etwa die Hälfte der Radiotoxizität in den abgedichteten Einlagerungsbereichen und in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen, d. h. in der Restgrube (Abbildung 2-5). Die hohe Toxizität in der Restgrube wird nahezu vollständig durch die kurzlebigen Radionuklide  $^{60}\text{Co}$  und  $^{137}\text{Cs}$  im Untertagemessfeld (UMF) bestimmt und fällt deshalb schnell ab (Abbildung 2-5). Nach 7500 Jahren ist im Referenzfall die Restgrube vollgelaufen und die Auspressung von Lösung in das Hutgestein setzt ein. Zu diesem Zeitpunkt ist die Radiotoxizität in den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen um etwa den Faktor 10 000 kleiner als in den abgedichteten Einlagerungsbereichen. Gemäß den Modellannahmen beginnt mit dem Auspressen von Lösung sogleich auch der Übertritt von Radionukliden aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen in das Hutgestein und etwa 1000 Jahre später deren Freisetzung in die Biosphäre. Bis zum Beginn des Radionuklidaustritts aus dem abgedichteten ELB WSF nach rund 30 000 Jahren gelangen etwa 10 % der Radiotoxizität aus den nicht abgedichteten Einlagerungsbereichen in das oberflächennahe Grundwasser (bezogen auf deren Toxizitätsinventar zum gleichen Zeitpunkt). Bezogen auf das Toxizitätsinventar der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche zum Zeitpunkt des Volllaufens der Restgrube beträgt der Anteil der freigesetzten Toxizität etwa 4 %.

Die Korrosion der Abdichtungen zum ELB WSF dauert im Referenzfall 30 000 Jahre, dann setzt der Austrag von Radionukliden aus diesem Einlagerungsbereich ein. Als Folge steigt das Radiotoxizitätsinventar außerhalb der abgedichteten Einlagerungsbereiche erkennbar an, es erfolgt aber kein merklicher Rückgang der Radiotoxizität innerhalb der abgedichteten Einlagerungsbereiche. Selbst nach 1 Mio. Jahre befinden sich noch 96 % der dann noch vorhandenen Radiotoxizität innerhalb der abgedichteten Einlagerungsbereiche und rund 4 % im Hutgestein/Deckgebirge. Der Anteil der in das oberflächennahe Grundwasser freigesetzten Radiotoxizität beträgt zu allen Zeiten weniger als 1 %.

Die analoge Darstellung der zeitlichen Entwicklung der Radionuklidverteilung auf die Komponenten des Endlagersystems, jedoch beschränkt auf das Radionuklidinventar der abgedichteten Einlagerungsbereiche, ist Gegenstand von Abbildung 7-3. Die Ausbreitung beginnt mit der vollständigen Korrosion der Abdichtung zum ELB WSF nach rund 30 000 Jahren. Von der aus dem Einlagerungsbereich austretenden Radiotoxizität verbleibt aufgrund der vereinfachenden Annahmen im Modell nur ein geringer Anteil innerhalb der Restgrube, ein weitaus größerer Anteil gelangt nahezu unverzögert in das Hutgestein/Deckgebirge. Dort werden durch Sorption erhebliche Mengen zurückgehalten, so dass nur ein geringer Anteil in das oberflächennahe Grundwasser freigesetzt wird. Die prozentuale Aufteilung der Radiotoxizität auf die Komponenten ist nahezu gleich wie beim Einbezug der nicht abgedichteten Einlagerungsbereiche (Abbildung 7-2).

## 7.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Der Nachweis der radiologischen Langzeitsicherheit für das System „Endlager Morsleben“ wurde von qualifizierten Mitarbeitern verschiedener Firmen und Organisationen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik und unter der koordinierenden und technischen Leitung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) erarbeitet. Er umfasst eine differenzierte Darstellung des Endlagersystems, eine sorgfältige qualitative Systemanalyse, eine ausreichende Erhebung und Bereitstellung der erforderlichen Daten sowie Modellrechnungen mit qualifizierten Rechenmethoden und Programmen. Die Modellrechnungen zum Radionuklidtransport wurden parallel durch zwei unabhängige Teams durchgeführt. Die Ergebnisse aller Arbeiten, die letztlich zum radiologischen Langzeitsicherheitsnachweis führen, wurden laufend im Rahmen von Projektsitzungen vorgestellt und eingehend diskutiert. Dies bewirkte projektinterne Überprüfungen der Ergebnisse durch Projektmitarbeiter, die nicht an der Erarbeitung der Ergebnisse beteiligt waren, und gewährleistete einen intensiven Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Teams und Fachdisziplinen. Die Ergebnisse sind belastbar.

Im Laufe der Projektbearbeitung wurden mehrfach alternative Optionen für das Verfüllen und Verschließen der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie entwickelt und überprüft, so dass das vorliegende Stilllegungskonzept hinsichtlich technischer Machbarkeit und Langzeitsicherheit optimiert ist.

Das nach dem beantragten Stilllegungskonzept verfüllte und verschlossene Endlager erweist sich im Hinblick auf die Schutzziele zur radiologischen Langzeitsicherheit als robustes System, das zwar im Detail komplex ist, für das die Nachweise zur Einhaltung der Schutzziele aber gestützt auf wenige und gesicherte Sicherheitsfunktionen erbracht werden können. In Bezug auf das radiologische Schutzziel "maximale potenzielle Strahlenexposition niedriger als der Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis" gewährleisten mehrere diversitäre Sicherheitsfunktionen die Langzeitsicherheit. Verschiedene Prozesse und Sachverhalte, die der Langzeitsicherheit zwar förderlich, aber nicht oder nur schwer belastbar zu quantifizieren sind, blieben in den entsprechenden Nachweisen unberücksichtigt.

Die durchgeführten qualitativen und quantitativen Analysen belegen, dass das verfüllte und verschlossene Endlager Morsleben die radiologischen Schutzziele zur Langzeitsicherheit zuverlässig einhält.

ERA  
Morsleben



## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- [AEA 1996] NAMMU (Release 6.3) User Guide. Hartley, L.J., Jackson, C.P., Watson, S.P., AEA Technology, Harwell, Großbritannien. AEA-ES-0138, Februar 1996
- [AK Szenarien 2008] Position des Arbeitskreises „Szenarienentwicklung“: Behandlung des menschlichen Eindringens in ein Endlager für radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen. atw Int. J. for Nuclear Power, Vol 53 (2008) No. 8/9, Seiten 538-540
- [ARGE 2001] Vergleichende Untersuchungen zu Gefährdungspotential, Deponiesicherheit und regulatorischen Anforderungen bei der Endlagerung radioaktiver und chemotoxischer Abfälle, Abschlussbericht zu Teilprojekt 3 zum BfS-Forschungsvorhaben SR 2345: Bewertung der Toxizität von endzulagernden Abfällen, ARGE Zerna, Köpper & Partner, Colenco Power Engineering AG, Prof. Dr.-Ing. F.L. Wilke, 2001
- [BfS 1999] Bestimmung der natürlichen Gehalte an Radionukliden in Grundwässern am Standort des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Naumann, M., Emmermann, H., BfS-Bericht ST 2 – 16/1999 (unveröff.), Berlin/ München, Mai 1999
- [BfS 2000] Stoffliche Bestandteile der radioaktiven Abfälle im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Kugel, K., Noack, W., BfS-Bericht ET-IB-115-REV-1, 29.11.2000 [P-87]
- [BfS 2001] ERA Morsleben – Zusammenstellung von modellierungsrelevanten Parametern der Schichtenfolge Deckanhydrit – Grauer Salzton – Leinekarbonat (DGL) im Hutgestein des ERA Morsleben. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Ranft, M., 15.11.2001 [P-119]
- [BfS 2002] ERA Morsleben – Kriterien für das Verfüllen von Bohrungen. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, ██████████ ZERNA BfS-Bericht ET-IB-133, Stand 30.07.2002 [P-145]
- [BfS 2003] Gasbildung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Noack, W., BfS-Bericht ET-IB-113-Rev1, Stand 06.01.2003 [I-75 Rev1]
- [BfS 2004a] Konzept- und Systembeschreibung Schachtverschlussystem der Schächte Bartensleben und Marie. Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Stand 03.05.2004 [G-183]
- [BfS 2004b] Verzeichnis der Vorkommen von Salzlösungen in den Gruben Bartensleben und Marie, 3. Fortschreibung, Datenerfassung bis 31.12.2002. Bundesamt für Strahlenschutz (Hrsg.), Salzgitter, Stand 31.03.2004 [I-185]
- [BfS 2006] Kritikalitätssicherheit in der Stilllegungs- und Nachbetriebsphase. Thiel, J., Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter, Stand 21.12.2006 [P-246]
- [BfS 2007a] Endlager Morsleben (ERAM) Grundwasserrelevante Aspekte: Berücksichtigung von Verfüll- und Verschleißmaßnahmen. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Brennecke, P., Laske, D. BfS-Bericht SE-IB-16/07, Stand 11.03.2007 [P-260]
- [BfS 2007b] Stilllegung Endlager Morsleben, Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen, Konzept und Systembeschreibung. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Mauke, R., BfS-Bericht SE-IB-18/07, 2007 [G-256]
- [BfS 2007c] Stilllegung Endlager Morsleben, Verfüllen von Strecken mit hohen Anforderungen, Bauzustände für horizontale Strecken (ergänzende Untersuchungen zum Nachweis der Rissbeschränkung im Salzbeton) und Nachweis für das südliche Wetterrollloch. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Mauke, R., Laske, D., BfS-Bericht SE-IB-19/07, 2007 [P-255]
- [BfS 2007d] Entsorgung radioaktiver Abfälle im Endlager für radiaktive Abfälle Morsleben (ERAM), Überblick über die Einlagerung radioaktiver Abfälle im gesamten Zeitraum von 1971 bis 1998. Bundesamt für Strahlenschutz (Salzgitter), Kugel, K., BfS-Bericht, Stand 31.01.2007 [G-250]
- [BGR 1998a] Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Weber, J.R., Wallner, M., Archiv-Nr. 117065, 30.03.1998 [P-71]

- [BGR 1998b] ERA Morsleben – Geologische Standortbeschreibung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Stork, G.-H., Archiv-Nr. 116747, 09.12.1998 [P-78]
- [BGR 1998c] ERA Morsleben – Hydrogeologische Standortbeschreibung und Modellgrundlagen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Langkutsch, U., Käbel, H., Margane, A., Schwamm, G., Archiv-Nr. 116906, 30.06.1998 [P-70]
- [BGR 1998d] ERA Morsleben – Geologische Gesamtbewertung der Lösungszutritte in den Gruben Bartensleben und Marie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Käbel, H., Archiv-Nr. 116678, Dezember 1998 [I-58]
- [BGR 1998e] Festigkeitsmechanische Untersuchungen an Bohrkernen - Darstellung der Einzelergebnisse. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Bleich, W., Schnier, H., Archiv-Nr. 117221, Stand 31.04.1998 [I-63]
- [BGR 1998f] ERA Morsleben – Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in-situ – Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Hunsche, U., Plischke, I., Schulze, O., Archiv-Nr. 117213, Stand 31.05.1998 [I-62]
- [BGR 1999a] Szenarienanalyse – Geologische Langzeitbewertung und Ermittlung der Zuflussszenarien ohne technische Maßnahmen; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Käbel, H., Keller, S., Gerardi, J., BGR-Bericht Archiv-Nr. 0119098, Stand 01.07.1999 [P-67]
- [BGR 1999b] Szenarienanalyse, Szenarienbewertung und geologische Langzeitprognose für das Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM) – Langzeitprognose der Auswirkungen klimagesteuerter geologischer Prozesse auf die Barrieren des Endlagers Morsleben, Abschlussbericht; Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Gerardi, J., Wildenborg, A.F.B. (NITG-TNO), BGR-Bericht Archiv-Nr. 0117869, Stand 29.01.1999 [I-205]
- [BGR 2000a] ERA Morsleben – Erarbeitung eines geologischen Lagerstättenmodells Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Behlau, H., Mingerzahn, G., Bornemann, O., Stand 20.12.2000 [P-44]
- [BGR 2000b] Wegsamkeiten im Hauptanhydrit des ERAM. Anhang zum Abschlussbericht Hydraulische Untersuchungen im Grubengebäude Morsleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Novak, T., Shao, H., Archiv-Nr. 0120283, 28.08.2000 [P-98]
- [BGR 2000c] ERA Morsleben – Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Bartensleben. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Heusermann, S., Nipp, H.-K., 9M 232 410 11, Archiv-Nr. 0120259, 14.12.2000 [P-99]
- [BGR 2000d] Gebirgsspannungsuntersuchungen im Grubengebäude Bartensleben – Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Heusermann, S., Hanisch, J., Sprado, K.-H., Kunz, H., Hoppe, F.-J., Küchemann, W., Archiv-Nr. 0120223, Stand 30.08.2000 [P-97]
- [BGR 2000e] ERA Morsleben – Dynamische Eigenschaften des ERAM-Deckgebirges – Auswertung von in situ-Messungen in schachtnahen Erkundungsbohrungen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Göbel, I., 9M 666 300 310, Archiv-Nr. 119984, Nov. 2000 [P-95]
- [BGR 2001a] ERA Morsleben – Einschätzung der Konvergenz in den Feldesteilen der Grube Bartensleben auf der Grundlage von FE-Berechnungen und In situ-Messungen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Eickemeier, R., Spies, Th., 9M 213 300 11, 30.03.2001
- [BGR 2001b] ERA Morsleben – Gebirgsmechanische Beurteilung der Integrität der Salzbarriere in der Schachanlage Marie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Heusermann, S., Göbel, I., Heemann, U., Tgb.-Nr. 10781/01, 20.07.2001 [P-113]
- [BGR 2001c] Bewertung geomechanischer und markscheiderischer Messungen, Zusammenfassender Bericht Verformungsmessungen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Spies, T., Schnier, H., Gerardi, J., Backhaus, D., Tgb.-Nr. 10833, 23.07.2001 [P-126]

- [BGR 2002] ERA Morsleben – Geowissenschaftliche Bewertung der Langzeitentwicklung sowie der Zufluss- und Austrittsszenarien nach Verfüllen des Endlagers. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, Käbel, H., Tagebuch-Nr. 11649/02, 30.04.2002 [P-132]
- [BMI 1983] Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Endlager. Rundschreiben des Bundesminister des Innern vom 20.04.1983 – RS – AGK 3 – 515 790/2. GMBI. 1983, S. 220
- [BMU 2006] Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung, Jahresbericht 2005. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn, 2006
- [Colenco 2001a] Endlager Morsleben – 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen: Modellaufbau, Modellkalibrierung R42, Rechenfall R43 und Rechenfall R44. Colenco Power Engineering AG, Klemenz, W., Klubertanz, G., Oswald, S., Siegel, P., Colenco-Bericht 4305/33, Juli 2001 [P-144]
- [Colenco 2001b] Endlager Morsleben – 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen: Abschätzung der möglichen Lösungszutritte aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude. Colenco Power Engineering AG, Klemenz, W., Siegel, P., Colenco-Bericht 4305/38, 08.11.2001 [P-121]
- [Colenco 2002a] Endlager Morsleben – 3D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Süßwasserverhältnissen: Rechnungen zur Ausbreitung der aus dem Grubengebäude ausgepressten Lösung. Colenco Power Engineering AG, Siegel, P., Klemenz, W., Resele, G., Colenco-Bericht 4305/39, 25.11.2002 [P-203]
- [Colenco 2002b] Endlager Morsleben – 2D Modellierung der Grundwasserbewegung im Deckgebirge unter Salzwasserverhältnissen: Modellrechnungen zur Auspressung von Salzlösung aus dem Grubengebäude. Colenco Power Engineering AG, Klemenz, W., Resele, G., Klubertanz, G., Siegel, P., Colenco-Bericht 4305/40, 23.12.2002 [P-170]
- [Colenco 2002c] Modellierung der Gasentwicklung im Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM). Colenco Power Engineering AG, Niemeyer, M., Poppei, J., Suter, D., Colenco-Bericht 4651/76, 18.09.2002 [P-151]
- [Colenco 2006] Modellrechnungen zur Verifikation des Programms PROSA (PROSA 8.0). Colenco Power Engineering AG, Niemeyer, M., Holocher, J., Colenco-Bericht 4651/146, 04.12.2006
- [Colenco 2009] Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. AF-Colenco AG, Baden (Schweiz). Colenco-Bericht 4651/200, März 2009 [P-277]
- [DBE 2004a] Verfüllung von Strecken mit hohen Anforderungen – Konzeptplanung und Nachweisführung. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht Dok.-Nr. 9M/22310111/AJ/GH/BZ/0063/00. Stand 28.06.2004 [P-195]
- [DBE 2004b] Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen – Materialeigenschaften und Materialkennwerte Salzbeton M2. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht Dok.-Nr. 9M/22343021/AJ/GH/BY/0054/00. Stand 17.11.2004 [P-192]
- [DBE 2005a] Standsicherheits- und Integritätsnachweis des verfüllten Endlagers: Grubenteil Südfeld. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht, 15.12.2005 [P-215]
- [DBE 2005b] Systembeschreibung der Verfüllung. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht, 15.12.2005 [G-217]
- [DBE 2005c] Verfüllplan zur Stilllegung des ERAM nach vorgezogener Verfüllung von Grubenbauen des Zentralteils, Konzeptplanung. DBE, Peine, [REDACTED] DBE-Bericht, 15.12.2005 [P-220]
- [DBE 2006a] Numerische Untersuchungen zum Konvergenzverhalten der Gruben Bartensleben und Marie. DBE, Peine, [REDACTED] DBE-Bericht, Stand 24.02.2006 [P-249]
- [DBE 2006b] Salzbeton – Zusammenstellung der Eigenschaften und Materialkennwerte (Referenzmaterial M3). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für



- Abfallstoffe mbH (DBE), Peine [REDACTED] DBE-Bericht, Stand 13.01.2006 [P-221]
- [DBE 2006c] Systembeschreibung – Material für die Stilllegung. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED], [REDACTED] DBE-Bericht, Stand 10.08.2006 [G-228]
- [DBE 2008a] Standsicherheits- und Integritätsnachweis des zugelaufenen Endlagers. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, [REDACTED] DBE-Bericht Dok.-Nr. 9M/22341021/GC/LD/0009/01. Rev. 1, Stand 11.04.2008 [P-267]
- [DBE 2008b] Geomechanische Betriebsüberwachung (Jahresberichte ab 1999). Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE), Peine, erstmals: [REDACTED] DBE-Bericht 9M/99Y/GC/BY/0010/00, 09.03.2000; Jahresbericht 2007: DBE-Bericht 9M/99Y/GC/BY/0037/00, 04.02.2008 [I-84] [I-109] [I-206] [I-207] [I-208] [I-209] [I-270]
- [ERCOSPLAN 2003] Nachweisführungen zur Langzeitsicherheit, zur Tragfähigkeit und zur Gebrauchstauglichkeit der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Teichert, T., ERCOSPLAN, Erfurt, 11.11.2003 [P-177]
- [ERCOSPLAN 2004] Konzeptplanung der Schachtverschlüsse ERA Morsleben. Rauche, H., Sitz, P., Lukas, V., Rumphorst, K., Lippmann, G., Wagner, K., Teichert, T., ERCOSPLAN, Erfurt, 10.03.2004 [P-182]
- [FZK INE 2000] Quellterme für HAW-Glas, abgebrannten Kernbrennstoff und zementierte Abfälle. Kienzler, B., Schüssler, W., Metz, V., Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Nukleare Entsorgung. FZK-INE 005/00, Karlsruhe 2000
- [GRS 1996a] Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle, Version 5. Storck, R., Buhmann, D., Hirsekorn, R.-P., Kühle, T., Lührmann, L., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, GRS-Bericht GRS-122, 1996
- [GRS 1996b] Das eindimensionale Transportprogramm CHET1 unter Berücksichtigung der Sorption nach dem Kd-Konzept. Kühle, T., Zude, F., Lührmann, L., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, GRS-Bericht GRS-124, 1996
- [GRS 1999] LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. Hirsekorn, R.-P., Boese, B., Buhmann, D., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, GRS-Bericht GRS-157, 1999
- [GRS 2002] Beitrag zur Erstellung einer Referenzbiosphäre zur Berechnung der in der Nachbetriebsphase eines Endlagers für radioaktive Stoffe hervorgerufenen potenziellen Strahlenexpositionen unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses des Klimas. Becker, A., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, GRS-Bericht GRS-A-3036, September 2002
- [GRS 2003] Endlager Morsleben – Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, Herbert, H.-J., Meyer, Th., Schmidt-Döhl, Bericht GRS - A - 3170, 31.10.2003 [P-180]
- [GRS 2009a] Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse zur Korrosion von Salzbeton durch saline Lösungen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, Hagemann, S., Xie, M., Herbert, H.-J., GRS-Bericht GRS-A-3458, März 2009
- [GRS 2009b] Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, Becker, D.-A., Buhmann, D., Mönig, J., Nooseck, U., Rübel, A., Spieß, S., GRS-Bericht GRS-A-3454, 27. März 2009 [P-278]
- [Grüschow & Ranft 2003] Erfassung und Bewertung von Lösungs- und Ausfällungsprozessen bei einer unterstellten Flutung des Endlagers für radioaktive Abfälle (ERAM). Grüschow, N., Ranft, M.; in Kali-, Steinsalz und Kupferschiefer in Mitteldeutschland IV, Hartmann, O., Schönberg, G. (Ed.); Exkurs. f. Veröf. f. GW 222, Berlin, 2003
- [GSF 2002] Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvor-



schrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad. GSF - Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Neuherberg, Pröhl, G., Gering, F., Stand 15.12.2002 [P-162]

- [IAEA 2006] Geological disposal of radioactive waste – Safety Requirements No. WS-R-4, IAEA Safety Standards. Jointly sponsored by IAEA and OECD/NEA, IAEA, Wien, 2006
- [ICRP 2000] Radiation Protection Recommendations as Applied to the Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste, Annals of the ICRP, Publication 81, Pergamon, Elsevier Science Ltd, Oxford, 2000
- [INE 1999] Nuklidmigration im Deckgebirge des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben (ERAM); Teil 1: Sorption im Grubengebäude. Teil 2: Sorption im Deckgebirge; Abschlussbericht. Vejmelka, P., Institut für Nukleare Entsorgung des Forschungszentrums Karlsruhe, 9M 212 230-61, Juli 1999
- [INE 2003] Nuklidmigration im Deckgebirge des ERAM (DGL), Abschlussbericht. Vejmelka, P., Lützenkirchen, J., Gompper, K., Nebelung, C., Baraniak, L., Institut für Nukleare Entsorgung des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK/INE), Karlsruhe, FZK-INE 012/03, 16.09.2003 [P-173]
- [INE&IRC 2004] Nuklidmigration im Deckgebirge des ERAM (DGL) – Abschlussbericht. Vejmelka, P., Lützenkirchen, J., Kelm, M., Bohnert, E., Gompper, K., Nebelung, C., Baraniak, L., Institut für Nukleare Entsorgung des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK/INE) und Institut für Radiochemie des Forschungszentrums Rossendorf (FZR/IRC), FZK-INE 014/03, 9M 212 230-62, April 2004
- [Itasca 1998] FLAC Fast lagrangian analysis of continua, theory and background. Itasca Consulting Group, Minneapolis, 1998
- [Kiraly 1985] FEM301 – A Three Dimensional Model for Groundwater Flow Simulation. Kiraly, L., Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (Schweiz). Nagra Technischer Bericht 84-49, Baden, Schweiz, 1985
- [K-UTEC 2008] Konzeptplanung und Nachweisführung für ein Abdichtungsbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton – Abschlussbericht. K-UTEC AG Salt Technologies, Sondershausen, 17.09.2008 [P-266]
- [OECD/NEA 1999] Confidence in the Long Term Safety of Deep Geological Repositories: Its Communication and Development. OECD NEA, OECD, Paris, 1999
- [OECD/NEA 2004] Post-Closure Safety Case for Geological Repositories – Nature and Purpose. OECD 2004, NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6
- [Popp 2007] Integrity of a salt barrier during gas pressure build up in a radioactive waste repository – implications from laboratory investigations and field studies. Popp, T., Minkley, W., Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig. Paper presented at the International Conference on Radioactive Waste Disposal in Geological Formations (REPOSAFE), Braunschweig, 6.-9.11.2007
- [Pruess 1999] TOUGH2 User's Guide, Version 2.0. Pruess, K., Oldenburg, C., Moridis, G., Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA, 1999
- [PSE 1985] Modellansätze und Ergebnisse zur Radionuklidfreisetzung aus einem Modellsalzstock. Storck, R., Brüggemann, R., Hossain, S., Kaschianian, B., Kühle, T., Nies, A., Ohme, G., Pattloch, F., Podtschaske, T., Rimkus, D., Stelte, N.. In: Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlussbericht, Fachband 16, Hahn-Meitner Institut, Berlin, 1985
- [RSK/SSK 2002] Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK betreffend BMU-Fragen zur Fortschreibung der Endlager-Sicherheitskriterien (5./6.12.2002). Reaktor-Sicherheitskommission und Strahlenschutzkommission, Bonn, 2002
- [Sonntag 1999] Interpretation der Isotopen-, Edelgas- und Salinitätsuntersuchungen an Grundwasserproben und am Porenwasser in frischen Bohrkernproben aus dem hydrogeologischen Untersuchungsgebiet des ERA Morsleben. Sonntag, C., M-21225011, erstellt im Auftrag des BfS, Heidelberg, 15.02.1999 [I-52]
- [Voigt 2008] Nachweisführung der chemischen und geochemischen Langzeitbeständigkeit für ein Abdichtbauwerk im Hauptanhydrit aus Magnesiabeton. Voigt, W., TU Bergaka-

demie Freiberg, Institut für Anorganische Chemie. BfS-PSP-Element: 9M 223 101-61. Freiberg, 30.03.2008

[Zerna 2009]

Endlager Morsleben – Dokumentation der Datenbasis in den Berichten GRS-A-3454 Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programmpaket EMOS und Colenco-Bericht 4651/200 Endlager Morsleben – Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm PROSA. **ZERNA** Zerna Ingenieure, 26.02.2009 [I-354]

ERA  
Morsleben

# GLOSSAR

<b>Aktivität</b>	Mengenangabe für Radionuklide (Einheit: Becquerel, Bq); 1 Bq ist die Menge Radionuklide, in der statistisch 1 radioaktiver Zerfall pro Sekunde stattfindet.
<b>Aller-Folge</b>	Schichtenfolge des Zechstein, sedimentiert zwischen 253 Mio. Jahren und 252 Mio. Jahren vor heute
<b>Auffahrung</b>	anderes Wort für Grubenbau
<b>Carnallit</b>	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
<b>Carnallitit</b>	Kalisalz-Gestein mit einer typischen Gesteinszusammensetzung der Hauptminerale Halit, Carnallit, Kieserit
<b>Dosiskoeffizient</b>	Radionuklidspezifischer Proportionalitätsfaktor zwischen der Strahlenexposition (Dosis, Einheit: Sievert, Sv) eines Menschen und der mit der Nahrung (Dosisfaktor für Ingestion) bzw. mit der Atemluft (Dosisfaktor für Inhalation) aufgenommenen Aktivität des betreffenden Radionuklids
<b>Dosiskonversionsfaktor</b>	Radionuklidspezifischer Proportionalitätsfaktor zwischen der jährlichen Strahlenexposition (Einheit: Sievert pro Jahr, Sv/a) eines Menschen und der Aktivitätskonzentration (Einheit: $\text{Bq}/\text{m}^3$ ) im genutzten Trink-, Grund- und Oberflächenwasser unter der Bedingung, dass sich der betroffene Mensch ganzjährig im Bereich dieser Aktivitätskonzentrationen aufhält und sich ausschließlich von lokal erzeugten Lebensmitteln ernährt
<b>Einlagerungsbereich</b>	räumlich begrenzter Bereich im Grubengebäude, der aus einem oder mehreren Einlagerungsgrubenbauen sowie ggf. benachbarten, hydraulisch gut verbundenen Grubenbauen besteht. Der Begriff Einlagerungsbereich wird mit ELB abgekürzt. Im ERAM wird zwischen abgedichteten und nicht abgedichteten ELB unterschieden. Ein abgedichteter ELB umfasst alle Grubenbaue, die durch das System der Abdichtungen von der übrigen Grube getrennt werden. Die nicht abgedichteten ELB umfassen definitionsgemäß lediglich die Einlagerungshohlräume im entsprechenden Feldeteil.
<b>Einlagerungshohlraum (auch Einlagerungsgrubenbau)</b>	Hohlraum in der Grube (Kammer, Strecke, etc.), in der radioaktive Abfälle eingelagert sind
<b>Firste</b>	obere Grenzfläche eines Grubenbaus
<b>Gesenk</b>	senkrechter Grubenbau über mehrere Sohlen, der nicht bis zur Tagesoberfläche reicht (Blindschacht) und der von oben nach unten aufgefahren wurde
<b>Grube</b>	Kurzform für Grubengebäude
<b>Grube, übrige</b>	Teil der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, die <u>nicht</u> einem Einlagerungsbereich angehört
<b>Grubenbau</b>	planmäßig bergmännisch erstellter Hohlraum unter Tage
<b>Grubengebäude</b>	Gesamtheit aller bergmännisch hergestellten Hohlräume eines Bergwerks

<b>Halit</b>	Mineralname für die chemische Verbindung Natriumchlorid (NaCl). Halit ist ein häufig vorkommendes Mineral aus der Mineralklasse der einfachen Halogenide. Es ist Hauptbestandteil vieler Salzgesteine (z. B. Steinsalz, Kalisalz).
<b>Hartsalz</b>	Kalisalz mit einer typischen Gesteinszusammensetzung der Hauptminerale Halit, Sylvin, Kieserit
<b>Hutgestein</b>	Gestein, das über Salzgesteinen beim Kontakt mit ungesättigten Wässern entsteht, wenn die löslichen Bestandteile aufgelöst und abtransportiert werden, die schwerlöslichen und unlöslichen Bestandteile verbleiben und eventuell zusätzlich neue Sulfatminerale ausfallen
<b>Kainit</b>	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{KMgClSO}_4 \cdot 2,75 \text{H}_2\text{O}$
<b>Kaliflöz</b>	Kalium-haltige Schicht im Salinar; in der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie bestehen die Kaliflöze vorwiegend aus Carnallit oder Hartsalz
<b>Kalisalz</b>	Salzgestein, das Kalium-haltige Minerale enthält, z. B. Carnallit, Kainit, Polyhalit, Sylvin
<b>Kieserit</b>	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
<b>Konturvolumen</b>	Das Konturvolumen eines Grubenbaus ist das aktuelle geometrische Volumen, das durch die Sohle, die Stöße und die Firste des Grubenbaus eingeschlossen wird. Es ist das aufgefahrene und das durch Nachschnitt geschaffene Hohlraumvolumen abzüglich des in der Vergangenheit durch Konvergenz „verschwundenen“ Volumens.
<b>Konvergenz</b>	Konvergenz eines Grubenbaus: Verformung eines Grubenbaus mit Abnahme seines Konturvolumens als Folge von Kriechvorgängen im angrenzenden Gebirge
<b>Leine-Folge</b>	Schichtenfolge des Zechstein, sedimentiert zwischen 254,5 Mio. Jahren und 253 Mio. Jahren vor heute
<b>Magnesiabeton</b>	aushärtende Mischung mit den Hauptbestandteilen Magnesiumoxid, Quarzsand, Anhydrit und einer $\text{MgCl}_2$ -Lösung. Die Festigkeit des Magnesiabetons wird durch die Sorelphase hervorgerufen. In der Doppel-Schachtanlage Bartensleben-Marie wird Magnesiabeton nur für die Errichtung der Abdichtung des ELB OF auf der 4. Sohle eingesetzt.
<b>Mischungsbereiche</b>	Teil des Grubengebäudes unterhalb der unterstellten Übertrittsstelle in die Wegsamkeit durch das Salinar in das Hutgestein, durch den sowohl die aus den ELB ausgepresste Lösung als auch die aus der übrigen Grube ausgepresste Lösung fließt und in dem sich die Lösungen mischen
<b>Permafrost</b>	Zustand des Bodens unter dauerhaft kalten klimatischen Bedingungen, bei dem das im Gestein enthaltene Grund- und Porenwasser permanent gefroren ist (z. B. Teile Alaskas und Sibiriens). Die permanent gefrorene Gesteinsschicht kann zwischen wenigen Metern und wenigen 100 Metern mächtig sein. Saisonal kann sie kurzzeitig an ihrer Oberfläche auftauen.



<b>Perzentilwert</b>	Der 95-Perzentilwert einer Größe, deren Wert gemäß einer Wahrscheinlichkeitsverteilung streut, ist der Wert, den die betrachtete Größe mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % unterschreitet, d. h. mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 % überschreitet.
<b>Pfeiler</b>	zwischen Grubenbauen der gleichen Sohle stehengebliebener Teil des Gebirges zu dessen Stützung
<b>Polyhalit</b>	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $K_2MgCa_2(SO_4)_4 \cdot 2H_2O$
<b>Querschlag</b>	etwa rechtwinklig zum Streichen der Lagerstätte aufgefahrene Strecke
<b>Rasenhängebank</b>	Niveau der Erdoberfläche im Bereich des Schachtes, Nullpunkt der Teufenmessung
<b>Restgrube</b>	Teil der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie, der <u>nicht</u> durch Abdichtungen von den Grubenbereichen abgetrennt ist, in die ein Lösungszutritt aus dem Hutgestein erfolgen kann
<b>Restgrube, sonstige</b>	Grube ohne Einlagerungsbereiche und ohne Mischungsbereiche
<b>Rollloch</b>	stark geneigter Grubenbau von geringem Querschnitt zur Abwärtsförderung von Lockergestein oder zur Wetterführung (Wetterrollloch)
<b>Salinar</b>	siehe Salzgestein
<b>Salzbeton</b>	aushärtende Mischung aus Salzgrus, Zement, Steinkohlenfilterasche und Wasser, in der Doppel-Schachanlage Bartensleben-Marie als Versatz eingesetzt
<b>Salzgestein</b>	Sammelbegriff für Gestein, das durch fortschreitende Eindunstung von Wasser unter wüstenartigen klimatischen Bedingungen entstanden ist. Salzgesteine entstehen durch Ablagerung an einem Meeres- oder Seeboden, wobei zuerst die weniger löslichen Minerale und am Ende die leicht löslichen Minerale (z. B. Kalisalze) auskristallisieren. Eine Abfolge von Salzgesteinen wird auch als Salinar bezeichnet.
<b>Salzgrus</b>	gebrochenes Steinsalz mit nicht näher bezeichneter Korngröße
<b>Salzspiegel</b>	obere Grenzfläche zwischen dem (noch) nicht durch Subrosion veränderten Salinalgestein und den darüber liegenden Rückstandsbildungen (Hutgestein)
<b>Schwebe</b>	Teil des Gebirges, der zwei übereinander liegende Grubenbaue voneinander trennt
<b>Sohle</b>	Gesamtheit der annähernd in einem Niveau aufgefahrenen Grubenbaue; auch untere Grenzfläche eines Grubenbaus
<b>Sorelphase</b>	(genauer: 3-1-8-Sorelphase) Mineral mit der chemischen Zusammensetzung $3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ . Die Sorelphase erzeugt die Festigkeit von Magnesiabeton.
<b>Staßfurt-Folge</b>	Schichtenfolge des Zechstein, sedimentiert zwischen 256 Mio. Jahren und 254,5 Mio. Jahren vor heute
<b>Steinsalz</b>	Salzgestein, das bis auf geringe Beimengungen anderer Minerale aus Halit, d. h. NaCl besteht

<b>Stoß</b>	seitliche Grenzfläche eines Grubenbaus
<b>Strecke</b>	tunnelartiger und nahezu söhlig aufgefahrener Grubenbau
<b>Subrosion</b>	(genauer: Salinar-Subrosion) Lösungsprozess, der auftritt, wenn die Gesteine einer Salzstruktur in Kontakt mit ungesättigten Grund- und Formationswässern des angrenzenden Gebirges kommen und dadurch leichtlösliche Bestandteile (Salzminerale) aufgelöst und mit den Wässern weggeführt werden. Aus den zurückbleibenden schwer- und unlöslichen Mineralen der Salzgesteine (Anhydrit, Tonminerale), den schwer- und unlöslichen Gesteinen im Salinar (z. B. Hauptanhydrit, Leinekarbonat) sowie eventuellen Sulfatneubildungen entsteht das Rückstandsgebirge. Dieses wird – sofern es oberhalb einer Salzstruktur liegt – als Hutgestein bezeichnet.
<b>Sylvin</b>	Mineral mit der chemischen Zusammensetzung KCl [K <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> ]
<b>Toxizitätsindikator</b>	Maß für das Gefährdungspotenzial der Radionuklide in einer bezeichneten Menge Material (Abfall, kontaminiertes Gestein, etc.); hier Summe der Produkte von radionuklidspezifischem Aktivitätsinventar und Dosiskoeffizient für Ingestion (Einheit: Sv).
<b>Versatz</b>	hier: Material für die Verfüllung von Grubenbauen zur Verringerung des fluidzugänglichen Hohlraums und/oder zur gebirgsmechanischen Stützung
<b>Werra-Folge</b>	Schichtenfolge des Zechstein, sedimentiert zwischen 258 Mio. Jahren und 256 Mio. Jahren vor heute
<b>Wetter</b>	Grubenluft
<b>Zechstein</b>	Deutsche Bezeichnung für eine geologische Zeitepoche. Sie dauerte von rund 258 Mio bis 251 Mio Jahren vor heute. Sie bildet zusammen mit dem älteren Rotliegenden das Perm. In Teilen West- und Mitteleuropas wurden im Zechstein mehrere aufeinander folgende Serien verschiedener Salzgesteine mit Mächtigkeiten bis zu mehreren 100 Metern abgelagert.