

Gesamtbewertung der
Langzeitsicherheit für
den Standort Asse
(Konsequenzenanalyse)

Rev. 00

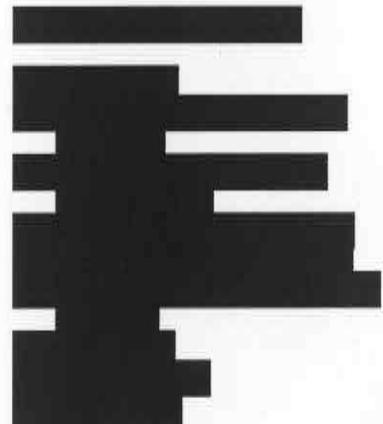
Gesamtbewertung der
Langzeitsicherheit für den
Standort Asse
(Konsequenzenanalyse)



Dezember 2006

Auftrags-Nr. (GRS): 420401

Rev. 00



Anmerkung:

Dieser Bericht ist federführend von GRS im Auftrag der DBETec in Zusammenarbeit mit Colenco und GSF erstellt worden. Die Rechte an diesem Bericht liegen bei GSF/FB Asse. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit Zustimmung der GSF zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ziel des Langzeitsicherheitsnachweises für den Standort Asse.....	2
1.2	Inhalt und Struktur des Berichtes	3
2	Standortbedingungen.....	5
2.1	Beschreibung der Schachanlage Asse II.....	5
2.1.1	Auffahrungen des Grubengebäudes	6
2.1.2	Stoffinventar	8
2.2	Geologische Standortverhältnisse.....	14
2.2.1	Salzsattel.....	15
2.2.2	Deckgebirge	19
2.3	Gebirgsmechanische Standortverhältnisse.....	20
2.3.1	Gegenwärtige Situation.....	21
2.3.2	Entwicklung in der Betriebsphase	25
2.4	Seismologische Standortverhältnisse	26
2.5	Hydrogeologische Standortverhältnisse	26
2.6	Salzlösungszutritte	33
2.7	Situation an der Tagesoberfläche	36
3	Bewertungskriterien	41
3.1	Schutzziele	41
3.2	Sicherheits- und Funktionsindikatoren	42
4	Sicherheits- und Schließungskonzept	45
4.1	Sicherheitskonzept.....	45
4.2	Schließungskonzept.....	46
4.2.1	Einleitung des Schutzfluids	48
4.2.2	Einbau von technischen Strömungswiderständen	49
4.2.2.1	Strömungsbarrieren und Stützversatz	49
4.2.2.2	Schotterstrecken	50
4.2.2.3	Verfüllung offener Grubenbaue.....	51
4.2.2.4	Verfüllung von Bohrungen	52
4.2.2.5	Schachtverschlüsse	52
4.2.3	Einbau von Magnesium-Depot.....	53
4.2.4	Verfüllung der MAW-Kammer	54
4.3	Schlussfolgerungen	55
5	Geowissenschaftliche Langzeitprognose und Szenarien	57
5.1	Geowissenschaftliche Langzeitprognose	57
5.1.1	Mögliche Entwicklungen in den nächsten 150 000 Jahren	58
5.2	Szenarientwicklung	61
5.2.1	Zielsetzung und Vorgehen	61
5.2.2	Szenariengruppe des Referenzszenarios	64
5.2.3	Alternative Szenariengruppen.....	66

5.3	Relevante Ereignisse und Prozesse	72
6	Modellierung von Einzelprozessen und Teilsystemen	75
6.1	Geochemische Modellrechnungen für die Einlagerungskammern	75
6.1.1	Konzeptuelles Modell und Datenbasis	75
6.1.2	Ergebnisse für das geochemische Milieu.....	78
6.1.3	Ergebnisse für die Mobilisierung von Schadstoffen	84
6.2	Ermittlung der Quellterme für die Transportmodellierungen.....	89
6.2.1	Radionuklid-Quellterm.....	89
6.2.1.1	Datenbasis	89
6.2.1.2	Modellierung	89
6.2.1.3	Ergebnisse	91
6.2.2	Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe	93
6.2.2.1	Vorgehen und Datenbasis	93
6.2.2.2	Modellierung	94
6.2.2.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	95
6.3	Gasbildung	98
6.3.1	Datenbasis	98
6.3.2	Grundlagen der Modellierung.....	99
6.3.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	100
6.4	Konvektion im Grubengebäude	103
6.4.1	Zielsetzung, Vorgehen und Datenbasis	103
6.4.2	Modellierung.....	106
6.4.3	Ergebnisse der Modellrechnungen und Bewertung	106
6.5	Gebirgsmechanische Modellrechnungen	107
6.5.1	Datenbasis	108
6.5.2	Modellierung.....	110
6.5.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	112
6.6	Detailrechnungen zu Fluidbewegungen im Grubengebäude	115
6.6.1	Konzeptuelle Modelle und Datenbasis.....	116
6.6.2	Numerisches Modell.....	118
6.6.3	Ergebnisse und Bewertung	120
6.7	Übertrittsstelle zum Deckgebirge	122
6.7.1	Zielsetzung und Vorgehen	122
6.7.2	Parametrisierung der hydraulischen Schnittsstelle	124
6.7.3	Ergebnisse der Parametrisierung und Bewertung	125
6.8	Hydrogeologische Modellrechnungen (Deckgebirge).....	127
6.8.1	Konzeptuelles Modell und Datenbasis	127
6.8.2	Numerisches Modell.....	134
6.8.3	Lösungsbewegung im Deckgebirge: Ergebnisse und Bewertung.....	135
6.8.4	Schadstoffausbreitung im Deckgebirge: Ergebnisse und Bewertung	139
6.9	Biosphärenmodell.....	144
6.9.1	Datenbasis	144
6.9.2	Modellierung.....	145
6.9.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	148

7	Konsequenzenanalyse	151
7.1	Methodisches Vorgehen.....	153
7.2	Gebirgsmechanische Langzeitprognose	155
7.2.1	Referenzentwicklung.....	156
7.2.2	Alternative Entwicklungen	159
7.3	Bergschadenkundliche Senkungsvorausberechnung	160
7.3.1	Konzeptuelles Modell.....	161
7.3.2	Berechnungsmodell	161
7.3.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	162
	Schlussfolgerungen	164
7.4	Freisetzung wasserrechtlich relevanter Stoffe in die Biosphäre.....	165
7.4.1	Konzeptuelle Modelle.....	166
7.4.2	Berechnungsmodelle	167
7.4.3	Ergebnisse und Konsequenzen	168
7.5	Potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre über den Lösungspfad	169
7.5.1	Nachweismodell.....	170
7.5.1.1	Nahfeld.....	171
7.5.1.2	Deckgebirge.....	182
7.5.1.3	Biosphäre.....	182
7.5.2	Berechnungsmodelle	183
7.5.3	Ergebnisse der Modellrechnungen für den Referenzfall ^{TF}	187
7.5.3.1	Lösungstransport aus der Grube	188
7.5.3.2	Gasbildung; Gasflüsse; Gasspeicherung.....	188
7.5.3.3	Lösungsflüsse und Transport von Schadstoffen in der Grube.....	188
7.5.3.4	Transport im Deckgebirge und Gesamtstrahlenexposition	189
7.5.4	Ergebnisse der Modellrechnungen für die kombinierte Variante	190
7.5.4.1	Lösungstransport aus der Grube	191
7.5.4.2	Gasbildung; Gasflüsse; Gasspeicherung.....	192
7.5.4.3	Lösungsflüsse und Transport von Schadstoffen in der Grube.....	193
7.5.4.4	Transport im Deckgebirge und Gesamtstrahlenexposition	195
7.5.4.5	Bewertung von Modellunterschieden KAFKA / LOPOS.....	196
7.5.4.6	Schlussfolgerungen aus der kombinierten Variante	197
7.5.5	Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtungen	198
7.5.6	Ergebnisse der alternativen Szenarien	201
7.5.7	Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse.....	203
7.5.8	Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse.....	206
7.5.9	Schlussfolgerungen.....	208
7.6	Potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre über den Gaspfad	210
7.6.1	Konzeptuelles Modell.....	210
7.6.2	Berechnungsmodelle	213
7.6.3	Ergebnisse der Modellrechnungen	213
7.6.4	Konsequenzen	215
7.7	Kritikalitätssicherheit.....	215
7.7.1	Inventar kritikalitätsrelevanter Stoffe	216
7.7.2	Lösung, Mobilisierung- und Aufkonzentration der Kernbrennstoffe	217
7.7.3	Kritikalitätsanalyse	218

7.7.4	Fazit	220
8	Gesamtbewertung.....	221
8.1	Bewertung des Nachweiskonzepts	221
8.2	Bewertung des Schließungskonzepts	222
8.3	Ergänzende langzeitsicherheitsrelevante Aspekte.....	224
8.3.1	Vergleich von Radiotoxizitäten.....	224
8.3.2	Robustheit des Systems	226
8.3.3	Funktionsindikatoren	229
8.3.3.1	Rückhaltung in der Grube	229
8.3.3.2	Integrierte Freisetzung aus Teilbereichen der Grube	232
8.3.3.3	Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser	234
8.4	Bewertung der Sicherheitsanalyse	236
8.4.1	Vertrauenswürdigkeit und Verlässlichkeit des Nachweises (confidence)	237
8.4.2	Bewertung der Nachweismodelle und Berechnungen	237
8.4.2.1	Modelle und Berechnungen für Einzelprozesse und Teilsysteme	238
8.4.2.2	Modelle und Berechnungen für die Konsequenzenanalyse.....	243
8.4.3	Bewertung der Konsistenz zwischen den Modellrechnungen.....	246
9	Schlussfolgerungen.....	251
10	Literatur	255

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.2-1:	Vorgehensweise zur Entwicklung des Sicherheits- und Schließungskonzepts und von Szenarien für die mögliche Langzeitentwicklung des Systems	3
Abb. 1.2-2:	Konzept für den Langzeitsicherheitsnachweis	4
Abb. 2.1-1:	Abnahme des Aktivitätsinventars durch radioaktiven Zerfall.....	10
Abb. 2.1-2:	Abnahme der Aktivität des LAW-Inventars durch radioaktiven Zerfall	10
Abb. 2.2-1:	Salzspiegel der Struktur Asse-Heeseberg	17
Abb. 2.2-2:	Regionalgeologische und tektonische Situation der Salzstruktur Asse-Heeseberg	18
Abb. 2.3-1:	Entwicklung der Pfeilerstauchungsrate am Beispiel des Pfeilers zwischen Abbau 2/658 und Abbau 3/658.	22
Abb. 2.3-2:	Isolinien der Senkungen und Nivellements der Höhenänderungen an der Tagesoberfläche im Bereich der Schachanlage Asse II von 1988 bis 2004	24
Abb. 2.5-1:	Grundwasserbewegungen am Standort Asse.....	31
Abb. 2.6-1:	Entwicklung der Zutrittsrate im Baufeld in der Südflanke.....	34
Abb. 2.6-2:	Entwicklung der Lösungszusammensetzung der aufgefangenen Lösungen im Baufeld in der Südflanke	34
Abb. 2.7-1:	Mögliche Expositionspfade bei der Nutzung von kontaminiertem Wasser	37
Abb. 4.1-1:	Schematische Darstellung des Multibarrierensystems der Schachanlage Asse	46
Abb. 4.2-1:	Schematische Darstellung der Einlagerung und Verfüllung in der MAW-Kammer	55
Abb. 6.1-1:	Schematische Darstellung einer Einlagerungskammer als ein System mit eingeschränktem Lösungsaustausch mit der Umgebung	77
Abb. 6.1-2:	Schematische Darstellung des Systems Einlagerungskammer einschließlich seiner Wechselwirkungen mit der Umgebung.....	78
Abb. 6.1-3:	Relevante geochemische Prozesse für die Freisetzung bzw. Rückhaltung von Radionukliden bzw. chemotoxischen Stoffen in Einlagerungskammern.....	85
Abb. 6.1-4:	Vergleich der kammerspezifischen Am-Inventarkonzentrationen mit maximal möglichen Am(III)-Konzentrationen unter Berücksichtigung von Löslichkeit und Sorption.....	87
Abb. 6.1-5:	Vergleich der kammerspezifischen Pu-Inventarkonzentrationen mit maximal möglichen Pu(III/IV)-Konzentrationen unter Berücksichtigung	

	von Löslichkeit und Sorption. Verhältnisse vor einer möglichen Änderung in der ELK 11/750.	87
Abb. 6.1-6:	Vergleich der kammer-spezifischen U-Inventarkonzentrationen mit U(VI)-Löslichkeitsgrenzen	88
Abb. 6.1-7:	Vergleich der kammer-spezifischen Th-Inventarkonzentrationen mit Th(IV)-Löslichkeitsgrenzen	88
Abb. 6.3-1:	Vergleich der realistischen Gasbildung und der Gasbildung unter Annahme der vollständigen Umsetzung des organischen Materials mit maximaler CO ₂ -Bildung.....	101
Abb. 6.3-2:	Bandbreite der Gasbildung in den Einlagerungskammern der Schachanlage Asse nach Herkunft unter realistischen Bedingungen	102
Abb. 6.5-1:	Scherdeformationen in der Südflanke des Asse Sattels im Jahr 2004	113
Abb. 6.5-2:	Scherdeformationen in der Südflanke kurz nach dem Einleiten des Schutzfluids mit Beaufschlagung eines pneumatischen Drucks.....	115
Abb. 6.6-1:	3D-Modell des Bereichs um den ELB-MAW für die speziellen Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss mit dem Programm TOUGH2	119
Abb. 6.6-2:	Sättigungsprofile längs einer vertikalen Linie durch den MAW-Fasskegel, die Schwebelage und den Firstbereich des Abbaus 8a/532 zu verschiedenen Zeiten	121
Abb. 6.7-1:	Zeitlicher Verlauf des Lösungsdrucks an der Schnittstelle Grubengebäude – Deckgebirge gemäß zwei Rechenläufen für den Deckgebirgs-Rechenfall R13 und den – im Iterationsprozess dazwischen liegenden – Grubengebäude-Rechenfall RVI.8-L	126
Abb. 6.8-1:	3D-Ansicht des hydrogeologischen Modells für das Deckgebirge	128
Abb. 6.8-2:	Filtergeschwindigkeit der Lösungsbewegung im heutigen Zustand (Rechenfall R14).....	137
Abb. 6.8-3:	Ausbreitung von Grubenlösung in der Nachbetriebsphase zu den Zeitpunkten 1 100 Jahre und 9 600 Jahre (Rechenfall R14)	138
Abb. 6.8-4:	Ausbreitung von Tracer in der Nachbetriebsphase zum Zeitpunkt 3 000 Jahre (Rechenfall R14).....	140
Abb. 6.8-5:	Ausbreitung von Tracer in der Nachbetriebsphase zum Zeitpunkt 28 000 Jahre (Rechenfall R14).....	141
Tab. 6.8-1:	Verdünnungsfaktoren der verschiedenen Ausbreitungspfade für Schadstoffaustritt in das Deckgebirge ab 2 000 Jahren	142
Abb. 6.8-6:	Transferfunktionen für die Exfiltrationsgebiete vD-Amm und m-Witt (Rechenfall R14).....	143
Abb. 6.9-1:	Expositionspfade bei der Nutzung von kontaminiertem Oberflächenwasser am Standort Asse.....	146
Abb. 7.0-1:	Flussdiagramm für die Modellrechnungen in der Konsequenzenanalyse.....	152

Abb. 7.1-1:	Schnittstellen der Modellrechnungen	154
Abb. 7.2-1:	Entwicklung der Konvergenzraten auf der 750-m-Sohle im Baufeld im Sattelkern (Steißfurt-Steinsalz).....	157
Abb. 7.2-2:	Entwicklung der Porositäten auf der 750-m-Sohle im Baufeld im Sattelkern (Steißfurt-Steinsalz).....	157
Abb. 7.2-3:	Bandbreite der Konvergenzraten für das gesamte Grubengebäude; nach ca. 20 Jahren wird hierdurch auch Lösung in das Deckgebirge verdrängt.....	158
Abb. 7.3-1:	Ergebnisse der Senkungsberechnungen für das SW-NE gerichtete Profil 2.....	163
Abb. 7.3-2:	Isolinienplan der Oberflächenabsenkung in mm für das Jahr 100 000	164
Abb. 7.5-1:	Blockbild der Strukturmodelle D4 und D5	173
Abb. 7.5-2:	Haupttransportpfade von den ELB zu den Austrittsstellen zum Deckgebirge.....	189
Abb. 7.5-3:	Lösungsströme aus der Grube (kombinierte Variante vs. Referenzfall).	191
Abb. 7.5-4:	Druckentwicklung in ausgewählten Bereichen des Grubengebäudes (kombinierte Variante vs. Referenzfall).....	192
Abb. 7.5-5:	Lösungssättigung in den Einlagerungsbereichen (KAFKA, kombinierte Variante vs. Referenzfall)	193
Abb. 7.5-6:	Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil. Kombinierte Variante	194
Abb. 7.5-7:	Potenzielle Strahlenexposition in den Exfiltrationsgebieten (Kombinierte Variante vs. Referenzfall ^{TF}).....	195
Abb. 7.5-8:	Lösungssättigung in den Einlagerungsbereichen (LOPOS, kombinierte Variante vs. Referenzfall)	197
Abb. 7.5-9:	Einfluss der Radionuklide aus der MAW-Kammer auf die gesamte potenzielle Strahlenexposition. Szenario LsgMAW	202
Abb. 7.5-10:	Komplementäre kumulative Häufigkeiten der maximalen Strahlenexpositionen	205
Abb. 7.5-11:	Scatterplot für die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke für das Gebiet vD-Amm	208
Abb. 7.7-1:	Berechneter Neutronenmultiplikationsfaktor Kinf für die Bedingungen in den Einlagerungskammern der Schachanlage Asse II	219
Abb. 8.3-1:	Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität mit Beiträgen relativ kurzlebiger Radionuklide	225
Abb. 8.3-2:	Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität mit Beiträgen langlebiger Radionuklide	225

Abb. 8.3-3:	Übersicht der berechneten globalen Maxima der potenziellen Strahlenexpositionen	227
Abb. 8.3-4:	Lösungsströme und Plutoniumkonzentrationen an den Austrittsstellen aus der Grube in 500 m und 574 m Teufe.....	230
Abb. 8.3-5:	Zeitlicher Verlauf der eingelagerten Inventare und der in das Deckgebirge ausgetretenen Inventare für Radionuklide mit teilweise begrenzenden, maximalen Elementkonzentrationen in den ELB	231
Abb. 8.3-6:	Zeitlicher Verlauf der eingelagerten Inventare und der in das Deckgebirge ausgetretenen Inventare für inventarbestimmte Radionuklide	232
Abb. 8.3-7:	Relative integrierte Radiotoxizitätsfreisetzung für das Referenzszenario	233
Abb. 8.3-8:	Vergleich der gemessenen Radionuklidkonzentrationen in natürlichen Wässern mit berechneten Werten für die kombinierte Variante	236
Abb. 8.4-1:	Abstimmung der Schnittstellen für Modellrechnungen.....	247

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1-1:	Grubenbaue der LAW-Einlagerungsbereiche auf der 750-m- und 725-m-Sohle.....	8
Tab. 2.1-2:	Aktivitäten von ausgewählten Radionukliden (Bezugszeitpunkt 01.01.2005).....	11
Tab. 2.1-3:	Grundwassergefährdende Stoffe im Abfallinventar.....	12
Tab. 2.1-4:	Chemotoxische Stoffe im Abfallinventar	13
Tab. 6.1-1:	Lösungszusammensetzungen in den Einlagerungskammern nach Umsetzung der reaktiven Kammerinhaltsstoffe im Gleichgewichtszustand	81
Tab. 6.2-1:	Maximal mögliche Elementkonzentrationen in Einlagerungsbereichen	92
Tab. 6.2-2:	Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe in Einlagerungsbereichen (maximale Stoffkonzentrationen bezogen auf Wasseranteil des Schutzfluids)	96
Tab. 6.4-1:	Erhöhte Werte für die Porendiffusivität (D_{pE}) zur näherungsweise Berücksichtigung des konvektiven Schadstofftransports aus Einlagerungsbereichen	107
Tab. 6.9-1:	Dosiskonversionsfaktoren für die Exposition bei Nutzung von kontaminiertem Oberflächenwasser am Standort Asse.....	150
Tab. 7.4-1:	Verdünnungsfaktoren für Lösungsinhaltsstoffe aus den Einlagerungsbereichen bei einer Exfiltration im Tal von Wittmar	167
Tab. 7.5-1:	Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen in Jahren für die kombinierte Variante	194
Tab. 7.5-2:	Themen der Unsicherheitsbetrachtungen zu Daten und Modellen	200
Tab. 7.5-3:	Statistische Kenngrößen der Monte-Carlo-Simulation	204
Tab. 7.5-4:	Rangfolge ausgewählter unabhängiger Zufallsgrößen für die Stichprobe der maximalen Strahlenexpositionen.....	207
Tab. 7.6-1:	Potenzielle Strahlenexposition für über den Gaspfad freigesetztes ^{14}C für verschiedene Szenarien	214
Tab. 7.7-1:	Inventar, Anreicherung und maximaler Austrag der Kernbrennstoffe	217
Tab. 8.3-1:	Radionuklidkonzentrationen in Trinkwasser in Deutschland.....	235
Tab. 8.3-2:	Radionuklidkonzentrationen in Grundwasser in Deutschland.....	235

1 Einleitung

Zur endgültigen Schließung der Schachanlage Asse II ist nach den Vorschriften des Bundesberggesetzes (§ 53 BBergG) ein Abschlussbetriebsplan einzureichen, dem u.A. ein Langzeitsicherheitsnachweis für den Standort beizufügen ist. Der Langzeitsicherheitsnachweis orientiert sich neben den bergrechtlichen Anforderungen an sicherheitstechnischen Anforderungen /BMI 1983/, die auch in atomrechtlichen Verfahren bei der Schließung eines Endlagers für radioaktive Abfälle zu Grunde gelegt werden.

Die Schutzziele, deren Einhaltung für einen langen Zeitraum in der Nachbetriebsphase der Schachanlage Asse II nachgewiesen werden muss, sind

- der Schutz des Menschen vor unzulässiger Strahlenexposition,
- der Schutz des oberflächennahen Grundwassers vor unzulässiger Verunreinigung sowie
- die Begrenzung der Oberflächenabsenkung.

Der Langzeitsicherheitsnachweis für das komplexe Gesamtsystem am Standort Asse erfordert umfangreiche interdisziplinäre Untersuchungen, deren Ergebnisse in einer Vielzahl von Prüfunterlagen dokumentiert sind. Die umfassende wissenschaftlich-technische Erläuterung und Gesamtbewertung der Langzeitsicherheit in Bezug auf die Schutzziele für den Standort erfolgt in dieser Unterlage. Der Sicherheitsbericht /GSF 2006h/ stellt ergänzend eine allgemein verständliche Beschreibung des Langzeitsicherheitsnachweises dar.

Der Langzeitsicherheitsnachweis basiert auf einer umfassenden Analyse der Standortverhältnisse und der Prognose möglicher zukünftiger Entwicklungen am Standort Asse. Der Schadstofftransport bis in die Biosphäre wird durch natürliche und technische Barrieren, die ein Multibarrierensystem (MBS) bilden, begrenzt. Die Funktion und Wirkung der einzelnen Komponenten des MBS und die Wirkung des MBS als Ganzes werden mittels Modellrechnungen untersucht und bewertet. Mögliche Schadstofffreisetzungen in die Biosphäre und Beeinträchtigungen an der Tagesoberfläche werden anhand gesetzlicher Forderungen bewertet. Die einzelnen Schritte des Langzeitsicherheitsnachweises sind:

- die Beschreibung der Standortverhältnisse, einschließlich der Schachanlage Asse II sowie der Geosphäre und Biosphäre,
- die Definition der Schutzziele,
- die Beschreibung des Sicherheits- und Schließungskonzepts,
- die Prognosen der möglichen Langzeitentwicklungen des Gesamtsystems Asse unter geowissenschaftlichen, gebirgsmechanischen und geotechnischen Gesichtspunkten,
- die Identifizierung der für die Mobilisierung und den Transport von Schadstoffen relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse (FEP¹),

¹ FEP – features, events and processes für Eigenschaften bzw. Merkmale, Ereignisse und Prozesse

- die Entwicklung möglicher Szenarien der Schadstoffausbreitung, ausgehend von einem erwarteten Systemverhalten (Referenzszenario),
- die Ableitung von konzeptuellen Modellen für die Abbildung der für relevant erachteten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse sowie deren numerische Umsetzung in den Rechenprogrammen,
- die Berechnung der Lösungs- und Gasbewegungen sowie des Schadstofftransports für mögliche Standortentwicklungen,
- die Berechnung der Absenkung der Tagesoberfläche sowie
- die Bewertung der Modellergebnisse und der Erkenntnisse bezüglich des Systemverhaltens.

Der vorliegende Langzeitsicherheitsnachweis schöpft das Sicherheitspotenzial am Standort Asse nicht vollständig aus. Bei Ungewissheiten werden eher ungünstige Randbedingungen, Modellansätze und Parameter berücksichtigt. Durch die Vorgehensweise wird gewährleistet, dass der Langzeitsicherheitsnachweis weiterhin gültig ist, auch wenn einzelne FEP signifikant vom Erwartungswert abweichen. Die Ungewissheiten werden in Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen im Rahmen von probabilistischen Modellrechnungen behandelt.

1.1 Ziel des Langzeitsicherheitsnachweises für den Standort Asse

Der Langzeitsicherheitsnachweis hat in erster Linie das Ziel, aufzuzeigen, dass die vorgesehenen Maßnahmen zur Schließung der Schachanlage Asse II geeignet sind, um in der Nachbetriebsphase unzulässige Einflüsse auf den Mensch und die Naturgüter zu verhindern. Er zeigt überdies mit einer Vielzahl von Argumenten und Analysen die Notwendigkeit der geplanten Schließungsmaßnahmen im Einzelnen und in der Gesamtheit für die Sicherheit am Standort Asse. Die anforderungsgerechte Umsetzung der Schließungsmaßnahmen und die Standsicherheit des Grubengebäudes in der Betriebsphase sind eine Voraussetzung für die Langzeitsicherheit.

Um die Vertrauenswürdigkeit und die Verlässlichkeit des Langzeitsicherheitsnachweises zu unterlegen, werden die verbleibenden Ungewissheiten in der Nachweisführung und im Systemverhalten am Standort Asse umfassend berücksichtigt. Dabei werden die Ungewissheiten bei der Prognose des langzeitigen Systemverhaltens (Szenarientwicklung) sowie die Ungewissheiten der konzeptuellen und numerischen Modelle für die Abbildung des Systemverhaltens und deren Parametrisierung diskutiert.

Die Bewertung der Ergebnisse der deterministischen und probabilistischen Unsicherheits- und Sensitivitätsbetrachtungen erfolgt im Hinblick auf die Einhaltung der Schutzziele. Die Bewertung wird durch Sicherheits- und Funktions-Indikatoren sowie durch Untersuchungen zur Robustheit des Systemverhaltens ergänzt. Die Einflüsse von ungünstigen bzw. konservativen Randbedingungen, Modellansätzen und Parametern auf die Ergebnisse werden eingeschätzt. Die Ergebnisse einer Untersuchung zur Kritikalitätssicherheit werden bewertet.

1.2 Inhalt und Struktur des Berichtes

Inhalt und Struktur des Berichts orientieren sich an den oben dargestellten Zielen und der Nachweisführung. Ausgangspunkt aller Untersuchungen sind die Rahmenbedingungen am Standort. Diese umfassen

- die geologischen, gebirgsmechanischen, seismologischen und hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich der Schachanlage Asse II sowie die Verhältnisse in der Biosphäre (Kapitel 2) und
- die Schutzziele für den Standort Asse (Kapitel 3).

Unter Berücksichtigung der Standortbedingungen und deren möglichen zukünftigen Entwicklungen wurde das Sicherheits- und Schließungskonzept für die Schachanlage Asse II in einem iterativen Verfahren erarbeitet; hierbei wurden alternative technische Maßnahmen im Grubengebäude hinsichtlich der Funktionalität und Wirkung überprüft /GSF 2006c/. Die Funktionen der vorgesehenen Schließungsmaßnahmen werden genannt und ihre Notwendigkeit für den Nachweis der Langzeitsicherheit begründet (Kapitel 4).

Auf Basis der Standortbedingungen und der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie unter Berücksichtigung der geplanten Schließungsmaßnahmen werden mögliche Szenarien für das Gesamtsystem in der Nachbetriebsphase entwickelt, siehe Abbildung 1.2-1. Die Eintretenswahrscheinlichkeit für die Szenarien wird beurteilt und die für das Systemverhalten relevanten Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse werden genannt (Kapitel 5).

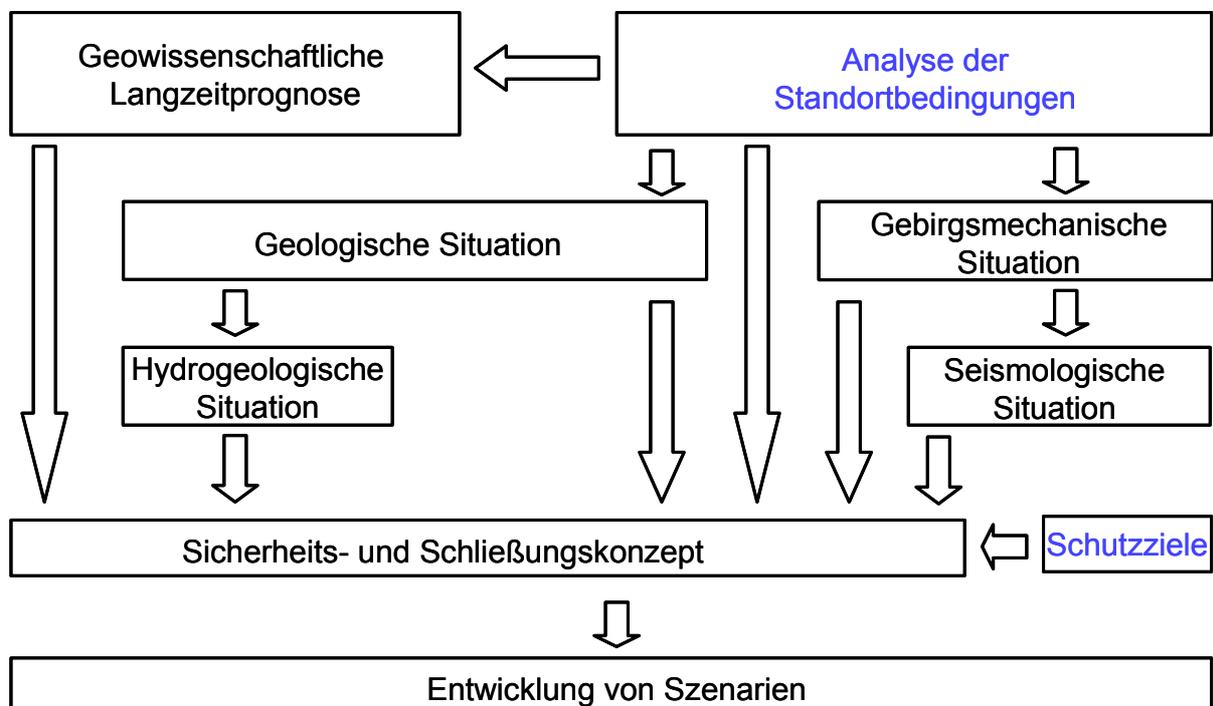


Abb. 1.2-1: Vorgehensweise zur Entwicklung des Sicherheits- und Schließungskonzepts und von Szenarien für die mögliche Langzeitentwicklung des Systems

Die in Abbildung 1.2-1 angeführten Standortbedingungen, das Schließungskonzept und die nicht auszuschließenden Szenarien sind Ausgangspunkte für den Langzeitsicherheitsnachweis. Auf ihrer Basis werden Modelle entwickelt (Kapitel 6 und 7), Prognose- und Modellrechnungen durchgeführt (Kapitel 6 und 7) sowie die Einhaltung der Schutzziele bewertet, siehe Abbildung 1.2-2. Neben einer synoptischen Bewertung der Ergebnisse der Modellrechnungen umfasst Kapitel 8 eine Einschätzung der konzeptuellen Modellansätze, der Datenbasis und der numerischen Umsetzung in Rechenprogrammen. Dabei werden Ungewissheiten des Systemverhaltens, der Modellannahmen und der Parameter diskutiert sowie die Auswirkungen auf die Ergebnisse bewertet.

Die im vorliegenden Bericht vorgenommene Gesamtbewertung für den Standort Asse umfasst die sicherheitstechnische Bewertung der vorliegenden Ergebnisse, Aussagen zur Vertrauenswürdigkeit und Verlässlichkeit der Modellrechnungen und Prognosen sowie eine Beurteilung der Robustheit des Systemverhaltens und des Sicherheitsnachweises. Auf Grundlage der Gesamtbewertung wird die Eignung des Schließungskonzepts und des Nachweiskonzepts eingeschätzt und eine Aussage zur Langzeitsicherheit der Schachanlage Asse nach ihrem Verschluss formuliert.

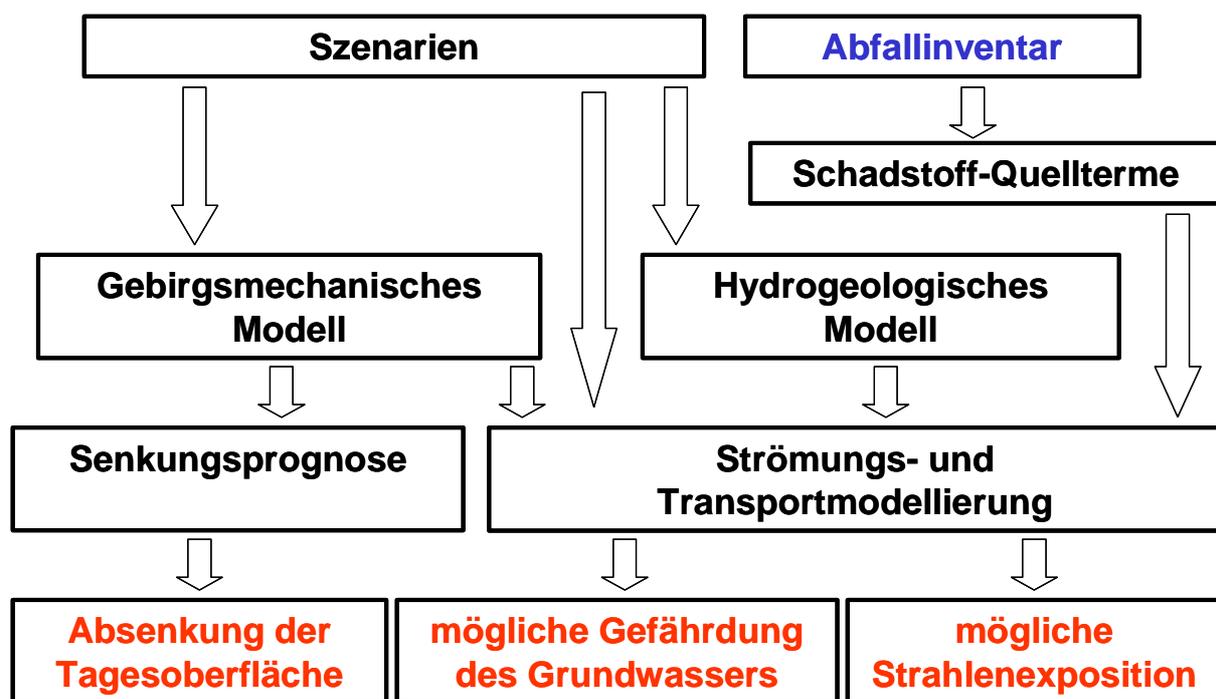


Abb. 1.2-2: Konzept für den Langzeitsicherheitsnachweis

2 Standortbedingungen

Die Standortbedingungen prägen die Langzeitsicherheit und deren Nachweis grundlegend, da sie sowohl das Sicherheits- und Schließungskonzept für die Schachanlage Asse bestimmen /GSF 2006c/ als auch die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises beeinflussen.

Die Analyse der Standortbedingungen umfasst die Bergbauaktivitäten, die geologischen, die gebirgsmechanischen und die hydrogeologischen Verhältnisse sowie die gegenwärtigen Gegebenheiten in der Biosphäre. Grundvoraussetzung für die Gültigkeit der vorliegenden Analyse der Standortbedingungen ist der Erhalt der Tragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes in der Betriebsphase.

Die Standortbedingungen sind stark von Bergbauaktivitäten geprägt. Im Zuge des Bergbaus wurden die folgenden Schachanlagen abgeteuft:

- Schachanlage Asse I mit dem Schacht Asse 1
- Schachanlage Asse II mit den Schächten Asse 2 und Asse 4
- Schachanlage Asse III mit dem Schacht Asse 3

Der Betrieb der Schachanlagen Asse I und Asse III wurde 1906 bzw. 1921 eingestellt. Die Mächtigkeit des unverritzten Salzpfeilers beträgt zumindest 470 m zwischen Schachanlage Asse II und Asse I bzw. mindestens 2 800 m zwischen Schachanlage Asse II und III. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit am Standort Asse kann der Einfluss der Schachanlagen Asse I und III vernachlässigt werden /GSF 2006a/, da

- Ausdehnung und Lage der Grubengebäude keine relevanten gebirgsmechanischen Deformationen bewirken, die die Schachanlage Asse II und die Steinsalz-Barriere beeinflussen,
- sich aus den analysierten Standortbedingungen keine Transportpfade ableiten lassen, die eine hydraulische Verbindung mit den Schachanlagen Asse I und III ermöglichen.

Ausführungen zu bergbaulichen Aktivitäten beziehen sich nachfolgend fast ausschließlich auf die Schachanlage Asse II. Die Bezugnahme auf eine der anderen Schachanlagen wird ausdrücklich gekennzeichnet.

2.1 Beschreibung der Schachanlage Asse II

Die folgende zusammenfassende Beschreibung nennt und bewertet einige grundlegende Aspekte für die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises, die sich aus dem Aufschluss und den bereits ausgeführten Versatzmaßnahmen in der Schachanlage ergeben. Dies umfasst die Auffahrungen des Grubengebäudes, im Besonderen die der Einlagerungskammern, sowie das Stoffinventar der Abfälle und Versatzstoffe. Die Beschreibung des Ist-Zustands der Schachanlage wird durch Angaben zur erwarteten künftigen Entwicklung ergänzt, wobei

die Realisierung der in Kapitel 4 beschriebenen Schließungsmaßnahmen vorausgesetzt wird.

2.1.1 *Auffahrungen des Grubengebäudes*

Die Auffahrungen und aufgelockerten Gebirgsbereiche stellen potenzielle Wegsamkeiten für Fluidbewegungen und den Schadstofftransport dar. Der Aufschlussgrad des Salzgebirges, die offene Standzeit der Auffahrungen und deren Verfüllung bestimmen die hydraulische Wirksamkeit der Wegsamkeiten, jedoch auch die gebirgsmechanische Beanspruchung der Gebirgsbereiche (Kapitel 2.3 und 2.5). Da die beeinflussenden Faktoren lokal differieren, variieren auch die gebirgsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften in den verschiedenen Grubenbereichen. In der Folge werden relevante Aspekte aufgeführt.

Grubengebäude

Das Grubengebäude ist durch 22 Sohlen zwischen 474 m und 975 m Teufe erschlossen. Die einzelnen Sohlen sind durch eine Vielzahl von Auffahrungen miteinander verbunden. Eine Darstellung der Grubenbaue, einschließlich des bisher eingebrachten Versatzes, enthält das Risswerk /GSF 2006b/. Das die Abbaue umgebende Salzgestein ist aufgelockert und damit durchlässig (Kapitel 2.3). Auffahrungen und Auflockerungszonen bilden ein stark vernetztes System von hydraulischen Wegsamkeiten.

Das Grubengebäude setzt sich aus drei großen Baufeldern zusammen:

- dem Baufeld in der Südflanke,
- dem Baufeld im Sattelkern und
- dem Carnallitbaufeld in der Nordflanke.

In der Nordflanke des Sattels wurde von 1909 bis 1925 auf der 750-m-Sohle das Carnallitbaufeld aufgefahren. Die Abbaue erstrecken sich bis in das Niveau der 725-m-Sohle. Das Baufeld ist vollständig mit Rückständen aus der Kaliumaufbereitung (Altversatz) und Salzgrus (Eigenversatz) verfüllt /GSF 2006b/.

In der Südflanke wurde von 1916 bis 1964 im Steinsalz der Leine-Serie ein Baufeld von der 750-m- bis zur 490-m-Sohle erschlossen. Die Abbaue von der 725-m- bis zur 511-m-Sohle sind fast vollständig mit Salzgrus (Eigen- und Fremdversatz) verfüllt /GSF 2006b/. Für die Verfüllung sind von der Wendelstrecke aus Abbaubegleitstrecken im Firstniveau der Sohlen aufgefahren worden. Bei der Auffahrung dieser Strecken fielen von der 725-m- bis zur 553-m-Sohle neben Steinsalz auch große Mengen Carnallit an. Das aufgefahrene Haufwerk wurde während der Auffahrung in die Abbaue verstrützt. Auf der 511-m- und 490-m-Sohle liegen noch offene Hohlräume vor, welche bis zum Ende der Betriebsphase offengehalten werden. Sowohl diese Hohlräume als auch die Abbaubegleitstrecken und die Wendelstrecke werden noch mit Sorelbeton nachverfüllt /GSF 2006c/.

Das Baufeld im Sattelkern wurde von 1927 bis 1964 zwischen der 775-m- und 725-m-Sohle in der Staßfurt-Serie aufgefahren. Die Abbaue sind größtenteils mit Salzgrus (Eigenversatz) verfüllt /GSF 2006b/. Auf der 775-m- und 750-m-Sohle gibt es noch unverfüllte Hohlräume, die mit Sorelbeton verfüllt werden. Der nach 1985 aufgefahrne Tiefenaufschluss unter der 775-m-Sohle, einschließlich der Kaverne, wird mit Schotter, Sorelbeton und Salzgrus verfüllt /GSF 2006c/.

Die Grube ist über die Tagesschächte Asse 2 und Asse 4 sowie über Bohrungen mit dem Deckgebirge und der Tagesoberfläche verbunden /GSF 2006b/. Die Tagesschächte werden im intakten Leine-Steinsalz oberhalb des Grubengebäudes dicht verschlossen /DBE 2006b/. Die Tiefbohrung Remlingen1 durchörtert das Gebirge von der Tagesoberfläche bis zur Grube und verläuft dort weiter im Pfeiler zwischen den Kammerreihen 4 und 5 im Baufeld in der Südflanke /GSF 2006b/. Alle anderen Tiefbohrungen haben einen hinreichend mächtigen Sicherheitspfeiler bis zum Grubengebäude. Die Bohrungen von der Tagesoberfläche, die Bohrungen innerhalb der Salzstruktur und die Bohrungen aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge wurden ordnungsgemäß verfüllt. Durch die fortschreitende Konvergenz wird die Dichtheit der Schachtverschlüsse, der verfüllten Bohrungen und der umgebenden Auflockerungszonen weiter zunehmen.

Zwischen 574 m und 500 m Teufe ist die Steinsalz-Barriere zwischen der Grube und dem Deckgebirge in der Südflanke durch bergbaubedingte Verformungen desintegriert. In diesem Gebirgsbereich bestehen wirksame hydraulische Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und grundwasserführenden Schichten im Deckgebirge /GSF 2006d/. Dieser Bereich der Steinsalz-Barriere wird im Folgenden „Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ genannt. Über diese Zone tritt heute der Grube Lösung aus dem Deckgebirge zu (vgl. Kapitel 2.6).

Einlagerungskammern und -bereiche

Abfälle wurden ausschließlich in Steinsalzabbau eingelagert. Schwach radioaktive Abfälle (LAW) befinden sich im Baufeld in der Südflanke auf der 750-m-Sohle sowie im Baufeld im Sattelkern auf der 750-m- und 725-m-Sohle. Einige Einlagerungskammern sind vollständig mit Abfallgebinden und Eigenversatz aufgefüllt; andere weisen unverfüllte Resthohlräume auf. Mittelradioaktive Abfälle (MAW) wurden nur in den Abbau 8a/511 eingelagert. In der MAW-Kammer liegen noch unverfüllte Hohlräume vor.

Der Kenntnisstand über die Einlagerungskammern (ELK) und die Auffahrungen zu den ELK – d.h. über markscheiderische Daten, anstehende Gesteine, die Verfüllung mit Abfällen und Salzversatz sowie über die unverfüllten Resthohlräume – ist ausführlich in der Beschreibung der ELK /GSF 2006k/ dokumentiert. Ungewissheiten werden durch Bandbreiten der relevanten Parameter berücksichtigt.

Die ELK sind vielfach untereinander und mit angrenzenden Abbauen verbunden, durch horizontale Strecken und Durchhiebe im Sohlen- und Firstniveau, durch Gesenke, Rolllöcher und Bohrungen sowie durch desintegriertes Salzgestein in Stößen und Schweben. Die hydraulische Separierung einzelner ELK ist nicht möglich. Einige der o.g. Auffahrungen wurden aus Gründen der Betriebssicherheit mit Dämmen aus Salzbeton und/oder Bitumen-

emulsionen verschlossen /GSF 2006k/. Da diese Dämme durch fortschreitende Konvergenz mechanisch beansprucht werden und die verwendeten Salzbetone im Kontakt mit $MgCl_2$ -reicher Lösung wie dem Schutzfluid, nicht langzeitbeständig sind, wird den Dämmen in den ersten hundert Jahren eine hydraulische Barrierewirkung zugesprochen, die danach langsam und kontinuierlich abnimmt.

In den meisten zugänglichen Auffahrungen zwischen ELK und benachbarten Grubenbauen werden Strömungsbarrieren errichtet /GSF 2006b/, /GSF 2006f/. Durch die gewählte Anordnung der Strömungsbarrieren werden bestimmte Grubenbereiche mit mehreren ELK und Abbauen – die so genannten Einlagerungsbereiche (ELB) – gegeneinander und vom übrigen Grubengebäude hydraulisch separiert. Kriterium für die Zusammenfassung von mehreren ELK war die Möglichkeit zum Schaffen hydraulischer Barrierenwirkungen durch qualifizierten Einbau von Strömungsbarrieren an Einbauorten, die gefahrlos bezüglich des Strahlenschutzes und erfolversprechend bezüglich der geotechnischen Gegebenheiten sind.

Durch die geplante Anordnung von Strömungsbarrieren werden die LAW-Einlagerungskammern zu fünf ELB zusammengefasst, die hydraulisch in unterschiedlichem Ausmaß gegeneinander und gegen das übrige Grubengebäude abgetrennt sind (Tabelle 2.1-1). Einen weiteren ELB bildet die MAW-Kammer 8a auf der 511-m-Sohle.

Tab. 2.1-1: Grubenbaue der LAW-Einlagerungsbereiche auf der 750-m- und 725-m-Sohle

	LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4
ELK	2/750(Na2)	7/725(Na2)	10/750, 8/750, 4/750	5/750, 6/750, 7/750, 11/750	12/750, 2/750, 1/750
Abbaue	1/750(Na2), 3/750(Na2)	6/725(Na2), 8/725(Na2)	9/750		
nördlich vorgelagerte Grubenbaue			südliche Richtstrecke nach Westen	südliche Richtstrecke nach Osten	

Die Ungewissheiten bezüglich der Durchlässigkeit von verfüllten Auffahrungen und aufgelockerten Gebirgsbereichen zwischen den ELB und dem übrigen Grubengebäude werden durch Parameterbandbreiten berücksichtigt. Ungewissheiten bezüglich der Wegsamkeiten innerhalb der ELB werden durch eine langfristig hohe Durchlässigkeit gewürdigt. Im Langzeitsicherheitsnachweis wird somit berücksichtigt, dass sich Lösungen von benachbarten ELK eines ELB austauschen können (Kapitel 6.1 und 7.5).

2.1.2 Stoffinventar

Das Stoffinventar der Schachtanlage Asse II setzt sich aus schwach- und mittelradioaktiven Abfällen, den Abfallbehältern und den eingebrachten Versatzstoffen zusammen. Die LAW-Abfälle stammen etwa zur Hälfte aus dem Forschungszentrum Karlsruhe und zu 10 % aus dem Forschungszentrum Jülich; etwa 20 % sind Betriebsabfälle aus Kernkraftwerken. Die

restlichen 20 % stammen vor allem aus der kerntechnischen Industrie und aus Landes-sammelstellen. Die MAW-Abfälle stammen zu 98 % aus der Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe.

Die Stoff- und die Schadstoffinventare wurden auf der Grundlage der Begleitdokumente der angelieferten Abfallgebände sowie aus umfassenden Nacherhebungen bei Ablieferern und Literaturrecherchen ermittelt. Diese Daten wurden in einer Abfalldatenbank dokumentiert /Asse-Datenbank/. Die Gebände bestehen aus den Abfallbehältern, einschließlich der VBA², den Abfallmatrizes zur Fixierung der Abfälle und den Abfällen selbst. Sie setzen sich vor allem aus zementhaltigen Materialien, Eisenmetallen, zellulosehaltigen Materialien und aus Kunststoffen zusammen /BUC 2004/. Die Einlagerungskammern enthalten somit Stoffe,

- die die Entwicklung des geochemischen Milieus beeinflussen,
- die im Kontakt mit Wasser bzw. Salzlösungen Gase bilden,
- die radiotoxisch auf Mensch und Naturgüter wirken können und
- die chemotoxisch auf Mensch und Naturgüter wirken können.

Das Aktivitätsinventar der Abfälle bestimmt das radiotoxische Gefährdungspotenzial. Die Summe der Aktivitäten³ der radioaktiven Abfälle betrug nach Deklaration der Ablieferer zum Zeitpunkt der Anlieferung $2,1 \cdot 10^5$ Ci bzw. $7,8 \cdot 10^{15}$ Bq; davon entfielen $7,5 \cdot 10^4$ Ci bzw. $2,8 \cdot 10^{15}$ Bq (35 %) auf die LAW-Abfälle /GSF 2002a/. Der von der Halbwertszeit der Radionuklide abhängige, radioaktive Zerfall führt zur kontinuierlichen Abnahme der Aktivität. Die Aktivität der LAW-Abfälle hatte sich zum 01.01.2005 auf $1,7 \cdot 10^{15}$ Bq verringert und wird in den folgenden 100 000 Jahren weiter bis auf $7 \cdot 10^{12}$ Bq abnehmen. In der MAW-Kammer lag die Aktivität zum 01.01.2005 mit $1,1 \cdot 10^{15}$ Bq noch in der Größenordnung der LAW-Abfälle, sie wird jedoch schon in 1 000 Jahren auf $1 \cdot 10^{13}$ Bq abnehmen (Abbildung 2.1-1).

In den ersten hundert Jahren wird die Summe der Aktivitäten durch kurzlebige Radionuklide, wie ⁹⁰Sr und ¹³⁷Cs dominiert, danach bis etwa 1 000 Jahre durch ²⁴¹Am (Abbildung 2.1-2). Im Zeitraum von 1 000 bis 100 000 Jahren werden die langlebigen Radionuklide ²³⁹Pu und ²⁴⁰Pu von entscheidender Bedeutung sein. Nach 100 000 Jahren sind es die Tochternuklide vom ²³⁸U, wie ²³⁴U, ²³⁰Th und ²²⁶Ra. Aufgrund der sehr langen Halbwertszeit von ²³⁸U nimmt die Summe der Aktivitäten dann nur noch geringfügig ab.

² Verlorene Betonabschirmung

³ Summe der Aktivitäten gemäß Tabelle 2.1-2, d.h. ohne kurzlebige Folgeprodukte

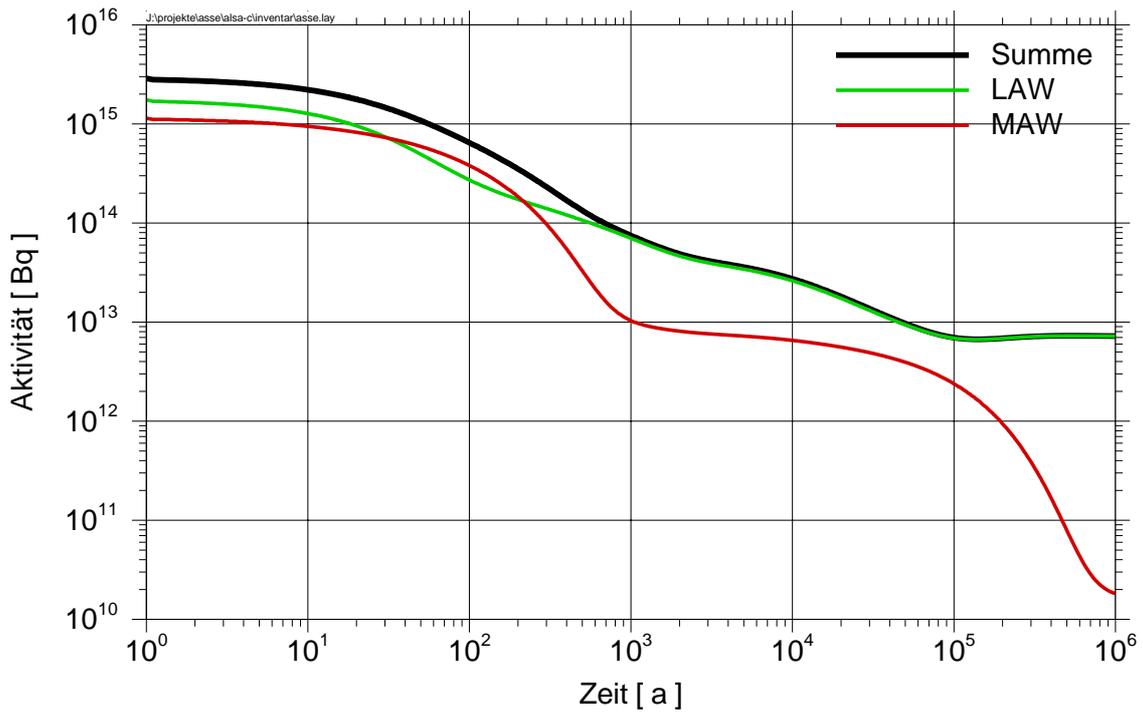


Abb. 2.1-1: Abnahme des Aktivitätsinventars durch radioaktiven Zerfall (Bezugszeitpunkt 01.01.2005)

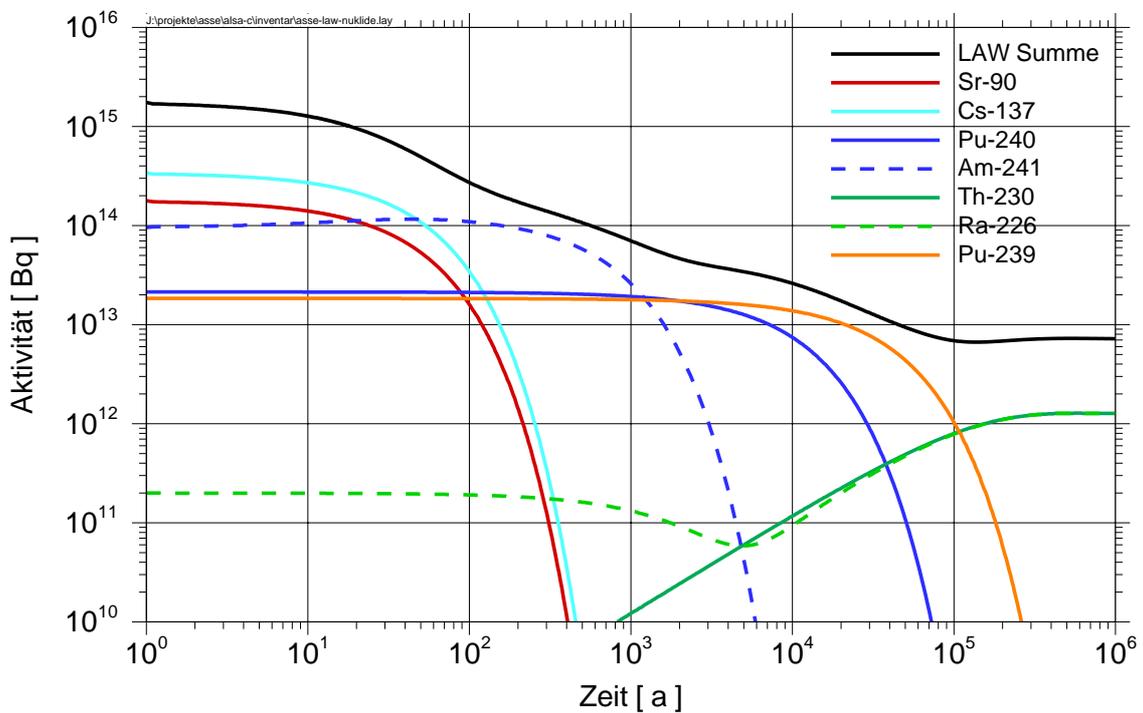


Abb. 2.1-2: Abnahme der Aktivität des LAW-Inventars durch radioaktiven Zerfall (Bezugszeitpunkt 01.01.2005)

Tab. 2.1-2: Aktivitäten von ausgewählten Radionukliden (Bezugszeitpunkt 01.01.2005) in [Bq]

Radio-nuklid	LAW-Einlagerungskammer						
	1/750	2/750	2/750Na2	4/750	5/750	6/750	7/750
¹⁴ C	4,5·10 ¹⁰	6,7·10 ¹⁰	6,5·10 ¹¹	1,5·10 ⁰⁹	2,7·10 ¹¹	4,1·10 ¹¹	1,8·10 ¹¹
⁹⁰ Sr	4,2·10 ¹²	9,9·10 ¹¹	9,1·10 ¹¹	6,2·10 ⁰⁸	4,2·10 ¹²	6,6·10 ¹³	6,7·10 ¹³
¹³⁵ Cs	2,3·10 ⁰⁷	8,9·10 ⁰⁶	3,8·10 ⁰⁶	0,0	5,0·10 ⁰⁷	1,0·10 ⁰⁹	8,1·10 ⁰⁸
²⁴¹ Am	1,3·10 ¹³	6,8·10 ¹²	1,1·10 ¹²	8,5·10 ⁰⁶	6,7·10 ¹²	1,2·10 ¹³	3,3·10 ¹³
²⁴³ Am	2,0·10 ⁰⁸	5,6·10 ⁰⁷	6,9·10 ⁰⁷	0,0	7,7·10 ⁰⁸	7,9·10 ⁰⁹	2,3·10 ¹⁰
²⁴⁴ Cm	2,2·10 ⁰⁹	7,2·10 ⁰⁸	1,6·10 ⁰⁹	3,7·10 ⁰⁵	1,8·10 ¹⁰	1,1·10 ¹¹	5,2·10 ¹¹
²²⁶ Ra	5,6·10 ¹⁰	6,0·10 ⁰⁹	9,7·10 ¹⁰	1,5·10 ⁰⁹	3,0·10 ⁰⁹	1,2·10 ¹⁰	8,0·10 ⁰⁹
²³² Th	1,1·10 ¹⁰	2,1·10 ¹⁰	1,8·10 ¹⁰	1,4·10 ¹⁰	1,9·10 ⁰⁹	4,9·10 ⁰⁹	6,2·10 ⁰¹
²³⁴ U	3,1·10 ¹¹	3,5·10 ⁰⁹	1,5·10 ¹⁰	2,2·10 ¹¹	6,8·10 ⁰⁹	2,6·10 ⁰⁹	4,4·10 ⁰⁹
²³⁵ U	1,4·10 ¹⁰	1,0·10 ⁰⁸	6,3·10 ⁰⁹	9,3·10 ⁰⁹	2,0·10 ⁰⁸	1,3·10 ⁰⁸	9,2·10 ⁰⁷
²³⁸ U	2,9·10 ¹¹	2,4·10 ⁰⁹	2,7·10 ¹¹	2,1·10 ¹¹	3,0·10 ⁰⁹	2,6·10 ⁰⁹	1,5·10 ⁰⁹
²³⁹ Pu	2,5·10 ¹²	1,7·10 ¹²	1,9·10 ¹¹	5,8·10 ⁰⁵	1,2·10 ¹²	2,7·10 ¹²	4,6·10 ¹²
²⁴⁰ Pu	2,3·10 ¹²	1,7·10 ¹²	2,3·10 ¹¹	1,3·10 ⁰⁶	1,4·10 ¹²	3,7·10 ¹²	6,2·10 ¹²
Summen-Aktivität	1,4·10 ¹⁴	8,3·10 ¹³	2,5·10 ¹³	5,0·10 ¹¹	1,1·10 ¹⁴	3,6·10 ¹⁴	6,1·10 ¹⁴

Radionuklid	LAW-Einlagerungskammer					MAW
	8/750	10/750	11/750	12/750	7/725Na2	8a/511
¹⁴ C	7,6·10 ¹¹	8,0·10 ¹⁰	9,2·10 ¹¹	1,6·10 ¹¹	7,6·10 ¹⁰	2,2·10 ¹¹
⁹⁰ Sr	5,5·10 ¹¹	1,1·10 ¹²	2,4·10 ¹³	6,9·10 ¹²	1,3·10 ¹²	1,3·10 ¹⁴
¹³⁵ Cs	6,0·10 ⁰⁶	1,2·10 ⁰⁷	2,9·10 ⁰⁸	9,0·10 ⁰⁷	1,2·10 ⁰⁷	1,6·10 ⁰⁹
²⁴¹ Am	2,2·10 ¹²	6,0·10 ¹⁰	1,2·10 ¹³	5,1·10 ¹²	3,5·10 ¹²	7,4·10 ¹²
²⁴³ Am	7,4·10 ⁰⁷	4,4·10 ⁰⁷	5,8·10 ⁰⁹	2,3·10 ⁰⁸	3,5·10 ⁰⁸	4,0·10 ¹⁰
²⁴⁴ Cm	1,7·10 ⁰⁹	5,2·10 ⁰⁸	1,3·10 ¹¹	1,3·10 ⁰⁹	8,6·10 ⁰⁹	9,6·10 ¹¹
²²⁶ Ra	8,0·10 ⁰⁸	4,4·10 ⁰⁹	3,1·10 ⁰⁹	5,1·10 ⁰⁹	3,0·10 ⁰⁹	1,8·10 ⁰²
²³² Th	1,8·10 ¹¹	1,3·10 ¹⁰	3,9·10 ¹⁰	4,2·10 ¹⁰	1,3·10 ¹⁰	1,2·10 ⁰⁷
²³⁴ U	3,6·10 ¹¹	1,5·10 ¹⁰	1,6·10 ¹⁰	1,5·10 ¹⁰	1,1·10 ¹¹	4,7·10 ⁰⁹
²³⁵ U	1,6·10 ¹⁰	9,9·10 ⁰⁸	5,6·10 ⁰⁸	6,6·10 ⁰⁸	4,6·10 ⁰⁹	1,9·10 ⁰⁸
²³⁸ U	3,5·10 ¹¹	1,3·10 ¹⁰	1,0·10 ¹⁰	1,5·10 ¹⁰	9,7·10 ¹⁰	1,9·10 ⁰⁹
²³⁹ Pu	4,7·10 ¹¹	1,8·10 ¹⁰	2,8·10 ¹²	1,7·10 ¹²	5,3·10 ¹¹	1,0·10 ¹²
²⁴⁰ Pu	5,2·10 ¹¹	8,6·10 ⁰⁹	2,8·10 ¹²	1,8·10 ¹²	6,8·10 ¹¹	1,0·10 ¹²
Summen-Aktivität	3,1·10 ¹³	4,9·10 ¹²	2,7·10 ¹⁴	7,7·10 ¹³	4,7·10 ¹³	1,1·10 ¹⁵

Die kammer-spezifische Aufteilung des eingelagerten Aktivitätsinventars für den Bezugszeitpunkt 01.01.2005 ist für die das Aktivitätsinventar bestimmenden Radionuklide in der Tabelle 2.1-2 angegeben. Dabei wurde konservativ die in /GSF 2002a/ ermittelte obere Bandbreite angesetzt und das Aktivitätsinventar auf den zeitlichen Bezugspunkt der Rechnungen – unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls und des Aktivitätsaufbaus von Tochternukliden – umgerechnet.

Aus der chemischen bzw. chemotoxischen Wirkung von Bestandteilen des Inventars ergibt sich eine potenzielle Gefährdung für das Grundwasser. Das Gesamtinventar wurde auf Grundlage des Abfallinventars und der noch einzubringenden Versatzmengen bilanziert sowie dann in verschiedene Stoffgruppen unterteilt /BUC 2004/. Diese Einteilung in Stoffgruppen basiert auf der Grundwasserverordnung /GWVO 1997/ und berücksichtigt nationale Regelwerke. Das Inventar der chemischen und chemotoxischen Stoffe, die grundwasser-gefährdend wirken können, ist in den Tabellen 2.1-3 und 2.1-4 zusammengefasst.

Tab. 2.1-3: Grundwassergefährdende Stoffe im Abfallinventar /BUC 2004/ (gerundet)

Liste gemäß /GWVO 1997/	Stoffgruppe	Masse [kg]
Liste I, lfd. Nr. 1	organische Bromverbindungen	0
	organische Chlorverbindungen	187 000
	organische Iodverbindungen	<< 0,10
Liste I, lfd. Nr. 2	organische Phosphorverbindungen	3 420
Liste I, lfd. Nr. 3	organische Zinnverbindungen	0
Liste I, lfd. Nr. 4	karzinogene, mutagene oder teratogene Stoffe	25 700 000
Liste I, lfd. Nr. 5	Quecksilber und Quecksilberverbindungen	1,00
Liste I, lfd. Nr. 6	Cadmium und Cadmiumverbindungen	54,0
Liste I, lfd. Nr. 7	Mineralöle und Kohlenwasserstoffe	54 500
Liste I, lfd. Nr. 8	Cyanide	1 050
Liste II, lfd. Nr. 1	Metalle, Metalloide und ihre Verbindungen	1 310 000
Liste II, lfd. Nr. 2	Biozide	117
Liste II, lfd. Nr. 3	den Geruch oder Geschmack von Wasser beeinträchtigende Stoffe	38 100 000
Liste II, lfd. Nr. 4	giftige und langlebige organische Siliziumverbindungen	61 500
Liste II, lfd. Nr. 5	anorganische Phosphorverbindungen	64 700
Liste II, lfd. Nr. 6	organische und anorganische Fluorverbindungen	20 700
Liste II, lfd. Nr. 7	Ammoniak und Ammoniakverbindungen	41 000
	Nitrite	8 160

Tab. 2.1-4: Chemotoxische Stoffe im Abfallinventar /BUC 2004/ (gerundet)

Organisch chemotoxische Stoffe		Anorganisch chemotoxische Stoffe	
Stoffbezeichnung	Masse [kg]	Stoffbezeichnung	Masse [kg]
Chelat-/Komplexbildner		Ag	438
Fe(NH ₄)-EDTA	46,3	As	496
Na ₂ -EDTA	0,10	B	50 000
Na ₃ -Citrat	13 800	Ba	54 300
K ₃ -Citrat	113	Be	11,4
Na ₂ -Hydrogencitrat	325	Bi	337
(NH ₄) ₂ -Hydrogencitrat	297	Cd	54,3
Na ₂ -Tartrat	13 300	Cyanide gesamt	1 050
Na ₂ -Oxalat	13 500	Co	4 100
Tenside		Cr gesamt	25 800
Nichtionische Tenside	17 300	Cr (VI)	20,8
Anionische Tenside	6 120	Cu	857 000
Kationische Tenside	6,50	Hg	1,10
		Mo	888
		Ni	22 200
		Pb	14 800
		Sb	1 370
		Se	2,40
		Sn	9 830
		Te	1,60
		Ti	37 800
		Tl	3,30
		U	67,1
		V	1 340
		Zn	232 000

Das stoffliche Inventar der chemischen und chemotoxischen Bestandteile in den Abfällen wurde spezifisch für die ELK bzw. ELB erhoben und um die Beiträge der in die ELB im Zuge der Schließungsmaßnahmen noch einzubringenden Mengen an Mg-Depot und Schutzfluid ergänzt /BUC 2006a/. Die Ungewissheiten bezüglich des Inventars (ohne Beiträge des Schutzfluids) können bis zu 50 % des ermittelten stoffspezifischen Wertes betragen. Dies wurde beim quantitativen Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt (siehe Kapitel 6.2.2).

Durch mikrobielle Degradation der organischen Stoffe und Korrosion von Metallen kommt es in der Nachbetriebsphase zur Gasbildung. Die Gasspeicherung im Grubengebäude stellt einen Antriebsprozess für den Transport von Schadstoffen in der Lösung (Kapitel 7.5) dar. Gas selbst ist außerdem ein Transportmedium für Schadstoffe (Kapitel 7.6). Die Massenanteile der gasbildenden Stoffe sind kammer-spezifisch ausgewiesen /BUC 2006a/. Ungewissheiten des stofflichen Inventars wurden bei den Modellrechnungen zur Gasbildung (Kapitel 6.3) einbezogen.

2.2 Geologische Standortverhältnisse

Die geologische Situation umfasst die Gesamtheit der regionalgeologischen und tektonischen Verhältnisse. Die Verhältnisse bestimmen zum einen die Randbedingungen für eine sichere Schließung der Schachanlage Asse (Kapitel 4). Zum anderen stellt die Analyse der geologischen Situation die Basis für die Ermittlung der gegenwärtigen gebirgsmechanischen und hydrogeologischen Verhältnisse (Kapitel 2.3 ff.) sowie für die Geowissenschaftliche Langzeitprognose (Kapitel 5.1) dar. In der Folge werden die relevanten Aspekte genannt.

Die regionalgeologischen und tektonischen Verhältnisse sind das Ergebnis einer Vielzahl geogener Ereignisse und Prozesse aus der geologischen Vergangenheit /ERC 2004a/. Die Gesteinsformationen weisen unterschiedliche Eigenschaften auf und sind im Verlauf der geologischen Entwicklung in unterschiedlicher Art und Weise beansprucht worden. Infolge dessen gibt es Gesteinsformationen, die den Lösungs- und Schadstofftransport behindern, wie ungestörtes Steinsalz (Steinsalz-Barriere), und andere, die den Transport zulassen. Von Einfluss auf den Langzeitsicherheitsnachweis sind

- die Schichtenfolge des Salzsattels im Bereich der Schachanlage Asse II, wie
 - das Steinsalz der Staßfurt-, Leine- und Aller-Folge (Steinsalz-Barriere),
 - das Kalisalz der Staßfurt-Folge,
 - die Anhydritmittel der Leine-Folge und
 - der durch Subrosion entstandene Gipsstut sowie
- die Gesteinsformationen im Deckgebirge, insbesondere
 - der Buntsandstein der Nordflanke,
 - der Obere Buntsandstein (Röt) der Südflanke,
 - der Muschelkalk in der Südflanke und
 - das Deckgebirge oberhalb des Salzsattels („Verstürztes Deckgebirge“).

Die Gesteinsformationen wurden und werden weiterhin sowohl durch Subrosion als auch durch tektonische und bergbaubedingte Deformationen überprägt.

2.2.1 Salzsattel

Die Asse bildet das westliche Ende des Asse-Heeseberg-Höhenzugs, der als herzynisch streichender Schmalsattel (siehe auch Abbildung 2.2-1) zu den salinaren Großstrukturen des zwischen Harz- und Flechtinger Höhenzug gelegenen Subherzynen Beckens gehört. Dieser Sattel verläuft entlang einer NW-SE streichenden Salzaufstiegslinie, an der das Mesozoikum z.T. sattelartig aufgerichtet wurde. Der Sattel liegt in der Mitte des westlichen subherzynen Beckens zwischen den Aufwölbungen des Elm im Nordosten und des Großen Fallstein im Süden, und wird begleitet von der Schöppenstedter Kreidemulde im Nordosten und der Remlinger Kreidemulde im Südwesten. Nach Westen wird er durch N-S gerichtete Strukturen des Braunschweiger Raumes begrenzt.

Im Sattelkern sind saline Schichtenfolgen des Zechstein 2, 3 und 4 aufgestiegen. Basale, nichtchloridische Schichtenglieder des Zechstein 2, sowie der im Bereich der Asse chloridfreie, flach auf dem Oberrotliegenden lagernde Zechstein 1 wurden in die halotektonische Sattelstruktur-Bildung nicht einbezogen.

Der nordwestliche Abschnitt des Höhenzugs wird durch die Diagonalstörung bei Groß Vahlberg südöstlich von Schachtanlage Asse II begrenzt (siehe Abbildung 2.2-2) und ist für den Nachweis der Langzeitsicherheit von besonderer Bedeutung (Kapitel 2.5).

Das unverritzte Steinsalz stellt eine wesentliche geologische Barriere am Standort dar. Die Integrität der Schutzschicht zwischen Grubengebäude und Deckgebirge ist sowohl durch Auffahrungen und Bohrungen als auch durch gebirgsmechanische Beanspruchungen des Salzgebirges verletzt (Kapitel 2.3). Eine allseitige, hydraulisch dichte Ummantelung des Grubengebäudes Asse II durch die geologische Barriere ist nicht gegeben (Kapitel 2.6).

An der Nordflanke ist die Steinsalz-Schutzschicht mehrere hundert Meter mächtig. Im Steinsalz der Leine-Serie sind einige, wenige Meter mächtige und ggf. durchlässige Anhydritmittel eingebettet. Das Leine-Steinsalz zwischen Grubengebäude und hangenden Anhydritmittel wird von Bohrungen durchörtert /GSF 2006b/. Da diese mit Magnesia-Zement dicht verfüllt sind, ist die Barrierewirkung der Steinsalz-Schutzschicht wieder hergestellt.

Im Top des Salzsattels ist das Leine-Steinsalz bis zum Gipshut etwa zweihundert Meter mächtig. Die im Steinsalz eingebetteten, wenige Meter mächtigen Anhydritmittel kulminieren im Top des Sattels und können im Leine-Steinsalz, im Röt oder im Gipshut ausstreichen /ERC 2004a/. Die Steinsalz-Schutzschicht wird durch die beiden Tagesschächte und die Erkundungsbohrung R1 durchörtert. Die Bohrung ist bereits in der frühen Betriebsphase dicht verfüllt worden. Durch den Verschluss der Tagesschächte wird die Barrierewirkung der Steinsalz-Schutzschicht in der Nachbetriebsphase wieder hergestellt.

An der Südflanke ist die Steinsalz-Schutzschicht zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge (Röt-Anhydrit) aus Leine- und Röt-Steinsalz im Bereich von einigen Abbauen oberhalb von 553 m Teufe weniger als 10 m mächtig, nimmt aber unterhalb von 574 m Teufe schnell und deutlich an Mächtigkeit zu /GSF 2006b/. Im gering mächtigen Bereich oberhalb von 574 m Teufe ist das Steinsalz durch dilatante Beanspruchung stark deformiert, wodurch die hydraulische Barrierewirkung der Schutzschicht verloren gegangen ist (Kapitel 2.3). Un-

terhalb von 574 m Teufe ist der Beanspruchungsgrad dagegen so gering, dass hier die Integrität der Schutzschicht gegeben ist /IfG 2006a/. Über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere oberhalb von 574 m Teufe tritt dem Grubengebäude derzeit Salzlösung aus dem Deckgebirge zu (Kapitel 2.6).

Im Streichen des Salzsattels bildet das unverritzte Salinar der Leine-Serie einen mehrere hundert Meter mächtigen Sicherheitspfeiler zum Grubengebäude der Schachanlage Asse I im Nordwesten und einen mehr als tausend Meter mächtigen Sicherheitspfeiler zum Grubengebäude der Schachanlage Asse III im Südosten /GSF 2006a/.

Im Bereich der Schachanlage stehen die Gesteine der Staßfurt- und Leine -Folge an /ERC 2004a/. Gesteine der Aller-Folge wurden nur in Bohrungen angetroffen. Die Staßfurt-Folge (z2) setzt sich hier aus Stein- und Kalisalzen zusammen. Das Kaliflöz ist carnallitisch ausgebildet und im Kontakt mit Mg-armen Salzlösungen leicht löslich. Der Carnallitit ist in der Schachanlage vom Grubentiefsten bis in 532 m Teufe aufgeschlossen.

Die spröden Übergangsschichten zwischen der Staßfurt- und Leine-Folge (z3), der Deckanhydrit, Graue Salztone und Hauptanhydrit, liegen nur isoliert als tektonische Schollen vor. Eine hydraulische Wegsamkeit zwischen dem Grubengebäude und Deckgebirge über diese Schichten ist daher auszuschließen.

Im Hangenden schließt sich die mächtige Abfolge von Leine-Steinsalzen an; Kalisalz ist hier nicht aufgeschlossen. Im Anhydritmittelsalz der Leine-Serie wurden einige lösungsführende Anhydritbänke erbohrt, die eine Mächtigkeit von 1 m bis 3 m erreichen. In der Südflanke keilt das Anhydritmittelsalz mit zunehmender Teufe aus.

Direkte hydraulische Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und Anhydritmitteln liegen nach dem Verschluss der Tagesschächte im Scheitel des Sattels und aufgrund der bereits abgedichteten Bohrungen nicht vor. Die geringe gebirgsmechanische Beanspruchung des Gesteins über dem Grubenhöchsten spricht gegen eine Ausweitung der Auflockerungszone von den Abbauen bis zu den Anhydritmitteln /IfG 2006b/.

Es ist davon auszugehen, dass die Anhydritmittel westlich der Schachanlage am Salzspiegel ausstreichen und mit dem Hutgestein bzw. verstützten Deckgebirge in Kontakt stehen /ERC 2004a/, so dass in der Schutzschicht eine hydraulische Wegsamkeit mit Verbindung zum Salzspiegel bestehen könnte (Kapitel 2.6). Da die Klüfte in den Anhydritmitteln sehr wahrscheinlich durch Mineralausfällungen teilweise verheilt sind und die Entfernung bis zum Ausstreichen der Anhydritmittel am Salzspiegel westlich der Schachanlage mehrere hundert Meter beträgt, ist eine durchgehende hydraulische Verbindung über die Anhydritmittel eher unwahrscheinlich /ERC 2004a/.

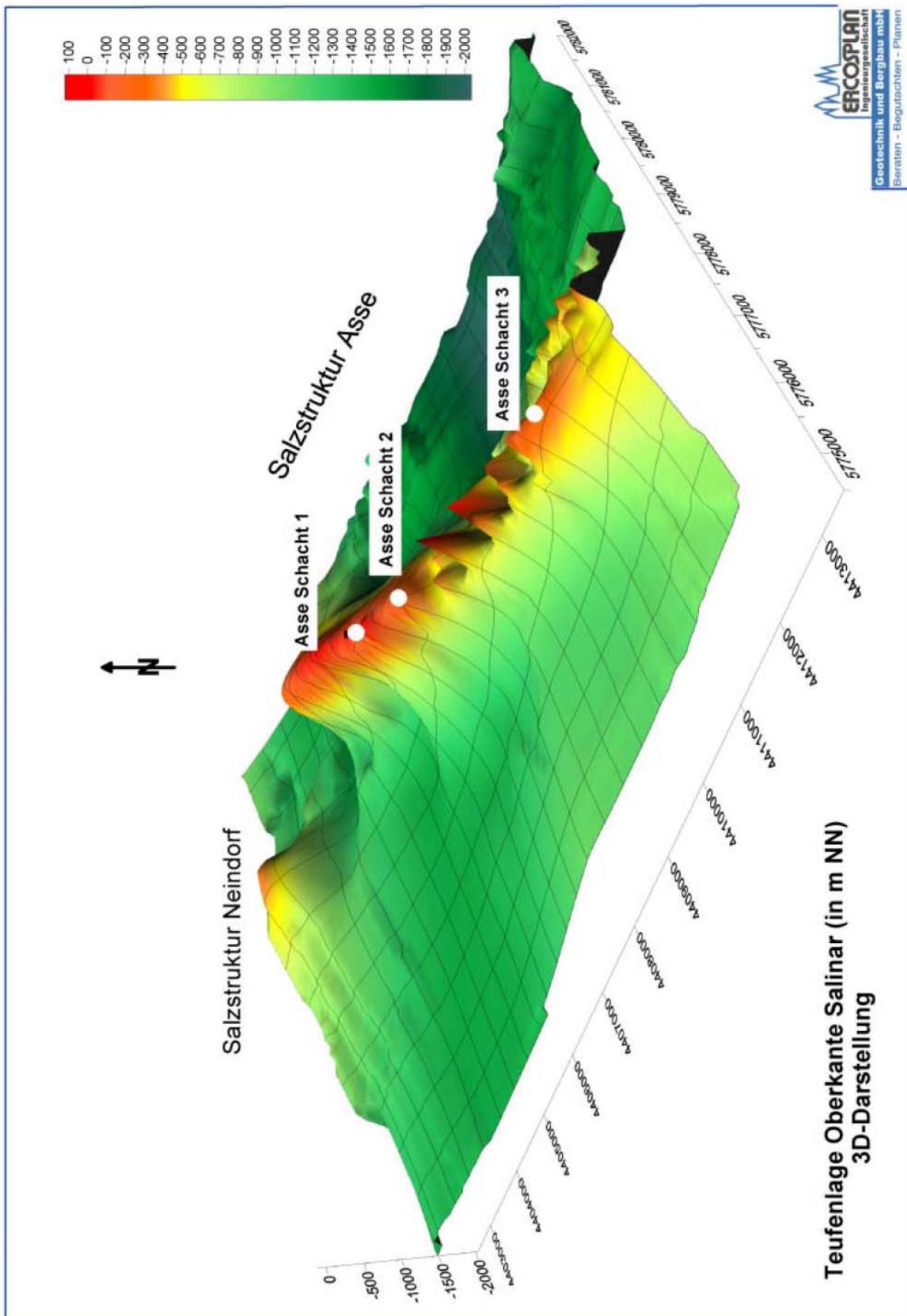


Abb. 2.2-1: Salzspiegel der Struktur Asse-Heeseberg /ERC 2004a/

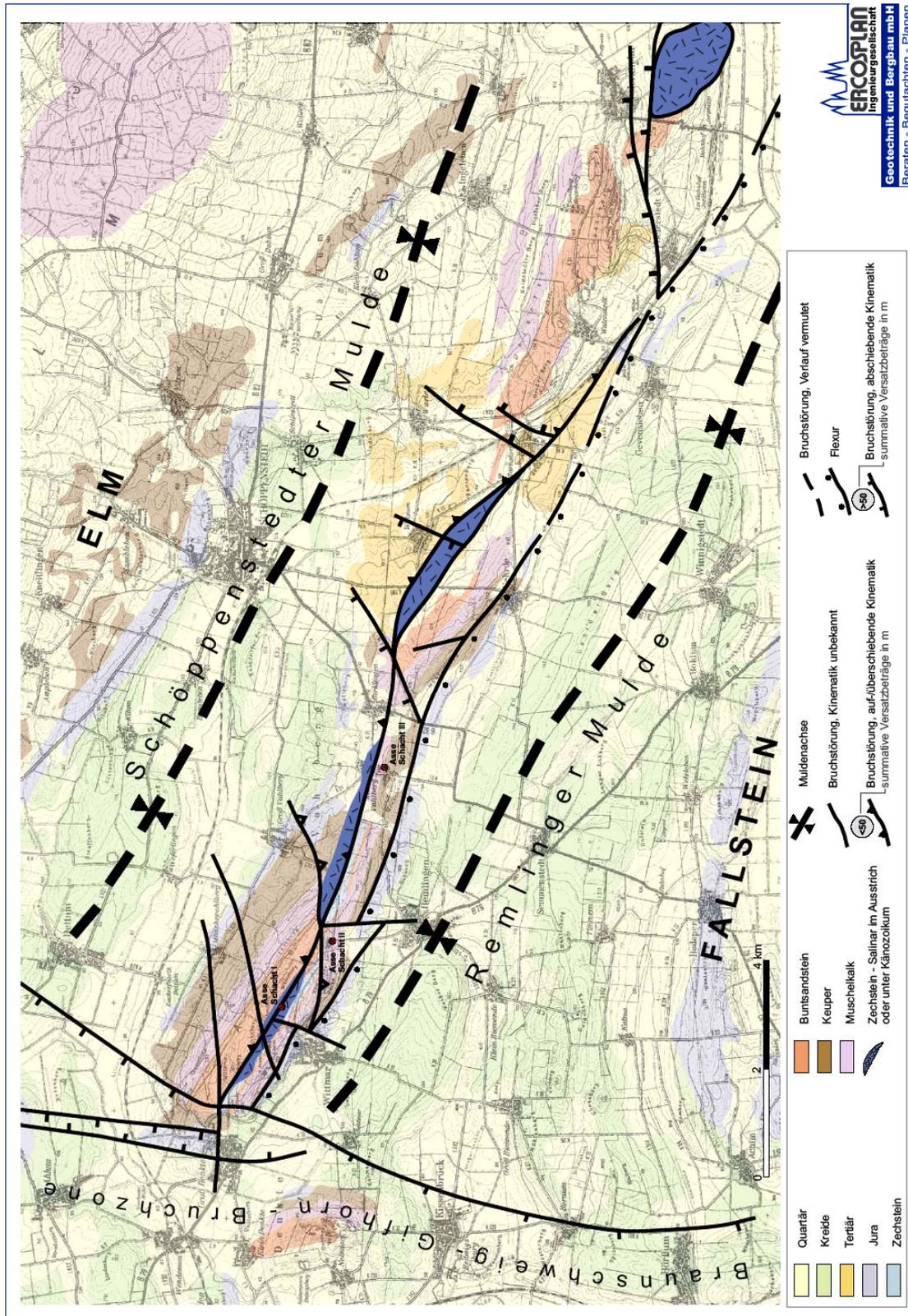


Abb. 2.2-2: Regionalgeologische und tektonische Situation der Salzstruktur Asse-Heeseberg /ERC 2004a/

Der Salzspiegel befindet sich am Standort mindestens 250 m unter der Geländeoberfläche und zeigt längs des Sattels deutliche morphologische Unterschiede, wobei der Bereich um die Schachanlage Asse II nicht die höchste Aufragung ist (Abbildung 2.2-1). Die Hochlagen des Salzspiegels befinden sich vermutlich im Bereich der Remlinger Herse zwischen Asse II (*Schacht 2*) und Asse I (*Schacht 1*) sowie im Bereich der Klein Vahlberger Buchen westlich von Asse III (*Schacht 3*). Westlich der Remlinger Herse haben sich am Salzspiegel Subrosionsgerinne ausgebildet. Die Gerinne reichen nicht bis in den Bereich der Schachanlage Asse II /COL 2006c/.

Über dem Salzspiegel liegen das Hutgestein und das Verstürzte Deckgebirge, das sich aus einem regellosen Verband von Residualgestein der Subrosion und Buntsandsteinschollen zusammensetzt. Die Gesteinsschichten oberhalb des Salzspiegels sind verstürzt und dadurch lokal hoch durchlässig.

Eine direkte hydraulische Wegsamkeit zwischen Grubengebäude und Subrosionsgerinne ist auszuschließen. Direkte hydraulische Verbindungen zwischen Grubengebäude und Hutgestein liegen nach dem Verschluss der Tagesschächte und aufgrund der abgedichteten Bohrung R1 nicht vor (siehe oben).

Es ist festzustellen, dass die Steinsalz-Barriere nur im Bereich des aktuellen Salzlösungszutritts in der Südflanke verletzt ist.

2.2.2 Deckgebirge

Das Deckgebirge stellt eine weitere geologische Barriere gegen die Ausbreitung von Schadstoffen am Standort Asse dar. Die Salzstruktur Asse–Heeseberg wird von aufgewölbten, mesozoischen Gesteinen asymmetrisch flankiert. Im nordwestlichen Abschnitt wird die Nordflanke der Salzstruktur konkordant von den Schichten des Unteren Buntsandstein überlagert.

An der Südflanke liegen Rötsalz (*so1Na*) und Rötanhydrit (*so1A*) diskordant auf Zechstein. Diese Gesteine, insbesondere der zur Spröddefomation neigende Rötanhydrit, wurden bei der Sattelbildung tektonisch überprägt und durch die Auffahrung des Baufeldes in der Südflanke gebirgsmechanisch beansprucht /IfG 2006a/. Vom Salzspiegel aus sind die Gesteine subrodiert /COL 2006c/. Im Hangenden des Rötanhydrit schließen sich etwa 100 m mächtige, gering durchlässige Schichten des Oberen Buntsandstein (*so2-so4, Rötquitard*) an und werden vom Muschelkalk überlagert. Die Schichten sind in einem lokalen Bereich südlich des oberen Grubengebäudes durch Scherbeanspruchungen durchgehend bis zum Muschelkalk deformiert worden (Kapitel 2.3).

Die beanspruchten Zonen des Röt lassen sehr wahrscheinlich Lösungsbewegungen zu und stellen sowohl mögliche Zutrittspfade für Lösungen zum Grubengebäude als auch mögliche Ausbreitungspfade für Lösungen und Schadstoffe in der Nachbetriebsphase dar (Kapitel 2.5 und 2.6).

An den Flanken des Sattels schließen sich die Sedimentationsräume der Schöppenstedter Mulde im Norden und der Remlinger Mulde im Süden an (Abbildung 2.2-2) /ERC 2004a/.

Das Deckgebirge ist durch Bruchstörungen überprägt, die im Zuge der Halokinese mit unterschiedlicher Kinematik reaktiviert wurden. Die Störungszonen verlaufen parallel (NW), diagonal (ENE bzw. SSE) oder quer (NE) zur Salzstruktur und fallen sowohl steil als auch flach ein /ERC 2004a/. Hydraulisch wirksame Störungszonen von potenziell besonderer Bedeutung für die mögliche Ausbreitung von Schadstoffen in der Nachbetriebsphase sind

- die Diagonalstörung bei Groß Vahlberg,
- die Diagonal- und die Querstörung der Ammerbeek sowie
- die Querstörungen von Wittmar.

Die Querstörung der Ammerbeek durchschlägt das Röt im Bereich von Asse II, die Diagonalstörung der Ammerbeek in geringem Abstand östlich davon und die Querstörungen von Wittmar südlich von Asse I (Abbildung 2.2-2). Die Störungen queren den Rötquitard und stellen dadurch bevorzugte Wegsamkeiten zwischen dem verstürzten Deckgebirge und dem Rötanhydrit einerseits und dem Muschelkalk andererseits dar. Die Diagonalstörung bei Groß Vahlberg nordöstlich von Asse II, die im verstürzten Deckgebirge in die Scheitelstörung übergeht, bildet potenzielle Wegsamkeiten zwischen dem verstürzten Deckgebirge und grundwasserleitenden Schichten in der Nordflanke (Kapitel 2.5).

Im Scheitel des Sattels verläuft zudem ein Fächer von Bruchstörungen in streichender Richtung.

2.3 Gebirgsmechanische Standortverhältnisse

Die Analyse der gebirgsmechanischen Verhältnisse bildet die Grundlage für den Nachweis der Tragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes in der Betriebsphase und die Prognose der gebirgsmechanischen Entwicklung in der Nachbetriebsphase. Diese Tragfähigkeit ist das Fundament für das Sicherheits- und Schließungskonzept der Schachtanlage (Kapitel 4). Der Nachweis der Tragfähigkeit ist eine Voraussetzung für die Gültigkeit der geowissenschaftlichen Langzeitprognose (Kapitel 5.1).

Auf Grundlage der Analyse der gebirgsmechanischen Situation wurden die Modellansätze für die Prognose der Konvergenz und der Porositätsabnahme im Grubengebäude erstellt (Kapitel 6.5). Die Konvergenz, Porositätsabnahme und Änderungen der hydraulischen Widerstände sind entscheidende Einflussgrößen für die Modellrechnungen zum Nachweis der Langzeitsicherheit, sowohl für die Transportrechnungen als auch für die Senkungsprognose (Kapitel 7.2ff.).

Die gegenwärtigen gebirgsmechanischen Verhältnisse am Standort und deren Entwicklung in der Betriebsphase sind in der Tragfähigkeitsanalyse /IfG 2006a/ umfassend beschrieben und analysiert. Aufgrund der fundamentalen Bedeutung für die Entwicklung des Gesamtsystems und für die Anfangs- bzw. Rahmenbedingungen des Langzeitsicherheitsnachweises werden wesentliche Aspekte hier dargestellt.

2.3.1 Gegenwärtige Situation

Im ungestörten Salinar herrscht der geologisch und tektonisch geprägte Primärspannungszustand. Die Auffahrung von Grubenbauen verändert diesen Spannungszustand. Art und Reichweite der Änderungen sind von den Eigenschaften des Gebirges, von der Form und Größe der Grubenbaue und von dem Einfluss benachbarter Grubenbaue abhängig. Für die Entwicklung der gebirgsmechanischen Verhältnisse sind Wechselwirkungen von bergbaulichen Tätigkeiten und gebirgsmechanischen Reaktionen des Tragsystems aus den Pfeilern und Schweben maßgebend, wie

- die Abbauphase mit den Auffahrungen der Grubenbaue,
- die Phase der offenen Standzeit der Grubenbaue und
- die Phase nach dem Versatz der Grubenbaue.

Durch kontinuierliche markscheiderische und geotechnische Messungen besteht eine umfangreiche und verlässliche Datenbasis für die Analyse der gebirgsmechanischen Situation.

Entscheidend für die gebirgsmechanische Situation am Standort und deren Entwicklung ist das Baufeld in der Südflanke. Die Analyse des *in situ*-Zustandes ergibt, dass von einem nachgiebigen Abbausystem an der Südflanke mit entfestigten Schweben und Pfeilern auszugehen ist, wobei im erheblichen Maße Gebirgsspannungsumlagerungen – verbunden mit einem Lastabtrag auf das benachbarte südliche Deckgebirge – stattgefunden haben. Das Deckgebirge hat darauf mit lokalen Festigkeitsüberschreitungen in geologisch angelegten Trennflächen bzw. mit der Bildung von Scherbändern im Gebirge reagiert. Diese Festigkeitsverluste verringerten die Eigentragfähigkeit im die Südflanke überspannenden Deckgebirgsgebölbe und in Verbindung mit den reduzierten Tragfähigkeiten der Pfeiler und Schweben in der Südflanke führte dies seit Mitte der 80er Jahre zu verstärkten Deckgebirgsverschiebungen. Aufgrund dessen haben sich durch Verformungen nicht nur Rissysteme und Aufblätterungen in den Pfeilern und Schweben ausgebildet, sondern die aufgelockerten Gebirgsbereiche um die Abbaue auch zu einer zusammenhängenden Auflockerungszone um das gesamte Baufeld verbunden. Infolge der zu gering bemessenen Steinsalz-Barriere gegen das Deckgebirge kam es zu lokalen Integritätsverlusten durch erhöhte Scherbeanspruchungen, und im Deckgebirge bildete sich eine Scherdeformationszone, welche etwa im Firstbereich der 511-m-Sohle das Grubengebäude erreicht /IfG 2006a/. In diesem Gebirgsbereich werden auch erhöhte mikroseismische Aktivitäten festgestellt. Aus den mikroseismischen Messungen kann abgeleitet werden, dass sich dieser Bereich in den letzten Jahren infolge andauernder Verformungen ausgeweitet hat.

Der gegenwärtige Salzlösungszutritt steht mit diesen bergbaubedingten Beanspruchungen im Zusammenhang (siehe Kapitel 2.6).

Einer progressiven Entwicklung der Entfestigungen im Tragsystem ist durch Einbringen des Salzversatzes begegnet worden, der zu einer Konturstabilisierung beiträgt und die Einspannung der Pfeiler auf einem Resttragniveau hält. Diese gebirgsmechanisch positive Wirkung des Versatzes zeichnet sich in der degressiven Tendenz der Pfeilerstauchungsraten ab (Abbildung 2.3-1). Die vor allem horizontal einwirkenden Stauchungen weisen gegenwärtig eine

Rate von etwa 3 ‰ pro Jahr auf. Der Verlauf belegt eine harmonische und degressive Entwicklung der Konvergenz.

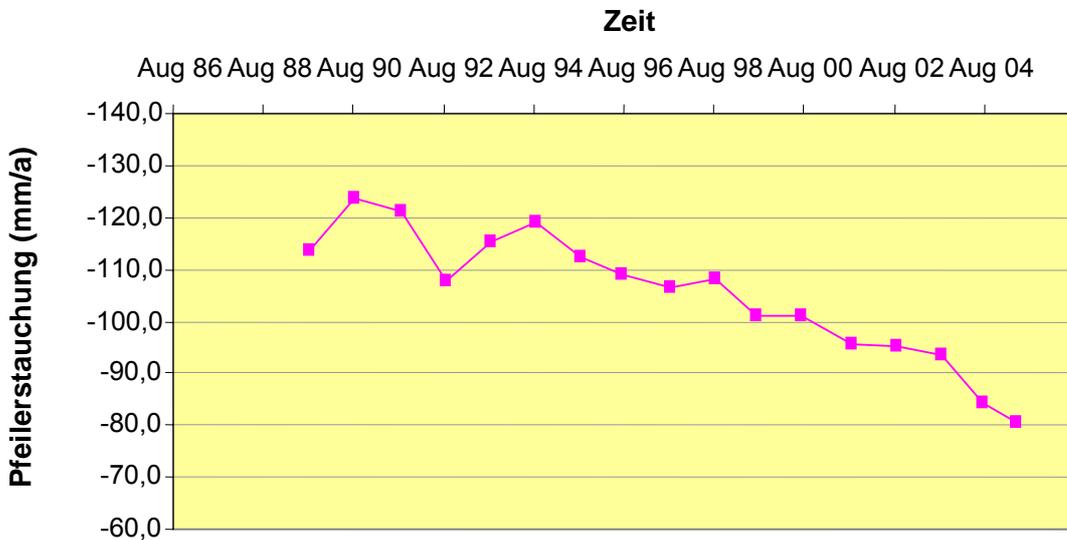


Abb. 2.3-1: Entwicklung der Pfeilerstauchungsrate am Beispiel des Pfeilers zwischen Abbau 2/658 und Abbau 3/658.

Die Tragelemente des Baufeldes im Sattelkern und des Carnallitbaufeldes sind ebenfalls stark beansprucht, werden aber durch den anwachsenden Versatzwiderstand in der Kontur zunehmend stabilisiert. Die Pfeiler und Schweben sind von Rissen durchzogen; relevante Druckeinspannungen werden hier nicht gemessen /IfG 2006a/. Die Verteilung der Minimalspannungen zeigt, dass sich Gebirgsspannungen auf die Baufeldränder verlagert haben. Im Carnallitbaufeld haben sich die aufgelockerten Gebirgsbereiche bereits zu einer Auflockerungszone verbunden, die den gesamten Firstbereich des Baufeldes überspannt. Der durch Konvergenz stark kompaktierte Altversatz in unteren Bereichen der Abbaue übt bereits eine relevante Stützwirkung aus, wogegen der weniger konsolidierte Eigenversatz in den oberen Bereichen der Abbaue nur konturstabilisierend wirkt /IfG 2005c/.

Die gebirgsmechanische Entwicklung in der Betriebsphase wurde mittels unterschiedlicher Modelle nachvollzogen. Das diente einerseits dazu, Ursachen und Wechselwirkungen der bisherigen Entwicklung zu analysieren. Andererseits sind die gebirgsmechanischen Modelle anhand der Standortdaten kalibriert und validiert worden, um eine zuverlässige Langzeitprognose für die Konvergenz zu erhalten. Die Modelle und die Datenbasis für die gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden im Kapitel 6.5 erläutert.

Durch Gebirgsverformungen (Konvergenz der Grubenbaue) werden über Tage Senkungen hervorgerufen. Markscheiderische Messungen zeigen, dass die Rate der senkungsaktiven Konvergenz bis Mitte der 80er Jahre annähernd bei ca. 3 600 m³/a lag. Danach stiegen die Verformungsraten und auch die Rate der senkungsaktiven Konvergenz auf ca. 12 000 m³/a

an. Seit Anfang der 90er Jahre ist die Rate der senkungsaktiven Konvergenz etwa konstant. Die Übertragung der Verformungen bzw. Konvergenzvolumina in eine Absenkung der Tagesoberfläche erfolgt ohne nennenswerte zeitliche Verzögerung /SRO 2006/.

Übertägige Senkungen werden mittels Nivellements seit 1967 gemessen. Der Senkungstrog ist in etwa elliptisch mit Halbachsen von 2,5 km und 1,5 km Länge, umfasst etwa 110 000 m³ und ist im Zeitraum von 1988 bis 2004 durch einen maximalen Senkungsbetrag von 165 mm gekennzeichnet (Abbildung 2.3-2). Die extrapolierte, maximale Absenkung an der Oberfläche seit der Auffahrung bis heute beträgt ca. 250 mm.

Messungen der Konvergenz und deren Prognose (Kapitel 7.2) sowie die o. g. Nivellements ermöglichen eine Prognose für die Senkung der Tagesoberfläche in der Zukunft (Kapitel 7.3).

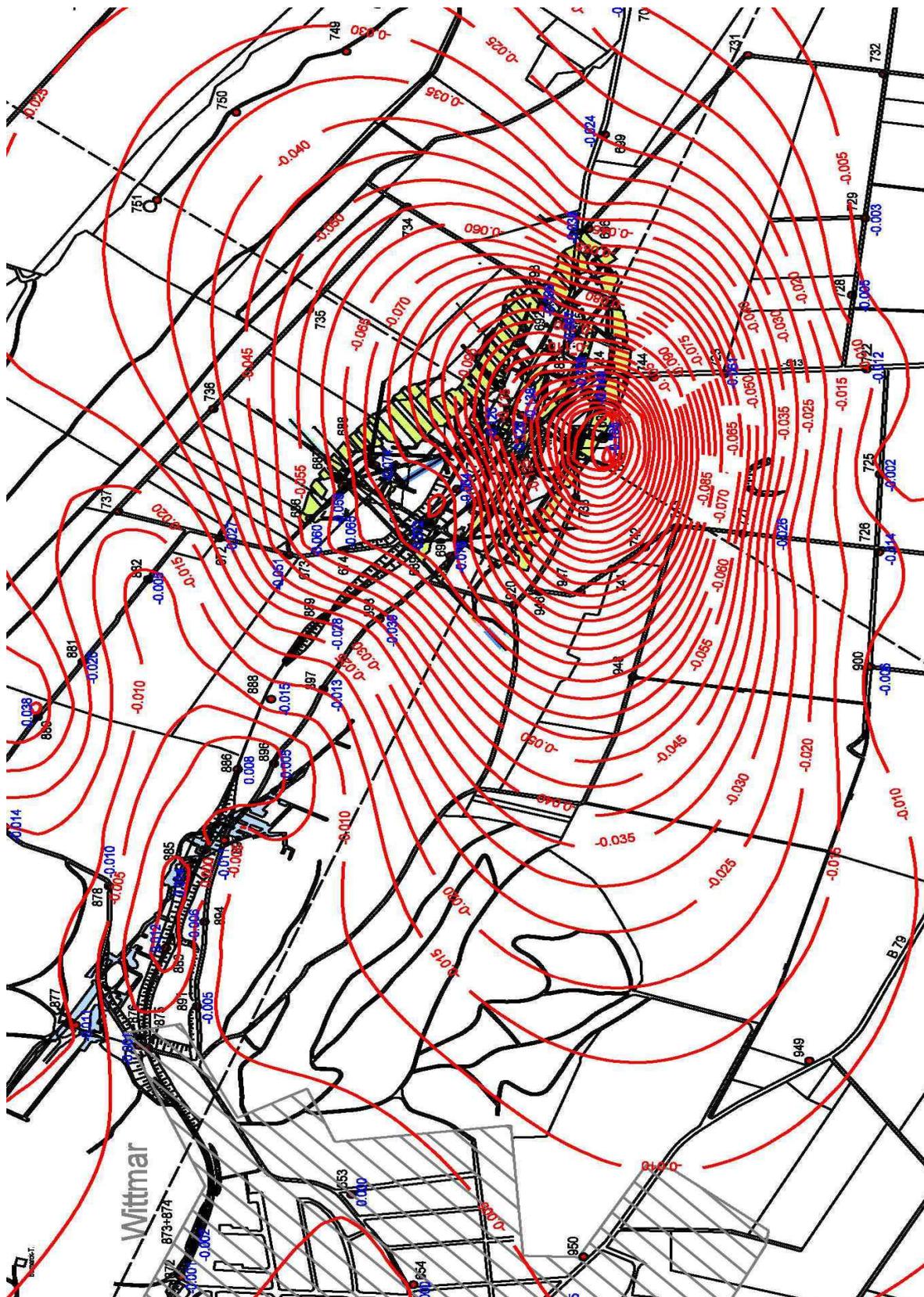


Abb. 2.3-2: Isolinen der Senkungen (rot) und Nivellements (blau) der Höhenänderungen an der Tagesoberfläche im Bereich der SchachtanlageASSE II von 1988 bis 2004 in [m]

2.3.2 Entwicklung in der Betriebsphase

Die Tragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes bestimmt die Anfangs- und Rahmenbedingungen für die Prognose der Langzeitentwicklungen (Kapitel 5.1) sowie die Modellrechnungen für den Langzeitsicherheitsnachweis (Kapitel 7.2ff.).

Die geotechnischen Standortdaten und die gesteinsmechanischen Untersuchungen der Salzgesteine belegen, dass die Tragelemente eine so genannte Resttragfähigkeit aufweisen. Festigkeitsversuche zeigen, dass diese Resttragfähigkeit bei minimalen Druckeinspannungen von nur 0,2 MPa bis zu einer 20 %igen Deformation der Prüfkörper erhalten bleibt /IfG 2006a/. Aus diesen Laborexperimenten und aus gebirgsmechanischen Modellrechnungen leiten sich die folgenden Anforderungen zum Erhalt der Resttragfähigkeit bis zum Ende der Betriebsphase ab:

- gleich bleibender bzw. degressiver Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten – entsprechend der gegenwärtigen Situation – und
- Blockierung von dynamischen Reaktionen im Tragsystem.

Ohne die planmäßige Umsetzung der Schließungsmaßnahmen, insbesondere die schnelle Erhöhung des Fluidinnendrucks im Grubengebäude, ist weder ein stabiler gebirgsmechanischer Zustand zum Ende der Betriebsphase zu erreichen noch eine verlässliche Langzeitprognose der gebirgsmechanischen Entwicklung möglich.

Ein schneller Aufbau eines Fluidinnendrucks im Grubengebäude wird durch Einleiten eines Schutzfluids erreicht (Kapitel 4). Während des Einleitens würde das Tragsystem jedoch eine Phase erhöhter Kriechdeformation im durchfeuchteten Salzgestein durchlaufen, in der zudem der Stützdruck des Versatzes deutlich abnimmt. Vergleichende Rechnungen für verschiedene Varianten der Stabilisierung des Tragsystems in der Einleitphase ergaben, dass nur ein pneumatischer Stützdruck während der Einleitung eines Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle einen gleichbleibenden bzw. degressiven Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten in der Südflanke – entsprechend den o.g. Anforderungen – in der späten Betriebsphase gewährleistet /IfG 2006a/. Da der hydraulische Druck im Deckgebirge über dem vorgesehenen pneumatischen Fluiddruck liegt, ist eine Entlastung der eingespannten Luft über Auflockerungszonen im Salzgestein nicht möglich /COL 2006d/.

Die zunehmende Stützwirkung des Versatzes und des Fluidinnendrucks behindert die Pfeilerverformung und führt zu einer harmonisch degressiven Konvergenzentwicklung /IfG 2006a/. Eine solche Situation ermöglicht den Erhalt der Resttragfähigkeit und eine verlässliche Prognose der Entwicklung des Gesamtsystems (vgl. auch Kapitel 2.6). Die Anforderungen werden durch das Schließungskonzept erfüllt (Kapitel 4).

In Fortführung der Modellierung der bisherigen Betriebsphase wurde die Entwicklung des Tragverhaltens in der Südflanke weiter prognostiziert. Die Modelle und die Datenbasis für die Modellrechnungen zum Nachweis der Tragfähigkeit werden im Kapitel 6.5 erläutert. Die Modellrechnungen für eine „trockene“ Konvergenzentwicklung weisen bis zum Jahr 2011 eine relativ konstante Tragfähigkeit aus, die sich trotz fortlaufender Bruchprozesse in den Pfeilern

wesentlich aus der Stützwirkung der Schwebenreste sowie der Verdämmung und Querdehnungsbehinderung der Pfeilerkonturen durch den Versatz ergibt.

Eine Prognose der gebirgsmechanischen Situation nach dem Einleiten des Schutzfluids mit Beaufschlagung des pneumatischen Fluiddrucks im Jahr 2011 deutet darauf hin, dass die Schädigung der bereits deformierten Gebirgs- und Grubenbereiche zwar weiter fortschreiten wird, jedoch ohne dass die Resttragfähigkeit verloren geht (siehe Kapitel 6.5). Die lokale Ausdehnung der Deckgebirgsbereiche mit erhöhten Scherdeformationen wird sich in der Betriebsphase nicht signifikant verändern /IfG 2006a/. Die erhöhten Scherdeformationen in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere führen zu einem weiteren Integritätsverlust im Bereich der 511-m-Sohle. Unterhalb von 574 m Teufe bewirkt die zunehmende Deformation keine hydraulisch wirksame Schädigung der Steinsalz-Barriere.

2.4 Seismologische Standortverhältnisse

Geotektonische Prozesse und seismische Ereignisse können grundsätzlich dynamische Reaktionen im Tragsystem auslösen, welche die gebirgsmechanische Entwicklung in relevantem Ausmaß ändern (vgl. Kapitel 2.3.2). Daher werden relevante Aspekte einer möglichen Standortgefährdung durch geotektonische Prozesse oder durch seismische Ereignisse kurz dargestellt.

Eine umfassende Analyse der seismologischen Verhältnisse erfolgte in /GSF 2006g/. Der Zeitraum, der mittels historischer Aufzeichnungen seismologisch bewertet werden kann, umfasst etwa 1 000 Jahre /LEY 1999/. Die Auswertung der historischen Daten ergibt, dass die norddeutsche Tiefebene eine Region mit geringer Erdbebenhäufigkeit und -intensität ist. Im Umkreis des Standorts Asse von 50 km besaß das tektonische Beben bei Magdeburg im Jahr 1409 die größte Intensität: etwa Stufe VI nach MSK-Skala /LEY 2004/. Zur Bewertung der seismischen Gefährdung am Standort Asse wurden deshalb ein Bemessungserdbeben mit einer Intensität von VI½ nach MSK-Skala und einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von $10^{-5}/a$ veranschlagt. Die Auswirkungen dieses Bemessungserdbebens werden in der gebirgsmechanischen Langzeitprognose untersucht und bewertet (Kapitel 7.2).

Eine geomechanische Aktivierung des Systems Asse durch geotektonische Aktivitäten in der Erdkruste ist unwahrscheinlich /COL 2005b/. Die Asse-Heeseberg-Struktur befindet sich in einer Region, in der seit 65 Mio. Jahren keine relevanten geotektonischen Aktivitäten in der Erdkruste stattgefunden haben.

2.5 Hydrogeologische Standortverhältnisse

Die hydrogeologische Situation am Standort Asse ist gegeben durch den Aufbau des Deckgebirges (und des Hutgesteins) über der Salzstruktur in Bezug auf die hydraulisch relevanten Einheiten und Strukturen, deren hydraulische Eigenschaften wie Permeabilität und Porosität sowie durch die Rate und die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung und der Exfiltration. Die Funktionsweise des hydraulischen Systems stellt sich anhand der gegenwärtig ausgebildeten Fließsysteme und der heutigen Lösungsdruckverteilung dar. Einen weiteren

Bestandteil der hydrogeologischen Situation bilden hydrogeochemische Sachverhalte, wie beispielsweise die Sättigung des Grundwassers an NaCl in tieferen Gebirgsbereichen, welche die dortigen Fließbewegungen durch Dichteeffekte deutlich beeinflusst.

Die hydrogeologischen Standortverhältnisse im Deckgebirge sind in den hydrogeologischen Modellvorstellungen /COL 2006c/ ausführlich beschrieben und analysiert.

Die besondere Bedeutung der hydrogeologischen Gegebenheiten für die Langzeitsicherheit ergibt sich aus dem bestehenden hydraulischen Kontakt zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge durch die Zone der desintegrierten Steinsalzbarriere an der Südflanke der Salzstruktur (Kapitel 2.2). Dieser hydraulische Kontakt bewirkt:

- den heutigen Salzlösungszutritt zum Grubengebäude (Kapitel 2.6), mit welchem die hydraulische Wirksamkeit der Zone der desintegrierten Steinsalzbarriere nachgewiesen ist.
- das (zeitlich begrenzte) Entweichen von Grubenluft in das Deckgebirge bei der vorgesehenen Beaufschlagung des Grubengebäudes mit Druckluft beim Einleiten von Schutzfluid. Aus der Forderung, dass dieses Entweichen zeitlich und damit mengenmäßig begrenzt ist, ergibt sich der maximal zulässige pneumatische Stützdruck aus der gegenwärtigen Lösungsdruckverteilung im Deckgebirge /COL 2006d/.
- das Auspressen von Grubenlösung in das Deckgebirge im Verlauf der Nachbetriebsphase. Das Deckgebirge stellt diesem Auspressen einen zeitlich veränderlichen hydraulischen Widerstand entgegen, welcher rückwirkend die Konvergenzentwicklung in der Grube beeinflusst (Kapitel 6.5 und 6.7).
- den Austritt von Schadstoffen mit der Grubenlösung in das Deckgebirge, die dortige Ausbreitung entlang der möglichen Ausbreitungspfade, sowie deren Austrag in Exfiltrationsgebiete und in die Biosphäre.

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit werden diese Prozesse mit Modellrechnungen quantitativ beschrieben (Kapitel 6.8), das hydrogeologische Verständnis zum Standort Asse bildet das Fundament für diese Modellrechnungen.

Die hydrogeologische Situation am Standort Asse präsentiert sich als ausgeprägte Wechselfolge von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern, welche beidseits der Zechstein-Salzstruktur steil aufgerichtet sind und NW-SE streichen (Kapitel 2.2).

Neben den Störungszonen der Diagonalstörung Groß Vahlberg, der Quer- und Diagonalstörung Ammerbeek sowie der Querstörungen Wittmar und Wittmar-E, denen vermutlich eine besondere hydraulische Bedeutung zukommt (vgl. auch Kapitel 2.2), existiert eine Vielzahl kleinerer Störungen, welche in ihrer Gesamtwirkung die hydraulische Durchlässigkeit der Grundwassergeringleiter quer zur Struktur, d.h. deren Leckagevermögen, beeinflussen.

Bedeutende Aquifere sind im regionalen Zusammenhang der Muschelkalk, der Rhätaquifer des Oberen Keuper sowie der Rogenstein des Unteren Buntsandstein (letzterer nur in der Nordflanke der Salzstruktur). Die regionalen Infiltrationszonen dieser Aquifere befinden sich im Norden (Elm) und Süden (Großer Fallstein) des Asse-Höhenzuges und liegen höher als

dieser. Die regionalen Exfiltrationszonen befinden sich im Westen und Süden (ko) der Asse und liegen tiefer. Die Asse ist von diesen Infiltrations- und Exfiltrationszonen durch tiefe Muldenstrukturen getrennt.

Die hydraulische Durchlässigkeit dieser regionalen Aquifere nimmt mit der Tiefe deutlich ab und ist in den Mulden vergleichsweise gering. Gleichzeitig ist das Grundwasser in der Tiefe durch Salzlösung an den Salzlagern des Zechstein, des Röt (so1Na) sowie des Mittleren Muschelkalk (mmNa) stark versalzen und somit deutlich schwerer als oberflächennahes Grundwasser mit geringer Mineralisation. Beide Sachverhalte behindern den regionalen Grundwasserfluss in diesen Aquiferen. Die Filtergeschwindigkeit, und damit der regionale Grundwasserumsatz, ist im Vergleich zur Grundwasserneubildung am Standort Asse daher sehr gering.

Das im Raum Asse neugebildete Grundwasser exfiltriert deshalb praktisch vollständig im Nahbereich der Asse. Die lokalen Hochzonen bilden Infiltrationsgebiete, die Exfiltration erfolgt in die Bäche der Taleinschnitte, aus Quellen am Rand des Asse-Höhenzuges und entlang quartärer Rinnen in die angrenzenden Muldenstrukturen.

Im Hinblick auf den Nachweis der Langzeitsicherheit können die regionalen Grundwasserbewegungen somit vernachlässigt werden, weil der relative Anteil der Schadstoffmenge, welcher in die regionalen Aquifere gelangen kann, äußerst gering ist und überdies die Transportzeiten zu den regionalen Exfiltrationsgebieten lang sind im Vergleich mit jenen in die lokalen Exfiltrationsgebiete.

Östlich der Schachanlage Asse II, etwa auf Höhe der Klein Vahlberger Buchen, verläuft eine Oberflächenwasserscheide quer über die Asse-Struktur von SW nach NE. Die Grundwasserscheiden in den die Asse flankierenden Grundwasserleitern werden ebenfalls in diesem Bereich vermutet, so dass die Grundwasserbewegungen um die Schachanlage Asse II gegen jene östlich der Klein Vahlberger Buchen abgegrenzt sind.

Das Gebiet der Asse westlich dieser Grundwasserscheide zerfällt in die hydrogeologischen Teilgebiete NE-Flanke, zentraler Teil (südliches Längstal) und SW-Flanke. Für die beiden letzteren Teilgebiete sind hydraulische Wechselwirkungen nachgewiesen.

Das Teilgebiet NE-Flanke ist westlich der Diagonalstörung Groß Vahlberg durch den konkordant auf der Salzstruktur aufliegenden, gering durchlässigen Unteren Buntsandstein vom zentralen Teil hydraulisch abgetrennt. Östlich der Diagonalstörung Groß Vahlberg ist die Nordflanke stark zerblockt. Dadurch gelangen durchlässige Muschelkalkschollen mit dem – dort allerdings geringer durchlässigen (siehe unten) – zentralen Teil in hydraulischen Kontakt. Die Diagonalstörung Groß Vahlberg selbst trifft gegen Norden, unweit der Nordgrenze des zentralen Teils, auf die grundwasserführenden Schichten Rogenstein und Rötanhydrit⁴ der NE-Flanke und stellt somit eine hydraulische Verbindung zwischen dem zentralen Teil und der NE-Flanke her.

⁴ Der Rötanhydrit der NE-Flanke ist bis in nennenswerte Teufe subrodiert und besitzt daher Aquifer-Charakter

Das für die Langzeitsicherheit zu betrachtende Gebiet kann dadurch weiter eingegrenzt werden: Es beschränkt sich auf den zentralen Teil und die SW-Flanke, jeweils westlich der Grundwasserscheide auf Höhe der Klein Vahlberger Buchen. Der hydrogeologische Aufbau dieses Gebietes ist von N nach S wie folgt (vgl. geologischer Aufbau in Kapitel 2.2):

- Verstürztes Deckgebirge / Hutgestein (Zentraler Teil): Das geologisch sehr inhomogen aufgebaute verstürzte Deckgebirge und – etwas weniger ausgeprägt – das geringmächtige Hutgestein sind hydraulisch relativ gut durchlässig und können als eine hydrogeologische Einheit betrachtet werden. Östlich der Ammerbeek, im sogenannten Vahlberger Abschnitt, ist das verstürzte Deckgebirge toniger ausgebildet und deshalb geringer durchlässig. Oberhalb der Schachanlage Asse I und westlich davon sind am Zechstein-Salzspiegel hoch durchlässige Subrosionsgerinne ausgebildet, die nach Groß Denkte entwässern und dort salzhaltige Quellen speisen. Gegen Osten reichen die Subrosionsgerinne nicht bis in die Nähe der Schachanlage Asse II. Die vermutete Hochlage des Zechstein-Salzspiegels im Bereich der Remlinger Herse (vgl. Abbildung 2.2-1) und das Abfallen des Salzspiegels oberhalb der Schachanlage Asse II nach Osten üben im Hinblick auf eine dichtebedingte Ausbreitung von schwerer Lösung nach Westen, in Richtung Subrosionsgerinne, eine begrenzte Barrierefunktion aus.
- Rötanhydrit (so1A): Der Rötanhydrit der Südflanke wurde bei der Strukturbildung geogen erheblich beeinflusst und zudem in der Flanke der Schachanlage Asse II als Folge der bergbaubedingten Verformungen im Deckgebirge aufgelockert. Er ist deshalb als Kluffgrundwasserleiter mit deutlich abnehmender Klüftung und Permeabilität bei zunehmender Tiefe sowie mit lokal erhöhter Permeabilität in der Flanke der Schachanlage zu betrachten. Im obersten Bereich, unterhalb des Zechstein-Salzspiegels, dürfte der Rötanhydrit zusätzlich lokal verkarstet sein. Entlang der SW-Flanke kann der Rötanhydrit durch Versatz an Störungen quer zur Salzstruktur teilweise oder vollständig unterbrochen sein, was die Ausbreitung von Grubenlösung und Schadstoffen in Streichrichtung behindern oder unterbinden kann. Der Rötanhydrit steht mit dem verstürzten Deckgebirge in hydraulischem Kontakt, so dass beide als hydraulisches System „Verstürztes Deckgebirge / Rötanhydrit“ angesehen werden können. Ein zusätzlicher hydraulischer Kontakt zwischen Rötanhydrit und Hutgestein über Anhydritmittel-Horizonte im Zechstein-Salinar kann nicht ausgeschlossen werden.
- Rötaquitard (so2-so4): Im stratigraphisch Hangenden des Rötanhydrit schließen rund 100 m mächtige, gering durchlässige Schichten des Oberen Buntsandstein (so2-so4) an, welche den Rötanhydrit vom Muschelkalk hydraulisch trennen. Sie werden unter dem Begriff Rötaquitard zusammengefasst.
- Unterer Muschelkalk (mu): Der Untere Muschelkalk kann insgesamt als guter Grundwasserleiter eingestuft werden.
- Mergelige Schichten des Mittleren Muschelkalk (mm-m): Diese sind ca. 25 m mächtig und trennen hydraulisch den Oberen vom Unteren Muschelkalk. Ein vollständiger Versatz an Störungen ist möglich, so dass ihre Barriere Wirkung örtlich beeinträchtigt sein kann. Das Salzlager *mmNa* im stratigraphisch Hangenden der mergeligen Schichten *mm-m* ist bis in eine Tiefe von ca. -300 mNN subrodiert.⁵ Unterhalb des subrodierten

⁵ Der genaue Verlauf des *mmNa*-Salzspiegels in Streichrichtung ist nicht gesichert bekannt.

Bereiches bewirkt das Salzlager *mmNa* die vollständige hydraulische Trennung des Unteren vom Oberen Muschelkalk.

- Oberer Muschelkalk (*mo*): Der Obere Muschelkalk besitzt wie der Untere Muschelkalk eine relativ gute Durchlässigkeit und ist ebenso als Grundwasserleiter einzustufen. Die hydraulische Trennung vom Unteren Muschelkalk ist – wie bereits oben erwähnt – oberhalb von ca. -300 mNN nur unvollständig, so dass der Obere und der Untere Muschelkalk in erster Näherung zum Teilsystem „Muschelkalk“ zusammengefasst werden können.

Den hydrogeologischen Abschluss gegen Süden bilden – mit Ausnahme quartärer Rinnen in den Tälern des Rothebachs und der Ammerbeek – die gering durchlässigen Schichten des Unteren und Mittleren Keuper.

Für alle diese hydrogeologischen Einheiten gilt, wie für die regionalen Aquifere bereits erwähnt, dass ihre hydraulischen Durchlässigkeiten mit zunehmender Tiefe deutlich abnehmen, und dass das Grundwasser in der Tiefe durch Lösung an den Salzlagern des Zechstein, des Röt (*so1Na*⁶) sowie des Mittleren Muschelkalk (*mmNa*) stark versalzen, die Grundwasserströmung in der Tiefe somit stark dichtebeeinflusst ist.

Weiter ist festzuhalten, dass sich das Grundwasser in allen hydrogeologischen Einheiten entlang von diskreten Wegsamkeiten bewegt, die durchlässigen wie auch die gering durchlässigen Schichten zeigen also typische Eigenschaften von Kluftgrundwasserleitern.

Aufgrund der zunehmenden gebirgsmechanischen Beanspruchung des Deckgebirges ab Mitte der 80er Jahre an der Südflanke der Schachtanlage ist von einem durch Scher- und Zerrspannungen entstandenen Scherdeformationsbereich im Röttaquitard entlang der geologischen Trennfläche S3/D9 auszugehen, welcher bis in den Unteren Muschelkalk reicht (vgl. Kapitel 2.3). Dessen Permeabilität ist gegenüber dem nicht bergbaubedingt beeinflussten Röttaquitard in gleicher Tiefe vermutlich um mehrere Größenordnungen erhöht, so dass die Annahme einer hydraulisch bedeutsamen Verbindung zwischen Rötanhydrit und Unterem Muschelkalk gerechtfertigt ist.

Die Grundwasserbewegung im System „Muschelkalk“ erfolgt vorwiegend längs der Struktur von den Kulminationen der Grundwasseroberfläche in den Infiltrationszonen der Gebiete Asse-Burg, Remlinger Herse und Klein Vahlberger Buchen zu den Exfiltrationszonen in den Tälern des Rothebaches und der Ammerbeek bzw. bei Groß Denkte. Zusätzlich ist vermutlich ein intermediäres Fließsystem ausgebildet, welches von der Grundwasserscheide auf Höhe der Klein Vahlberger Buchen unter den Tälern der Ammerbeek und des Rothebaches hindurch bis nach Groß Denkte reicht. Im System „Verstürztes Deckgebirge / Rötanhydrit“ fließt Grundwasser hauptsächlich von der Grundwasserkulmination nördlich der Remlinger Herse nach Osten in Richtung Tal der Ammerbeek oder über die Subrosionsgerinne nach Westen bis Groß Denkte. Untergeordnet kann Grundwasser in das Tal von Wittmar exfiltrieren und entlang der Diagonalstörung Groß Vahlberg sowie östlich davon in die NE-Flanke abfließen. Der Grundwasserumsatz im Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges

⁶ Das Röt Salz *so1Na* der SW-Flanke kann in Hinblick auf die Langzeitsicherheit zur Vereinfachung dem Zechstein-Salinar zugewiesen werden.

ist jedoch vergleichsweise gering. Eine Übersicht der am Standort Asse heute stattfindenden Grundwasserbewegungen zeigt Abbildung 2.5-1.

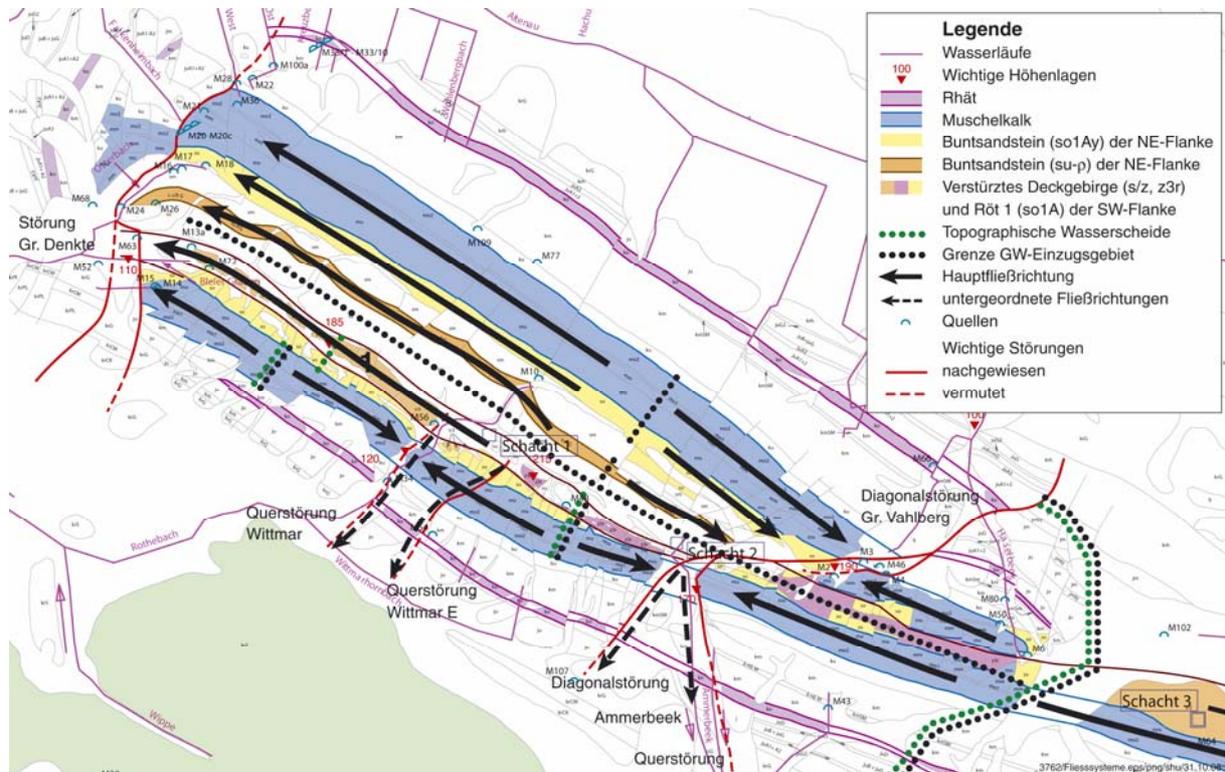


Abb. 2.5-1: Grundwasserbewegungen am Standort Asse nach /COL 2006c/

Von Bedeutung für die Langzeitsicherheit sind jeweils die horizontalen Positionen der Grundwasserkulminationen, wodurch die Unterteilung in lokale Fließsysteme vorgegeben wird. Von weiterer Bedeutung sind auch die vertikalen Positionen, bzw. die jeweiligen hydraulischen Gradienten in Richtung der Exfiltrationsgebiete, welche für den Austrag von Salz und Schadstoffen in die Exfiltrationsgebiete maßgebend sind (siehe unten).

Grundwasserflüsse zwischen „Verstürztem Deckgebirge / Rötanhydrit“ und „Muschelkalk“ sind über Leakage durch den Rötäquitard, entlang der hydraulisch bedeutsamen Störungen quer zur Struktur oder entlang gebirgsmechanisch beanspruchter Bereiche mit erhöhter Permeabilität (Scherdeformationsbereich S3/D9) möglich.

Die Transmissivität der Pfade durch den Rötäquitard (Leakage) zur Zone der desintegrierten Steinsalzbarriere im Verhältnis zur Transmissivität der Pfade im System Rötanhydrit – ebenfalls zur Zone der desintegrierten Steinsalzbarriere – bestimmt die Beiträge dieser Pfade zum heute stattfindenden Lösungszutritt in die Grube. Dieses Verhältnis ist nicht gesichert bekannt /GSF 2006d/, der größere Anteil dürfte jedoch über den Scherdeformationsbereich S3/D9 im Rötäquitard zur Übertrittsstelle gelangen.

In der Nachbetriebsphase bestimmt dieses Verhältnis – neben anderen Faktoren – die Aufteilung der ausgepressten Grubenlösung auf die prinzipiellen Ausbreitungspfade „Rötan-

hydrit / Verstärktes Deckgebirge“ und „Muschelkalk“. Die mit den in Kapitel 6.8 beschriebenen Modellrechnungen als bedeutend identifizierten Ausbreitungspfade für Schadstoffe bis in das oberflächennahe Grundwasser sind:

- a) in das verstärkte Deckgebirge und dort direkt zur Geländeoberfläche im Tal der Ammerbeek,
- b) in das verstärkte Deckgebirge und von dort in die NE-Flanke der Salzstruktur,
- c) schichtquerend, entlang einer Störungszone, durch aufgelockerte Gebirgsbereiche oder flächig durch den Röttaquitard in den Muschelkalk und entlang kurzer Pfade Richtung Geländeoberfläche im Tal der Ammerbeek, oder
- d) schichtquerend wie in c) in den Muschelkalk und von dort im Streichen in das Exfiltrationsgebiet im Tal von Wittmar oder weiter nach Groß Denkte.

Weitere mögliche Ausbreitungspfade, wie z.B. jener aus dem verstärkten Deckgebirge entlang der Subrosionsgerinne nach Groß Denkte, sind in /COL 2006a/ charakterisiert und in /COL 2006d/ quantifiziert.

Bei der Ausbreitung von Grubenlösung und darin enthaltenen Schadstoffen entlang der Ausbreitungspfade wirken verschiedene Prozesse: Durch Dispersion vermischt sich die Grubenlösung mit Deckgebirgslösung, wodurch die Lösungsdichte, und somit die Tendenz zum gravitären Absinken in tiefere Gebirgsbereiche abnehmen. Dieser Prozess wird durch den diffusiven Austausch von Inhaltsstoffen zwischen Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzungen verstärkt. Durch die gleichen Prozesse nehmen auch die Konzentrationen der mit der Grubenlösung ausgetretenen Schadstoffe ab.

Kleinräumig wirken die Sorption von Schadstoffen an Mineraloberflächen sowie der diffusive Austausch zwischen den durchströmten Klüften und den angrenzenden Matrixporenräumen (Matrixdiffusion). Beide Prozesse wirken transportverzögernd, was für die Langzeitsicherheit günstig ist. Sie sind jedoch schwierig quantitativ zu beschreiben und damit für den Nachweis der Langzeitsicherheit nicht belastbar.

Eine weitere Verdünnung der salzhaltigen Deckgebirgslösung und darin enthaltener Schadstoffe wirkt beim Hochschleppen aus tieferen Gebirgsbereichen in oberflächennahes Grundwasser unterhalb der Exfiltrationszonen im Tal der Ammerbeek und im Tal von Wittmar. Die hochschleppenden Kräfte der lokalen Fließsysteme unterhalb der Exfiltrationsgebiete, welche die dortigen Transport- und Verdünnungsprozesse verursachen, hängen von den hydraulischen Gradienten zwischen den lokalen Infiltrationszonen und den Exfiltrationszonen ab. Der Verlauf der Grundwasseroberfläche hat daher einen bedeutenden Einfluss auf die Langzeitsicherheit.

2.6 Salzlösungszutritte

Kenntnisse über die Herkunft der zutretenden Salzlösung und die Genese der Lösungszutritte lassen Prognosen der hydraulischen Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge zu (vgl. Kapitel 2.5). Auf der Basis dieser Prognosen werden potenzielle Austritts- und Ausbreitungspfade für Schadstoffe und deren hydraulische Eigenschaften abgeleitet (Kapitel 6.8).

Eine umfassende Beschreibung der Erfassung und der Beobachtung der Salzlösungs- und Gaszutritte sowie die Analyse zur Entstehung erfolgt in /GSF 2003a/, /ERC 2004/ und /TUC 2006b/. Eine Zusammenfassung und Interpretation des aktuellen Kenntnisstandes enthält /GSF 2006d/. Aufgrund der Bedeutung für die Entwicklung des Gesamtsystems und damit für den Langzeitsicherheitsnachweis werden wesentliche Aspekte hier dargestellt.

Die Salzlösungszutritte vor 1988 stammen entweder direkt aus isolierten Reservoiren in der Salzformation oder sind Betriebslösungen /GSF 2003a/. Die Reservoiren stellen geschlossene Systeme ohne hydraulisch wirksame Verbindungen zum Deckgebirge dar. Die Zutritte sind relativ schnell versiegt und/oder die Zutrittsstellen mit Magnesiamörtel abgedichtet worden. Aus diesen Gründen sind die historischen Salzlösungs- und Gaszutritte für die Entwicklungen des Gesamtsystems und für den Langzeitsicherheitsnachweis nicht von Bedeutung /ERC 2004/.

Dagegen ist der gegenwärtige Salzlösungszutritt im Baufeld in der Südflanke von Bedeutung für die Analyse des Gesamtsystems und der Anfangsbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis /ERC 2004/. Die erste Zutrittsstelle wurde 1988 in der Abbaureihe 5 auf der 532-m-Sohle beobachtet; wenig später wurden in den Abbaureihen 2, 3 und 4 Zutrittsstellen zwischen der 532-m- und der 574-m-Sohle entdeckt. Diese Zutrittsstellen werden als primär eingestuft und kennzeichnen den Gebirgsbereich, in dem Lösung über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Grubengebäude eintritt /GSF 2006d/. Die sekundären Zutrittsstellen in größeren Teufen des Baufeldes stehen mit dem primären Zutrittsbereich in Kontakt und resultieren aus der gravitativen Perkolation von Lösungen durch das aufgelockerte Gebirge nahe der Kontur der Grubenbaue oder durch bereits verfüllte Grubenbaue /ERC 2004/, /TUC 2006b/.

Die Entwicklung der Zutrittsrate im Baufeld in der Südflanke zeigt einen stufenweisen Anstieg (Abbildung 2.6-1). Ursache hierfür sind fortschreitende bergbaubedingte Deformationen im Bereich der Zutrittspfade, welche einen hydraulischen Kontakt mit neuen lösungsführenden Wegsamkeiten bewirkten /ERC 2004/. Aus gebirgsmechanischen Modellrechnungen wurde deshalb abgeleitet, dass sich in den Deckgebirgsschichten der Südflanke des Sattels der Durchtrennungsgrad so erhöht hat, dass zunehmend hydraulische Wegsamkeiten im Röt und durch die Steinsalzbarriere in das Grubengebäude entstanden sind /IfG 2006a/ /GSF 2006d/. Im Bereich von 574 m bis 500 m Teufe ist die gering mächtige Steinsalz-Barriere durch den höchsten Beanspruchungsgrad gekennzeichnet (vgl. Kapitel 2.2 und 2.3).

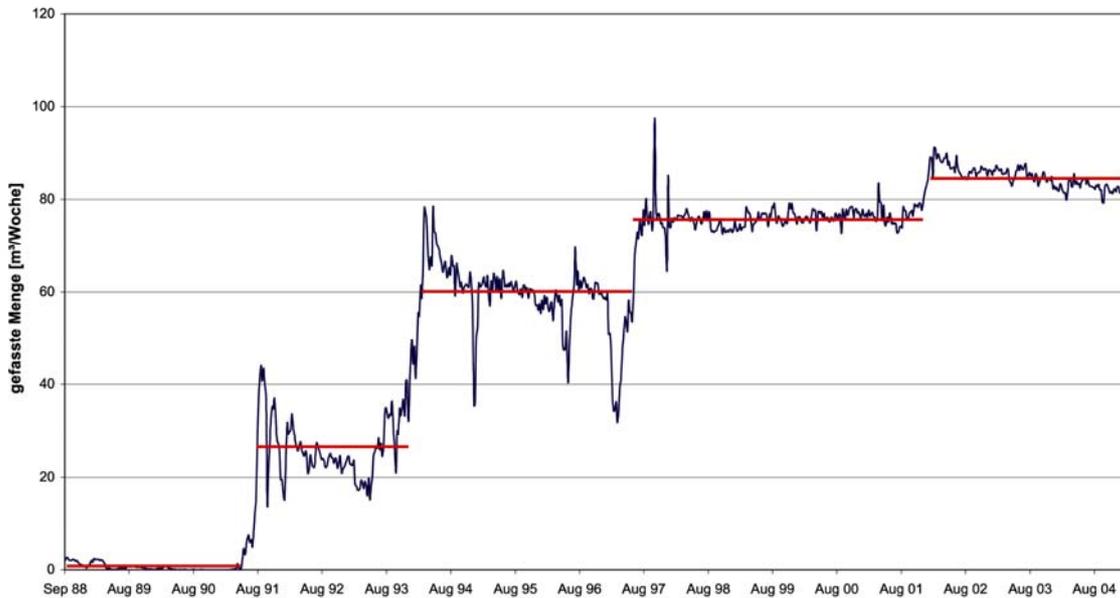


Abb. 2.6-1: Entwicklung der Zutrittsrate im Baufeld in der Südflanke

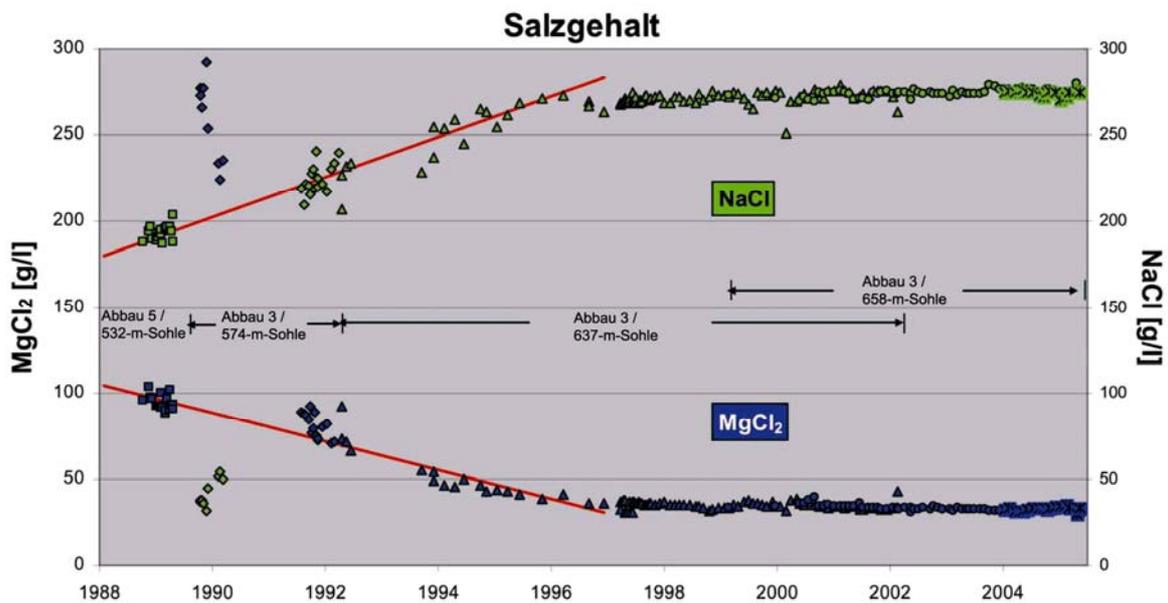


Abb. 2.6-2: Entwicklung der Lösungszusammensetzung der aufgefangenen Lösungen im Baufeld in der Südflanke

Der beobachtete, stufenweise Anstieg der Zutrittsrate im Baufeld in der Südflanke war nach 1996 nicht mehr mit einer deutlichen Veränderung der Zusammensetzung in der aufgefangenen Zutrittslösung verknüpft. Zwar variierte anfangs die Zusammensetzung der aufgefangenen Lösung deutlich, was sehr wahrscheinlich auf Verdunstung zurückzuführen ist, ab

1994 zeigte sich jedoch nur noch ein sehr schwacher Trend zu stetig steigenden NaCl- und abnehmenden MgCl₂-Konzentrationen (Abbildung 2.6-2). Seit 1996 ist die chemische Zusammensetzung der aufgefundenen Lösungen weitgehend konstant.

Da die Entwicklung des Zutrittsgeschehens bisher mit der gebirgsmechanischen Beanspruchung korrespondiert, ist auch zukünftig zu erwarten, dass der Strömungswiderstand der hydraulischen Wegsamkeiten des Salzlösungszutritts von der gebirgsmechanischen Beanspruchung abhängen wird. Eine Beeinflussung des Strömungswiderstands durch chemische Lösungsprozesse ist nicht erkennbar.

Bezüglich der Herkunft dieser Salzlösung wird aus den geologischen, hydrogeologischen, gebirgsmechanischen, geophysikalischen und geochemischen Untersuchungen abgeleitet, dass diese aus dem Deckgebirge stammen und mit grundwasserführenden Schichten in Verbindung stehen /ERC 2004/, /GSF 2006d/. Die Strontium-Isotopensignaturen in den aufgefundenen Lösungen belegen, dass die Lösungen mit den Gesteinen des Röt in Kontakt stehen und dass keine relevanten Zuströme aus dem Zechstein erfolgen /TUC 2006b/.

Die Salzlösungen kommen entweder aus dem Röt selbst, aus dem Unteren und Mittleren Muschelkalk oder aus dem Verstürzten Deckgebirge und können über die folgenden Pfade bis zur Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere gelangen /GSF 2006d/:

- aus dem Unteren Muschelkalk durch den Scherdeformationsbereich bzw. Störungen im Oberen Buntsandstein bis zum Rötanhydrit und dort bis zum geschädigten Bereich der Steinsalz-Barriere ➤ Zutrittspfad 1;
- aus dem Verstürzten Deckgebirge – am Hutgestein vorbei – in den Rötanhydrit und dort bis zum geschädigten Bereich der Steinsalz-Barriere ➤ Zutrittspfad 2;
- aus dem Verstürzten Deckgebirge durch das Hutgestein in den Rötanhydrit und dort bis zum geschädigten Bereich der Steinsalz-Barriere ➤ Zutrittspfad 3;
- aus dem Verstürzten Deckgebirge durch das Hutgestein in die Anhydritmittel und dort bis zum Rötanhydrit, anschließend entlang der Flanke bis zum geschädigten Bereich der Steinsalz-Barriere ➤ Zutrittspfad 4.

Ein direkter Zutrittspfad aus dem Verstürzten Deckgebirge bzw. dem Hutgestein über die Anhydritmittel und die Auflockerungszone des Grubengebäudes bis zum primären Zutrittsbereich ist auszuschließen /GSF 2006d/.

Nach den Modellvorstellungen liegt die hydraulische Drossel für Lösungszuflüsse über den Zutrittspfad 1 im Rötquitard. Diese Gebirgsbereiche wurden und werden weiterhin von Scherdeformationen beeinflusst. Jedoch sind bei einer weiterhin degressiven Entwicklung der Deckgebirgsverschiebungsraten keine weiteren Auflockerungen und damit auch kein Anstieg der Transmissivität des Scherdeformationsbereichs zu erwarten.

Die hydraulische Drossel für Lösungszuflüsse über die Zutrittspfade 2 bzw. 3⁷ wird im Röt-anhydrit zwischen der Subrosionszone des Rötanhydrit und dem Zutrittsbereich vermutet. Dieser Gebirgsbereich, der oberhalb des Baufeldes in der Südflanke liegt, ist dagegen nur gering durch bergbaubedingte Deformationen beansprucht.

Die Speisung des Lösungszutritts ist über alle Pfade gleichzeitig möglich /GSF 2006d/. Eine Synthese der Ergebnisse von Arbeiten im Rahmen der Erkundung und Neubewertung der geologisch-tektonischen Situation an der Südflanke der Schachtanlage, der geotechnischen Sicherheitsbewertung, von gebirgsmechanischen Modellrechnungen, von hydrogeologischen Erkundungen und Überlegungen, von geochemischen Analysen und deren Bewertung, von isotopengeochemischen Arbeiten sowie von geophysikalischen Erkundungen führte zu einem in sich geschlossenen Modell zur Herkunft des aktuellen Salzlösungszuflusses an der Südflanke. Die für die Langzeitsicherheit wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der wahrscheinlich wichtigste Fließpfad im Deckgebirge verläuft aus dem Unteren Muschelkalk und/oder Oberen Buntsandstein über den Scherdeformationsbereich S3/D9 sowie entlang geogen angelegten Störungen durch den Röttaquitard in den Rötanhydrit und von dort durch die Steinsalz-Barriere in das Grubengebäude.
- Darüber hinaus kann der Zufluss untergeordnet auch über geogen angelegte Klüfte im Rötanhydrit und entlang dieser Schicht aus dem Verstürzten Deckgebirge und aus dem Kluftporenraum des Rötanhydrit selbst gespeist werden.

Die aufgefangenen Salzlösungen sind an Halit und an Anhydrit gesättigt, an $MgCl_2$ und KCl dagegen deutlich untersättigt /GSF 2006d/. Aufgrund der Untersättigung an $MgCl_2$ verfügen die Lösungen über ein hohes Lösungspotenzial gegenüber Carnallit.

Die hydraulische Drosselwirkung der Pfade bzw. die Kontraste zwischen diesen bestimmen den Abströmwiderstand gegen das Auspressen von Grubenlösung, siehe Kapitel 6.7 und /COL 2006d/. Da die Drosselwirkungen der Zutrittspfade, insbesondere die des Zutrittspfades 1, von den gebirgsmechanischen Beanspruchungen abhängen, sind die in Kapitel 2.3.2 dargelegten Anforderungen auch hier von Bedeutung. Die Anforderungen werden durch das Schließungskonzept erfüllt (vgl. Kapitel 4). Auf Grund der gleich bleibenden bis degressiven Entwicklung der Deckgebirgsverschiebungsraten wird angenommen, dass die heutigen Verhältnisse bezüglich der Wegsamkeiten im Deckgebirge in guter Näherung auch in Zukunft vorliegen werden.

2.7 Situation an der Tagesoberfläche

Für lange Zeiträume fehlen jegliche Grundlagen für wissenschaftliche Prognosen zu den Verhältnissen in der Biosphäre, zu den klimatischen Verhältnissen wie auch zu den Lebens- und Verzehrgeohnheiten der Menschen. Deshalb wird für den Nachweis der Langzeitsicherheit von den heutigen Verhältnissen, insbesondere den Ernährungsgewohnheiten des

⁷ In der Folge wird die Kategorie „Pfad 2“ für eine Kombination der Pfade 2 und 3 verwendet.

Menschen sowie standortspezifischen Verhältnissen bezüglich der land- und wasserwirtschaftlichen Nutzung, in einer realistischen Weise ausgegangen (Kapitel 6.9).

Die Nutzung von oberflächennahem Grundwasser und Oberflächenwasser, das eventuell Schadstoffe enthält, kann über mehrere Pfade zur Strahlenexposition von Menschen führen. Diese Pfade sind in der Abbildung 2.7-1 dargestellt und beruhen auf der möglichen Nutzung kontaminierter Wässer als

- Trinkwasser,
- Tränkwasser und
- Beregnungswasser.

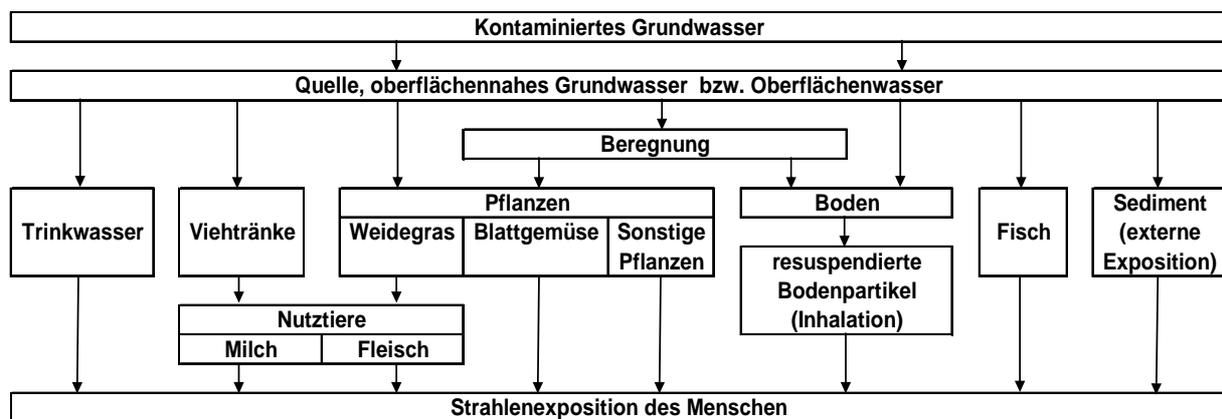


Abb. 2.7-1: Mögliche Expositionspfade bei der Nutzung von kontaminiertem Wasser

Die Aufnahme von Trinkwasser sowie die Bodenstrahlung und die Inhalation von resuspendierten schadstoffhaltigen Bodenpartikeln als Folge von ausgetragenen kontaminierten Wässern sind weitgehend stabil und eher gering abhängig von den Lebensbedingungen und Ernährungsgewohnheiten der Menschen.

Eine Exposition von Schadstoffen mit der Nahrung ergibt sich neben der Aufnahme von Trinkwasser auch durch pflanzliche und tierische Nahrungsmittel. Tierische Nahrungsmittel werden über Tränkwasser beeinflusst und umfassen vor allem Milchprodukte und Fleisch. Wenn Futterpflanzen beregnet werden, nehmen Nutztiere nicht nur über das Tränkwasser sondern auch mit den Futterpflanzen Schadstoffe auf. Die Beregnung führt einerseits zur direkten Ablagerung von Schadstoffen auf den Pflanzen und andererseits, indirekt, zu deren Transport in den Boden, aus dem die Pflanzen wiederum Schadstoffe über die Wurzeln aufnehmen können. Durch Beregnung werden neben landwirtschaftlichen Nutzflächen auch Gärten beeinflusst.

Im Fall einer Schadstoffbelastung der Oberflächenwässer werden durch den Verzehr von Fisch aus dem kontaminierten Gewässer sowie durch den Aufenthalt auf Ufersedimenten zusätzliche Expositionspfade ermöglicht.

Eine umfassende Beschreibung und Analyse der standortspezifischen Bedingungen und der möglichen Expositionspfade enthalten /GSF 2006i/ und /COL 2006f/. Wesentlich für die Auswirkungen von potenziellen Freisetzungen von Schadstoffen für den Menschen und die Umwelt sind am Standort

- der Transport gelöster Schadstoffe im Grundwasser und im Oberflächenwasser,
- die Nutzung kontaminierter Wässer als Trinkwasser,
- die Nutzung kontaminierter Wässer zur Beregnung, Viehzucht und Fischzucht,
- Art und Umfang der Bodennutzung,
- die Aufnahme kontaminierten Wassers aus den Böden durch Pflanzen,
- der Verzehr von vor Ort erzeugten Nahrungsmitteln sowie
- die Freisetzung von Schadstoffen in die Atmosphäre.

Folgende standortspezifische Gegebenheiten sind von Bedeutung:

- Im Betrachtungsgebiet werden neben der zentralen Wasserversorgung auch lokale Brunnen genutzt, um den Wasserbedarf der Bevölkerung, d.h. Trink- und Tränkwasser, zu decken.
- Der Höhenzug der Asse ist bewaldet, und es wird Forstwirtschaft betrieben. Die Umgebung der Asse wird überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Da sich die Böden durch ein hohes natürliches Ertragspotenzial und hohe Ertragssicherheit auszeichnen, werden vornehmlich anspruchsvolle Früchte, wie z. B. Weizen und Zuckerrüben, angebaut. Aufgrund der klimatischen Bedingungen und Bodenverhältnisse besteht kein relevantes Wasserdefizit; die Ackerfrüchte und Weiden benötigen daher keine zusätzliche Bewässerung /GSF 2006i/. Dies steht im Einklang mit den gegenwärtigen landwirtschaftlichen Praktiken am Standort. Die Beregnung beschränkt sich auf sehr wenige Flächen für den Gemüse- und Obstanbau sowie auf den privaten Gartenbau; die landwirtschaftlich genutzten Äcker und Weideflächen werden nicht beregnet.
- Im Bereich der Asse gibt es nur kleinere Gewässer, wie Bäche und Teiche, die keinen Lebensraum für größere Fischpopulationen bilden und somit keinen kommerziellen Fischfang ermöglichen. Einige Teiche und Bäche werden jedoch von Anglervereinen zur Fischzucht genutzt. Das Wasser dieser kleinen Vorfluter um den Höhenzug Asse wird mit Wasser aus Nebenflüssen vermischt und durch die Niederschläge „verdünnt“, bevor es in die größeren fischreichen Flüsse Altenau und Oker gelangt.

Die in Abbildung 2.7-1 aufgezeigten Expositionspfade durch die Nutzung von kontaminiertem Wasser können am Standort eintreten – mit Ausnahme der Pfade, die auf Beregnung von landwirtschaftlichen Nutzflächen zurückzuführen sind. Die Beregnung von Gärten ist aber zu berücksichtigen. Die Expositionspfade werden bei der Erstellung des Biosphärenmodells für den Lösungspfad einbezogen (Kapitel 6.9).

Aus dem Grubengebäude freigesetztes Gas kann nach dem Aufstieg durch das Deckgebirge teilweise im Grundwasser gelöst werden sowie flächenhaft oder punktförmig über den Boden

in die Luft freigesetzt werden. In der Gasphase transportierte Schadstoffe können somit sowohl in oberflächennahe Wässer und darin gezüchtete Fische als auch über die Luft in Pflanzen und über pflanzliches Futter auch in Nutztiere gelangen. Auf diese Weise können Expositionspfade über pflanzliche und tierische Nahrungsmittel oder über die Atmung zur Strahlenexposition von Menschen führen. Diese Expositionspfade werden bei der Erstellung des Biosphärenmodells für den Gaspfad einbezogen (Kapitel 6.9).

3 Bewertungskriterien

Für die quantitative Bewertung der Langzeitsicherheit gibt es verschiedene Indikatoren. Sicherheitsindikatoren sind zum Beispiel die effektive Individualdosis, Toxizitätskonzentrationen im Grundwasser und die Senkung der Tagesoberfläche. Für einige Sicherheitsindikatoren sind in gesetzlichen Regelwerken Grenz- und Richtwerte genannt. Diese Grenz- und Richtwerte stellen damit Bewertungsmaßstäbe dar und beschreiben die Schutzziele quantitativ. An der Einhaltung der gesetzlich festgelegten Schutzziele wird die Langzeitsicherheit am Standort bewertet.

Indikatoren, für die es keine gesetzlich festgelegten Grenz- und Richtwerte gibt, sind Bewertungsgrößen, welche für Vergleiche von Rechnungen herangezogen werden und die beispielsweise Aussagen zur Rückhaltung von Schadstoffen ermöglichen. Zu dieser Gruppe gehören auch die Funktionsindikatoren.

3.1 Schutzziele

Die Schließung der Schachanlage Asse II wird gemäß Bundesberggesetz (§ 53 BBergG) beantragt. Dem zufolge ist für die Schließung ein Abschlussbetriebsplan einzureichen, der eine genaue Darstellung der technischen Durchführung der Schließungsmaßnahmen sowie Nachweise enthält, dass die in § 55 BBergG bezeichneten Zulassungsvoraussetzungen erfüllt werden. So wird die Einhaltung folgender Schutzziele für die Nachbetriebsphase eines Bergwerks gefordert:

- der Schutz der Oberfläche (§ 55, Abs. 1, Satz 5 BBergG) sowie
- der Schutz Dritter vor den durch den Betrieb verursachten Gefahren für Leben und Gesundheit auch nach Einstellung des Betriebes (§ 55, Abs. 2, Satz 1 BBergG).

Der Schutz der Oberfläche ist gewährleistet, wenn keine erheblichen Beeinträchtigungen der Vorflut, des Grundwassers, der Böden, geschützter Kulturgüter oder vergleichbarer Schutzgüter zu erwarten sind /UVP 1990/. Anforderungen an den Schutz des Wassers leiten sich aus dem Wasserhaushaltsgesetz (WHG § 34, Abs. 2) ab, nämlich die Vermeidung schädlicher Verunreinigungen oder sonstiger nachteiliger Veränderungen des Grundwassers /WHG 2005/. Bemessungsgrundlagen sind die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung /TWVO 2001/ sowie einzelne Prüfwerte, die in einschlägigen nationalen und internationalen Regelwerken spezifiziert werden /BUC 2006b/.

Aus den allgemein formulierten Vorsorgegeboten des BBergG (§ 55, Abs. 2) bzw. des Atomgesetzes (§ 1, Nr. 2) zum Schutz Dritter leitet sich das radiologische Schutzziel ab, das in den „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle“ /BMI 1983/ konkretisiert wird: Die Endlagerung der radioaktiven Abfälle in Bergwerken soll den Schutz von Mensch und Umwelt vor der Schädigung durch ionisierende Strahlung der Abfälle gewährleisten. Als Bewertungsmaßstab verweisen diese Sicherheitskriterien auf den Grenzwert von 0,3 mSv/a

gemäß § 45 der Strahlenschutzverordnung von 1976, welcher mit § 47 der heute aktuellen Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2002/ übereinstimmt.

Gegenwärtig werden die Sicherheitskriterien für Endlager von radioaktiven Abfällen entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik erneut diskutiert. Entsprechend dem derzeitigen Stand der Diskussion wird bei der Unsicherheitsanalyse das 90 %-Percentil der errechneten Strahlenexpositionen mit einem Vertrauensgrad von 90 % mit dem Wert von 0,3 mSv/a verglichen.

Auf internationaler Ebene wird, laut /ICRP 1998/, /ICRP 1999/, zur Bewertung der radiologischen Auswirkungen der Endlagerung radioaktiver Abfälle als Maßstab eine Individualdosis von 0,3 mSv/a oder ein entsprechendes Risikoäquivalent empfohlen. Die effektive jährliche Individualdosis ist für Angehörige einer kritischen Personengruppe, d. h. einer Gruppe von Personen in der Bevölkerung, die vermutlich der höchsten jährlichen Strahlenexposition ausgesetzt sein könnte sowie bezüglich des Alters und der Lebensgewohnheiten „relativ homogen“ zusammengesetzt ist, zu ermitteln.

Als praktische Umsetzung leitet sich das Schutzziel aus der Begrenzung der Lebensdosis ab. Da bei einer radioaktiven Kontamination in der Biosphäre diese über einen Zeitraum erfolgt, der wesentlich länger als die Lebenserwartung eines Menschen ist, bildet die effektive jährliche Individualdosis für eine erwachsene Person aus dieser kritischen Personengruppe einen geeigneten Bewertungsmaßstab für die Lebensdosis.

Die dem Sicherheitsnachweis für die Schließung der Schachanlage zu Grunde gelegten sicherheitstechnischen Anforderungen bzw. die beschriebenen Schutzziele entsprechen denen in einem bergrechtlichen und atomrechtlichen Verfahren und umfassen

- die Beschränkung der Senkungen der Tagesoberfläche,
- die Beschränkung der effektiven Individualdosis (radiologisches Schutzziel) sowie
- die Beschränkung der Verunreinigung des Grundwassers (wasserrechtliches Schutzziel).

3.2 Sicherheits- und Funktionsindikatoren

Zur integralen Bewertung der Langzeitsicherheit am Standort anhand von numerischen Rechnungen werden spezielle Größen verwendet, die aus den Berechnungen ermittelt und mit Bewertungsmaßstäben verglichen werden können. Solche Größen werden als Sicherheitsindikatoren bezeichnet. Ein wichtiger Sicherheitsindikator zur Beurteilung von Endlagern mit radioaktiven Abfällen ist die potenzielle jährliche Strahlenexposition (effektive jährliche Individualdosis; siehe Kapitel 3.1). Daneben werden weitere Indikatoren betrachtet, um das Vertrauen in die Aussagen aus den Langzeitsicherheitsanalysen zu erhöhen. In Kapitel 8 werden solche Indikatoren, wie die Veränderungen von Radionuklidkonzentrationen und Radiotoxizitäten, im Gesamtsystem diskutiert und die Ergebnisse für die Einschätzung der Sicherheit am Standort herangezogen.

Neben den Sicherheitsindikatoren gibt es Funktionsindikatoren, mit denen nicht die Sicherheit des Systems als Ganzes, sondern die Funktion von Barrieren oder das Verhalten von Teilsystemen beurteilt wird. Sie stellen Bewertungsgrößen dar, die nicht an absolute Bewertungsmaßstäbe gebunden sind. Die Barrierenfunktionen und/oder das Verhalten von Teilsystemen wurden mit mehreren Funktionsindikatoren untersucht, z.B. mit Flüssigkeits-, Gas-, Tracer- und Radionuklidflüssen im Grubengebäude und im Deckgebirge. In den Kapiteln 6 und 7 werden einige dieser Funktionsindikatoren diskutiert und für die Einschätzung der Barrierenfunktionen und/oder des Systemverhaltens herangezogen.

4 Sicherheits- und Schließungskonzept

Ein Ziel der Gesamtbewertung ist, die Eignung des Sicherheits- und Schließungskonzepts (Kapitel 4.1) für die Sicherstellung der Langzeitsicherheit aufzuzeigen. Die bereits abgeschlossenen und die erforderlichen technischen Maßnahmen dieses Konzepts beeinflussen die Anfangs- und Randbedingungen für die Systementwicklung in der Nachbetriebsphase. Deshalb werden die Grundelemente des Schließungskonzepts und die Anforderungen kurz erläutert und deren Notwendigkeit für die Einhaltung der Schutzziele begründet (Kapitel 4.2).

Eine mögliche zukünftige Entwicklung des Gesamtsystems am Standort ohne zusätzliche Maßnahmen wurde im Zuge der Herleitung des Schließungskonzepts für die Schachanlage Asse II skizziert /GSF 2006c/ und hinsichtlich der Konsequenzen für die Tragfähigkeit des Grubengebäudes untersucht /IfG 2006a/. Im Ergebnis ist festzustellen, dass

- ein trockener Einschluss der radioaktiven Abfälle (auch mit technischen Maßnahmen) nicht möglich ist,
- umfangreiche Umlösungen im Carnallitit durch zutretende Deckgebirgslösung den Erhalt der Resttragfähigkeit des Grubengebäudes gefährden und
- eine verlässliche Prognose der Entwicklung des Gesamtsystems nicht möglich ist.

Die einzige Alternative zu einer trockenen Verwahrung der Abfälle besteht in einer kontrollierten Nassverwahrung; die Einleitung eines Schutzfluids ist somit unverzichtbar. Hierfür gibt es umfangreiche Erfahrungen aus der Verwahrung von Kalibergwerken /BRE 2002a/.

4.1 Sicherheitskonzept

Um die Einhaltung der in Kapitel 3.1 genannten Schutzziele im Betrachtungszeitraum zu gewährleisten, wurde ein Sicherheitskonzept für die Schachanlage entwickelt /GSF 2006c/. Dieses geht vom Umstand aus, dass aufgrund der Standortbedingungen der vollständige (trockene) Einschluss der Abfälle nicht möglich ist. Das Sicherheitskonzept umfasst die folgenden, aus der Analyse der Standortbedingungen abgeleiteten Sicherheitsziele:

1. Stabilisierung des Tragsystems der Schachanlage Asse II,
2. Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus Abfallgebänden,
3. Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegungen im Grubengebäude,
4. Verzögerung des Radionuklidtransports im Grubengebäude,
5. Vermeidung von direkten Wegsamkeiten zwischen ELK und Deckgebirge sowie
6. Unterbinden eines Lösungsaustritts über die Tagesschächte.

Die Sicherheitsziele und die übergeordneten Schutzziele sollen mit der Realisierung eines Multibarrierensystems (MBS) erreicht bzw. eingehalten werden. Das Multibarrierensystem (MBS) am Standort Asse besteht aus den folgenden technischen und geologischen Barrieren sowie der Biosphäre (Abbildung 4.1-1):

- Abfallmatrix und Abfallbehälter, einschließlich verlorener Betonabschirmungen (VBA),
- technische Bauwerke und Versatz in den Einlagerungskammern,
- technische Bauwerke und Versatz im übrigen Grubengebäude,
- Steinsalz (Wirtsgestein),
- Deckgebirge.

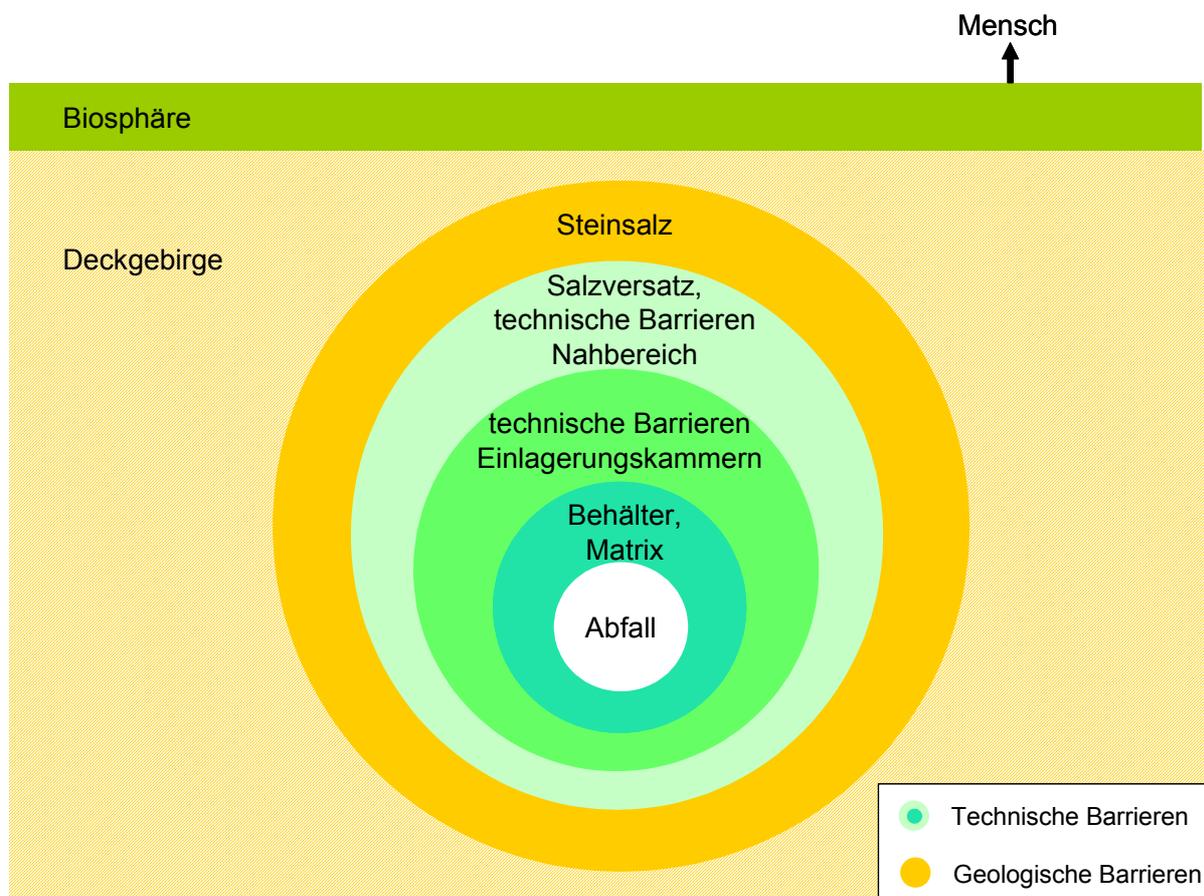


Abb. 4.1-1: Schematische Darstellung des Multibarrierensystems der Schachtanlage Asse

4.2 Schließungskonzept

Die Ableitung des geeigneten Schließungskonzeptes war ein iterativer Prozess, bei dem auf Grundlage der Sicherheitsziele zunächst denkbare technische Maßnahmen identifiziert und anschließend die Funktionalität der Maßnahmen bezüglich der Einhaltung der Schutzziele anhand von Modellrechnungen überprüft wurden. Im Zuge dieser Ableitung wurden verschiedene Möglichkeiten der Schließung untersucht. Hierbei haben sich die vorgesehenen

Schließungsmaßnahmen als ein erfolgversprechendes Konzept für die sichere Schließung der Schachtanlage herauskristallisiert /GSF 2006c/.

Gebirgsmechanische Modellrechnungen zeigen, dass die Resttragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes und die Anforderung eines degressiven Verlaufes der Verformungsraten im Wirtsgestein und im Deckgebirge nur durch Einleiten eines Schutzfluids und die Beaufschlagung eines pneumatischen Stützdrucks während der Einleitung von Schutzfluid oberhalb der 700-m-Sohle erreicht werden /IfG 2006a/, /IfG 2006b/.

Neben dem Erhalten der Resttragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes ergeben sich weitere Anforderungen aus den Sicherheitszielen. Die Grundelemente des Schließungskonzepts umfassen daher:

- das Einbringen eines Schutzfluids zur Vermeidung von Umlösungen am Carnallit, Sicherstellung der Langzeitwirksamkeit von technischen Bauwerken und Begrenzung der Konvergenz durch einen raschen Anstieg des Fluiddrucks im Grubengebäude,
- das Beaufschlagen der Grube mit einem pneumatischen Druck während des Einleitens von Schutzfluid oberhalb der 700-m-Sohle zum Erhalt der degressiven Verformungsraten im Tragsystem (vgl. Kapitel 2.3) ,
- das Einbringen von Mg-Depot in Einlagerungskammern und in ausgewählte Austrittspfade zur Begrenzung der Schadstoffmobilisierung und des Schadstofftransports,
- den Einbau von Strömungsbarrieren in ausgewählten Auffahrungen zur Behinderung und zur Lenkung von Lösungsbewegungen und zur Stabilisierung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern,
- das Verfüllen von Auffahrungen mit Schotter zur Lenkung von Lösungsbewegungen und zur Begrenzung von Druckdifferenzen,
- das Verfüllen der noch offenen Resthohlräume zur Verringerung des Hohlraumes, zur Verringerung der Konvergenz und dadurch zur Verlängerung der Transportzeit von Schadstoffen im Grubengebäude,
- den Verschluss der Tagesschächte durch den Einbau von Dichtelementen im intakten Steinsalz oberhalb der 490-m-Sohle zum Unterbinden eines Lösungsaustritts über die Tagesschächte.

Diese Grundelemente und weitere Maßnahmen für die Schließung der Schachtanlage sind ausführlich im Schließungskonzept /GSF 2006c/ beschrieben sowie – im Hinblick auf den Nachweis der Langzeitsicherheit – in der Szenarienentwicklung für das Gesamtsystem Asse /COL 2006a/ erläutert.

Die bereits abgeschlossenen Verfüllmaßnahmen (vgl. Kapitel 2.1) stehen im Einklang mit den Sicherheitszielen, denn durch diese werden sowohl das Tragsystem des Grubengebäudes stabilisiert als auch das konvergenzaktive Hohlraumvolumen deutlich reduziert.

4.2.1 Einleitung des Schutzfluids

Die Einleitung des Schutzfluids bildet die unabdingbare Voraussetzung für eine verlässliche Prognose zukünftiger Entwicklungen des Gesamtsystems und damit für die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises (vgl. Kapitel 2.3).

Die Grube soll vollständig mit Schutzfluid (Salzlösung) geflutet werden, dessen chemische Zusammensetzung weitgehend im Gleichgewicht mit den im Grubengebäude aufgeschlossenen Salzgesteinen steht. Dies verhindert, dass an $MgCl_2$ und an $MgSO_4$ deutlich untersättigte Salzlösung aus dem Deckgebirge in relevantem Ausmaß Zutritt und Umlösungen am anstehenden Carnallit großräumig stattfinden /ERC 2000/ /ERC 2005/. Darüber hinaus wird durch das Einleiten des Schutzfluids in der Nachbetriebsphase relativ schnell ein hydrostatischer Fluiddruck im Grubengebäude aufgebaut, der die fortschreitende Entfestigung im Tragsystem des Grubengebäudes, in der Steinsalz-Barriere und im Deckgebirge signifikant behindert /IfG 2006a/. Im Kontakt mit $MgCl_2$ -reichem Schutzfluid sind die für die geotechnischen Bauwerke zu verwendenden Baustoffe langzeitbeständig /INE 2002/, /BAF 2005b/. Dadurch gewährleistet das Schutzfluid die Funktionsfähigkeit des MBS. Es bestehen zusätzlich Forderungen an

- den Ablauf der Einleitung und
- die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids.

Der geplante zeitliche Ablauf der Einleitung, d.h. das Einleitregime, ist im Schutzfluidkonzept ausführlich beschrieben /PLA 2006b/. Grubenbereiche vom Grubentiefsten bis zur 700-m-Sohle werden sequenziell mit dem Schutzfluid aufgefüllt. Oberhalb der 700-m-Sohle besteht die Notwendigkeit einer vollständigen und schnellen Auffüllung des Grubengebäudes mit Schutzfluid bis in 490 m Teufe bei einem pneumatischen Stützdruck von 1,0 MPa bis 1,5 MPa, um zuerst durch den pneumatischen und danach durch den hydrostatischen Fluiddruck in der Grube die fortschreitende Entfestigung im Tragsystem und in den Deckgebirgsschichten – insbesondere im Bereich des Salzlösungszutritts – signifikant zu begrenzen /IfG 2006a/. Dadurch bleibt der degressive Trend der Verformungsraten auch in der Nachbetriebsphase bestehen (vgl. Kapitel 2.3), und eine deutliche Zunahme des Salzlösungszutritts ist nicht zu erwarten (vgl. Kapitel 2.6). Durch Beaufschlagung des Grubengebäudes mit einem pneumatischen Stützdruck werden zudem die Abfälle in der MAW-Kammer wahrscheinlich nicht mit Schutzfluid in Kontakt geraten /COL 2006e/.

Bei vollständiger Flutung mit Schutzfluid und Beaufschlagung eines pneumatischen Drucks während der Einleitung oberhalb der 700-m-Sohle wird eine langfristig stabile Entwicklung des Gesamtsystems mit einer harmonisch degressiven Konvergenz auf niedrigem Niveau erreicht, die die Verlässlichkeit der gebirgsmechanischen Langzeitprognose (Kapitel 7.2) erhöht und die Simulation des Konvergenzverhaltens für die Transportrechnungen erst ermöglicht.

Eine unvollständige Flutung mit Schutzfluid und dadurch eine Verzögerung des sich aufbauenden Fluiddrucks im Grubengebäude würde eine anfängliche Erhöhung der Konvergenz, dadurch einen schnelleren Transport von Schadstoffen und infolge dessen eine Zu-

nahme der anfangs in das Deckgebirge ausgepressten, kumulierten Radionuklidmenge bewirken.

Um Umlösungen am anstehenden Carnallit bzw. im Fremdversatz beim Kontakt mit dem Schutzfluid einzuschränken, bestehen Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids /PLA 2006b/. Das Schutzfluid soll im Mittel einer Lösung am invarianten Punkt IP19 bzw. R entsprechen, so dass dieses mit den anstehenden Salzgesteinen weitgehend im chemischen Gleichgewicht steht /ERC 2005/.

Eine mit abnehmender Teufe gleich bleibende oder sinkende Lösungsdichte wird in der gesamten Grube angestrebt. In diesem Fall sind sowohl durch Umlösungen hervorgerufene Entfestigungen des Carnallits als auch großräumige konvektive Lösungsbewegungen, die den Schadstofftransport beschleunigen würden, auszuschließen.

4.2.2 Einbau von technischen Strömungswiderständen

Durch technische Bauwerke und das Einbringen von Versatzstoffen sollen die Strömungswiderstände im Grubengebäude beeinflusst werden. Die Maßnahmen umfassen

- den Einbau von Strömungsbarrieren und stützendem Versatz aus Sorelbeton,
- den Einbau von Hartgesteinsschotter,
- die Verfüllung noch offener Auffahrungen⁸ und Bohrungen mit Sorelbeton sowie
- den Einbau von Schachtverschlüssen.

4.2.2.1 Strömungsbarrieren und Stützversatz

Die Strömungsbarrieren werden im Nahbereich der Einlagerungskammern von der 800-m- bis zur 700-m-Sohle und von der 532-m- bis zur 490-m-Sohle errichtet /GSF 2006f/. Für die bergsmechanische Stabilisierung des umgebenden Gesteins wird in angrenzende Grubenbereiche zudem stützender Versatz eingebracht. Dadurch sollen

- Lösungsbewegungen im Nahbereich der ELK begrenzt,
- Lösungsaustausch im Porenvolumen der ELK herabgesetzt und
- Lösungen aus tieferen oder benachbarten Grubenbereichen an den ELK vorbei gelenkt werden (vgl. Kapitel 4.1).

Durch die hohen Strömungswiderstände der Barrieren werden deutliche Kontraste zu hoch durchlässigen Wegsamkeiten geschaffen, wodurch sowohl die Strömungsmuster als auch die Transportpfade im Umfeld der ELK zuverlässig prognostiziert werden können und langfristig stabil sind.

Die Strömungswiderstände sind abhängig von der Länge, dem Fließquerschnitt und der Permeabilität. Fließquerschnitt und Permeabilität werden nicht nur vom technischen Bauwerk

⁸ Diese Verfüllungen haben keine spezifizierten hydraulischen Anforderungen.

sondern auch von der umgebenden Auflockerungszone im gebirgsmechanisch beanspruchten Salzgestein bestimmt, die vor dem Einbau entsprechend der Vorgabe einer spezifischen Auslegungsrechnung nachgeschnitten wird. Anforderungen bestehen an

- die integrale Permeabilität eines Einbauortes, einschließlich des umgebenden aufgelockerten Gesteins,
- die Lagestabilität der technischen Bauwerke und
- die chemische Langzeitstabilität der Baustoffe.

In /COL 2005e/ wurden hydraulische Anforderungen an die integrale Permeabilität der Einbauorte von Strömungsbarrieren und einzelner Einbauorte von stützendem Versatz im Nahbereich der ELK abgeleitet. Diese beschreiben Anfangs- und Rahmenbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis. Bei einer generell um etwa eine Größenordnung höheren integralen Permeabilität würden sich die Lösungsbewegungen und die Schadstoffausbreitung nicht in sicherheitsrelevanter Weise ändern /COL 2005e/. Bei einer noch höheren integralen Permeabilität aller Strömungsbarrieren und einzelner Einbauorte des Stützversatzes würde die aus der Grube gepresste, kumulierte Radionuklidmenge jedoch deutlich zunehmen.

Aufgrund der Konvergenz wird die Permeabilität in der Kontaktzone zwischen dem Bauwerk und dem Salinar sowie jene der Auflockerungszone in der späteren Nachbetriebsphase gegenüber den initialen Bedingungen abnehmen. Da gleichzeitig die Integrität der Bauwerke erhalten bleibt, wird die Wirksamkeit der Strömungsbarrieren mit der Zeit zunehmen. Dadurch werden die Einbauorte hydraulisch dichter; dies hat keine nachteiligen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit /COL 2005e/.

Die triaxiale Einspannung der Barrieren bzw. deren Lagestabilität wird durch beidseitige Widerlager langfristig sichergestellt. Der maximale Differenzdruck an den Bauwerken, welcher mit bis zu 2 MPa berechnet wird, tritt während des Einleitens von Schutzfluid auf und nimmt nach dem Ende der Betriebsphase rasch ab /COL 2005e/.

Für den Einbau von Strömungsbarrieren und von stützendem Versatz werden Sorelbeton oder Sorelmörtel eingesetzt. Diese Baustoffe sind im Kontakt mit $MgCl_2$ -reichen Lösungen langzeitbeständig /INE 2002/, /BAF 2005b/.

Die grundsätzliche technische Machbarkeit des Einbaus der technischen Bauwerke wurde erläutert und die technische Umsetzung des Einbaus einer Strömungsbarriere durch den Bau eines Prototyps demonstriert /PLA 2005b/. Für die Einbauorte wird die Erfüllung der Anforderung im Rahmen der Auslegungsplanungen überprüft und ein Funktionsnachweis im Zusammenhang mit der Errichtung des Bauwerkes geführt.

4.2.2.2 Schotterstrecken

Ausgewählte Auffahrungen zwischen der 800-m- und 700-m-Sohle werden mit einem sehr gering kompaktierbaren (steifen), hoch durchlässigen Schotter verfüllt /GSF 2006f/. Dadurch wird

- die Funktion der Strömungsbarrieren unterstützt und
- der Fluiddruck unterhalb 700 m Teufe stabil entlastet.

Durch die Maßnahme werden die Kontraste zwischen hohen Strömungswiderständen der Strömungsbarrieren und geringen Widerständen hoch durchlässiger Wegsamkeiten verstärkt, wodurch sowohl die Strömungsmuster als auch die bevorzugten Transportpfade langfristig stabilisiert werden.

Der Erwartungswert für die integrale Durchlässigkeit liegt etwa eine Größenordnung höher als die von Salzgrus bei einer Porosität von ca. 35 % und beschreibt hydraulische Anfangs- und Randbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis (Kapitel 7.5). Eine Zunahme des Strömungswiderstandes mit der Zeit durch Einkriechen von Salz in den Porenraum des Schotters oder durch Kristallisationsprozesse gefährdet die Funktion dieser Maßnahme nicht /ALSA 2005a/. Die schnelle und stabile Druckentlastung in den Grubenbauen unterhalb 700 m Teufe fördert die Abnahme von Druckdifferenzen zwischen benachbarten Grubenbereichen bzw. an den Strömungsbarrieren. Eine gezielte Entlastung erfolgt für den Tiefenausschluss, das Baufeld im Sattelnern und das Carnallitbaufeld zum Baufeld in der Südflanke auf der 700-m-Sohle hin.

Für den Einbau werden Schotter eingesetzt, die im Kontakt mit $MgCl_2$ -reichen Lösungen langzeitbeständig sind. Magnesit ist besonders geeignet /TUC 2006a/.

4.2.2.3 Verfüllung offener Grubenbaue

Im Grubengebäude gibt es noch offene Auffahrungen, die nicht von den bisher genannten Maßnahmen betroffen sind, aufgrund des Rahmenbetriebsplans jedoch verfüllt werden müssen. Die Nachverfüllung erfolgt mit Sorelbeton, um Grubenbaue zu stabilisieren, konvergenzaktive Volumina zu verringern und Lösungsbewegungen zu behindern – spezifizierte hydraulische Anforderungen bestehen jedoch nicht (Kapitel 4.1). Im Bereich der 511-m-Sohle ist eine fortschreitende Desintegration der Steinsalz-Barriere durch anhaltende Deformation zu besorgen /IfG 2006a/. Eine erhöhte Stützwirkung durch Nachverfüllung der 490-m- und 511-m-Sohle mit Sorelbeton ist daher sicherheitsgerichtet (vgl. Kapitel 2.3).

Auffahrungen, die die Lösungsbewegung vertikal kanalisieren können, wie Blindschächte und die Wendelstrecke, werden mit Sorelbeton verfüllt. Eine solche Verfüllung – auch wenn sie ohne hohe Anforderungen ausgeführt wird – erhöht lokal den Strömungswiderstand und schließt dadurch eine starke Kanalisierung des Lösungs- und Schadstofftransports in diesen Grubenbauen aus. Starke vertikale Kanalisierungen über lange Distanzen, insbesondere im Baufeld in der Südflanke, würden die Transportzeit in der Grube deutlich verringern und die in das Deckgebirge ausgepresste Menge relativ kurzlebiger Radionuklide deutlich erhöhen (Kapitel 7.5).

4.2.2.4 Verfüllung von Bohrungen

Alle Bohrungen, die für technische Maßnahmen verwendet werden oder worden sind, werden mit Sorelbeton oder Sorelmörtel hinreichend dicht verpresst. Dies bedeutet, dass die Dichtheit der Bohrungen in ausreichender Näherung dem umgebenden Gestein entspricht.

4.2.2.5 Schachtverschlüsse

Das Verschließen der Schächte verhindert den Austritt von relevanten Mengen an Lösung und Schadstoffen über diese Wegsamkeiten in das Deckgebirge (vgl. Kapitel 4.1) und stellt die Wirkung der Steinsalz-Barriere wieder her (vgl. Kapitel 2.2).

Die Schächte Asse 2 und Asse 4 werden mit Sorelbeton verfüllt und oberhalb der 490-m-Sohle durch den Einbau von Dichtelementen im Steinsalz dicht verschlossen /DBE 2006b/. Darüber wird Schotter eingebracht und eine weitgehend gesättigte Salzlösung eingestapelt. Das Konzept berücksichtigt die Erfahrungen des *in situ*-Großversuchs zum Bau und zur Funktionsfähigkeit von flüssigkeitsdichten Schachtverschlüssen im Bergwerk Salzdettfurth /BRE 2002b/, /SITZ 2004/. Es bestehen Anforderungen an

- die integrale Permeabilität eines Einbauortes, einschließlich des umgebenden aufgelockerten Gesteins,
- die Lagestabilität der technischen Bauwerke und
- die chemische Langzeitstabilität der Baustoffe.

Strömungsmodellierungen zeigen, dass der Austritt von Lösung und Gas aus der Grube über die Tagesschächte vernachlässigbar gering ist, sofern die Schachtverschlüsse eine integrale Permeabilität von mindestens $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ aufweisen und deren Gaseindringdruck mindestens 600 kPa beträgt /ALSA 2005a/.

Die Anforderungen an die Einbauorte entsprechen den genannten Werten und beschreiben Anfangs- und Rahmenbedingungen für den Langzeitsicherheitsnachweis. Bei einer generell um eine Größenordnung höheren integralen Permeabilität würden sich die Lösungsbewegungen und die Schadstoffausbreitung in Lösung nicht in sicherheitsrelevanter Weise ändern /ALSA 2005a/. Die Erfüllung der Anforderungen wird im Rahmen der Auslegungsplanung geprüft und ein Funktionsnachweis nach der Errichtung der Bauwerke geführt.

Die Lagestabilität der Dichtelemente wird durch Widerlager und die darüber eingestapelte Lösungssäule sichergestellt. Das Konzept ist geeignet, die berechnete maximale Druckdifferenz am Bauwerk von etwa 2 MPa abzutragen. Nach etwa 200 Jahren nehmen der Lösungsdruck in der Grube und die Druckdifferenz allmählich wieder ab (Kapitel 6.7 und 7.5).

Für die Füllsäulen werden Sorelbeton und Sorelmörtel, für die Dichtelemente zusätzlich auch Bentonit, Salzion und Straßenbaubitumen eingesetzt /DBE 2006b/. Diese Baustoffe sind im liegenden Kontakt mit MgCl_2 -reicher Lösung und im hangenden Kontakt mit NaCl -reicher Lösung langzeitbeständig /BAF 2005a/.

Die grundsätzliche technische Machbarkeit des Konzepts wurde erläutert /DBE 2006b/ und die anforderungsgerechte technische Umsetzung für den Einbau der Dichtelemente durch den Großversuch im Bergwerk Salzdettfurth demonstriert /BRE 2002b/, /SITZ 2004/. Das Konzept enthält eine Beschreibung der Einbauorte und der Bauwerke.

Die frühzeitige Wirksamkeit der Schachtverschlüsse kann im Rahmen der pneumatischen Druckbeaufschlagung (vgl. Kapitel 4.2.1) gezeigt werden.

4.2.3 Einbau von Magnesium-Depot

In einigen ELK liegen noch größere unverfüllte Resthohlräume vor /GSF 2006k/. Durch die Verfüllung mit Mg-Depot werden sowohl das geochemische Milieu günstig beeinflusst und die Mobilisierung von Schadstoffen deutlich begrenzt als auch die Einlagerungsbereiche bergsmechanisch stabilisiert und die Hohlraumkonvergenz behindert (vgl. Kapitel 4.1).

Modellrechnungen und Laboruntersuchungen zeigen, wie die Konzentrationen der für den Langzeitsicherheitsnachweis wichtigen Elemente Americium, Plutonium und Uran vom geochemischen Milieu, insbesondere vom pH-Wert in Lösung, abhängen /INE 2005a/: im stark sauren Milieu steigen die Löslichkeiten gegenüber schwach alkalischen Milieubedingungen deutlich an /INE 2005b/. Die Pufferung des pH-Wertes im günstigen Bereich von pH 7 bis 9 und die Begrenzung der Konzentration von Plutonium wurde sowohl für Brucit (Magnesium-Hydroxid) als auch für dessen Umwandlungsprodukte, die Sorelphasen (Magnesium-Oxychlorid), durch Modellrechnungen und Laborversuche nachgewiesen /INE 2003b/, /INE 2004a/.

Als Versatzstoffe werden Brucit-Granulat sowie Brucit-Pulver als Suspension im Schutzfluid eingesetzt. Brucit-Granulat wird in unverfüllte Resthohlräume eingebracht; Schutzfluid mit Brucit in Suspension wird in sämtliche Abbaue der 775-m- bis einschließlich der 700-m-Sohle eingefüllt.

Mit geochemischen Modellrechnungen wurde gezeigt, dass sich bei vollständiger Verfüllung der unverfüllten Resthohlräume in den ELK mit Mg-Depot in den ELK ein günstiges schwach alkalisches bis alkalisches Milieu einstellt /INE 2006a/. Eine Ausnahme stellt die ELK 2/750Na2 dar, in der – bei ungünstigen Annahmen – der pH-Wert auf einen schwach sauren Wert absinken kann. Deshalb wird in die Austrittspfade dieser ELK zusätzlich Mg-Depot eingebracht. Die Anordnung dieser Einbauorte von Mg-Depot ist in /GSF 2006e/ dargestellt. Die generellen Anforderungen sind

- eine hinreichende Menge Mg-Depot,
- eine hinreichende Kontaktfläche des Mg-Depots und hinreichende Verweilzeit der Lösung im Kontakt mit Mg-Depot sowie
- eine gute Durchströmbarkeit des Mg-Depots – vor allem in den Austrittspfaden.

Die Mengen an Mg-Depot werden anhand des „verfügbaren anorganischen Kohlenstoffs“ (vgl. /IST 2005a/) berechnet. Die unterstellten Mengen an Brucit genügen, um diesen als Carbonat quantitativ auszufällen – ausgenommen die ELK 2/750Na2 /INE 2006a/.

Ein hinreichender Kontakt des Mg-Depots mit der Lösung ist einerseits durch die sehr hohe spezifische Oberfläche der Versatzstoffe gewährleistet. Andererseits sind die Verweilzeiten der Lösungen im Kontakt mit Mg-Depot um ein Vielfaches höher als die Zeiten für die Umsetzung der wichtigen reaktiven Versatzstoffe Zement und Brucit /INE 2006b/. Die Durchströmbarkeit des Brucit-Granulats ist langfristig gewährleistet, da unter den veranschlagten Bedingungen für die technische Einbringung das Brucit-Granulat langfristig eine hohe Durchlässigkeit, die mit Salzgrus vergleichbar ist, aufweist /IfG 2005d/, /GSF 2006e/.

Die eingebrachten Mengen werden im Rahmen der Ausführung ermittelt, mit den angenommenen Mengen verglichen und ein Funktionsnachweis geführt.

Die Mg-Depots dienen nicht nur der Beeinflussung des geochemischen Milieus in den ELK, sondern auch der langzeitigen Stabilisierung des Milieus im schwach alkalischen Bereich (Kapitel 6.1). Unter Berücksichtigung des langzeitstabilen Milieus werden die Quellterme für Radionuklide, für chemische und chemotoxische Stoffe (Kapitel 6.2) sowie die Gasbildung (Kapitel 6.3) ermittelt.

In den ELK 4/750, 6/750, 7/750, 11/750 und in der MAW-Kammer ist eine Versauerung auch ohne Einbringen von Mg-Depot auszuschließen /INE 2005b/.

4.2.4 Verfüllung der MAW-Kammer

In der MAW-Kammer sind etwa 95 % des Ausbruchvolumens noch unverfüllt /GSF 2006k/. Die Abfallgebände liegen in Form eines Schüttkegels in der Mitte der ELK und haben keinen Kontakt zu einem der Kammerstöße. Die Resthohlräume werden vollständig mit Sorelbeton in Form einer Sorelbetonglocke über den Abfallgebänden verfüllt. Dadurch werden die Kammer gebirgsmechanisch stabilisiert, das konvergenzaktive Volumen verringert und das fluidzugängliche Volumen der ELK um ein Vielfaches reduziert. Die Abfallgebände werden vor der Auffüllung mit Sorelbeton mit einer Schicht Brucit-Granulat abgedeckt. Die Schicht hat die Aufgabe, das Eindringen von Sorelbeton in die Zwickelräume zu verhindern, um definierte Randbedingungen für die geochemische Modellierung zu behalten.

Die Sorelbetonglocke als Folge einer sachgemäßen technischen Verfüllung ist in Abbildung 4.2-1 skizziert. Aufgrund der Sorelbetonglocke beschränkt sich das fluidzugängliche Volumen in der MAW-Kammer auf die Zwickelhohlräume und ist bezogen auf das Anfangskammervolumen sehr gering. Die Verfüllung der Grubenbaue im Bereich der MAW-Kammer wird in Kapitel 6.6 ausführlich dargelegt.

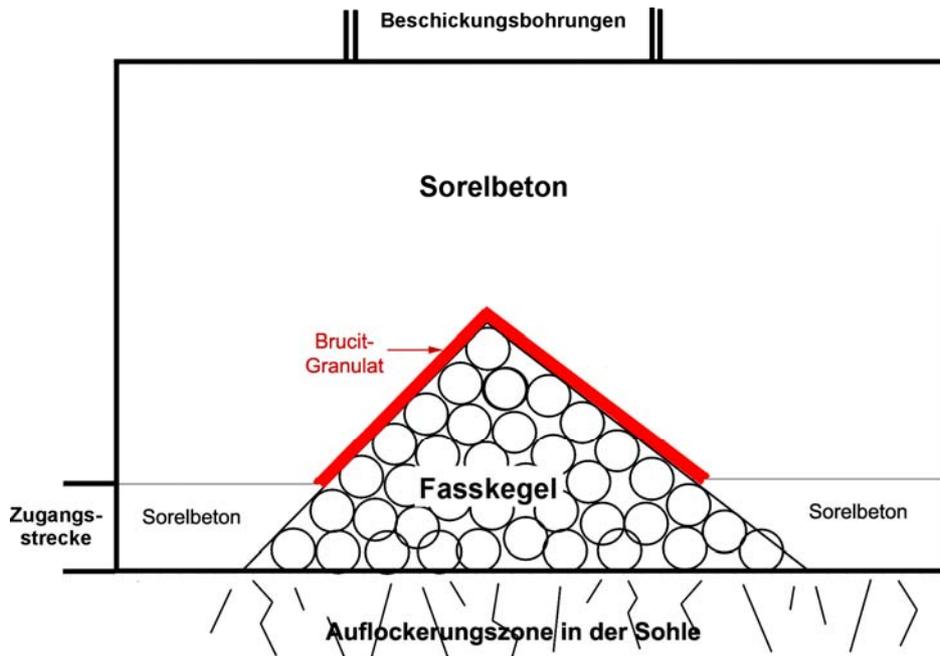


Abb. 4.2-1: Schematische Darstellung der Einlagerung und Verfüllung in der MAW-Kammer

In die MAW-Kammer sowie in die darunter liegenden Kammern 8a/532 und 8b/532 wird kein Schutzfluid gezielt in den Porenraum eingeleitet. Strömungsmodellierungen zeigen, dass durch die Sorelbetonglocke und die Beaufschlagung des pneumatischen Stützdruckes von 1,0 bis 1,5 MPa das Vordringen von Schutzfluid in den Nahbereich verzögert wird und in der Folge ein Kontakt der Abfälle mit dem Schutzfluid in der Nachbetriebsphase unwahrscheinlich ist /COL 2006e/.

4.3 Schlussfolgerungen

Die Notwendigkeit der o.g. Grundelemente des Schließungskonzepts für den Nachweis der Langzeitsicherheit wurde dargestellt. Optionen beschränken sich auf die Auslegung der technischen Bauwerke, auf zeitliche und technische Abläufe sowie – in Einzelfällen – auf veranschlagte Baustoffe; jedoch bestehen auch hier enge Grenzen.

Die grundsätzliche technische Machbarkeit der Grundelemente und weiterer zusätzlicher Maßnahmen ist nachgewiesen (vgl. Quellenverzeichnis in /GSF 2006c/). Die aus den Anforderungen abgeleiteten Parameter sind von spezifischen und sich zeitlich verändernden Gegebenheiten eines Einbauortes abhängig, die bei der technischen Ausführung berücksichtigt werden. Für jedes technische Bauwerk wird ein Funktionsnachweis geführt.

Der Nachweis der Langzeitsicherheit wird für das Schließungskonzept /GSF 2006c/ unter Berücksichtigung der Anforderungen an die technischen Maßnahmen, einschließlich der Bandbreiten, geführt. Störfälle in der Betriebsphase werden nicht einbezogen.

5 Geowissenschaftliche Langzeitprognose und Szenarien

5.1 Geowissenschaftliche Langzeitprognose

Die geowissenschaftliche Langzeitprognose beschreibt die möglichen Einflüsse geogener Ereignisse und Prozesse auf die Entwicklung des Gesamtsystems Asse. Trotz der Bezeichnung „Prognose“ wird jedoch nicht der Anspruch erhoben, die Zukunft vorherzusagen. Es werden vielmehr die möglichen alternativen Entwicklungen dargelegt und qualitative Aussagen zur Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens gemacht. Von besonderer Bedeutung ist dabei, dass gewisse Entwicklungen mit Sicherheit oder mit derart hoher Zuverlässigkeit ausgeschlossen werden können, dass ihr Eintreten beim Nachweis der Langzeitsicherheit nicht zu unterstellen ist. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose ist eine der Grundlagen für die Szenarienentwicklung (vgl. Kapitel 5.2). Die Grundlagen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose und die Ergebnisse sind umfassend in /COL 2005b/ dargelegt; hier erfolgt eine Übersicht sicherheitsrelevanter Aspekte.

Basis der geowissenschaftlichen Langzeitprognose ist die Analyse der geologischen Vergangenheit am Standort, um – unter Berücksichtigung der vorgesehenen Schließungsmaßnahmen (vgl. Kapitel 4.2) – die möglichen künftigen Einflüsse auf die Entwicklung des Systems in der Nachbetriebsphase abzuleiten. Die folgenden Ereignisse und Prozesse können sich grundsätzlich in sicherheitsrelevanter Weise auf die Systementwicklung auswirken:

- klimatische Entwicklungen, wie z. B. Eiszeiten,
- langsame klimaunabhängige Prozesse, wie z. B. salzkinetische Hebungen,
- schnelle klimaunabhängige Ereignisse, wie z. B. Erdbeben und
- Einwirkungen durch das Grubengebäude, wie z. B. Hohlraumkonvergenz.

Diese Entwicklungen, Prozesse und Ereignisse beeinflussen wichtige Prozesse in der Geosphäre, insbesondere Oberflächenerosion, Bewegung des Grundwassers, Subrosion sowie gebirgsmechanische Bewegungen und Spannungsänderungen.

Die Ergebnisse der geowissenschaftlichen Langzeitprognose /COL 2005b/ werden zunächst für einen Zeithorizont von 150 000 Jahren dargelegt. Die typische Wiederkehrperiode von Kaltzeiten beträgt rund 100 000 Jahre. Die Darstellung der möglichen Entwicklungen über eine Zeitperiode, die mehrere Kaltzeiten abdecken kann, ist bei starken Auswirkungen einer einzelnen Kaltzeit sehr komplex. Aus diesem Grund wird für die Darstellung der geowissenschaftlichen Langzeitprognosen und ihrer Begründung zunächst ein Zeithorizont von 150 000 Jahren gewählt. Die sich ergebenden, relativ beschränkten möglichen Auswirkungen am Standort Asse über diese Zeitperiode erlauben anschließend eine gewisse Extrapolation auf längere Zeitperioden von etwa 1 Mio. Jahre. Der Zeithorizont von 150 000 Jahren für die systematische geowissenschaftliche Langzeitprognose ist ausreichend, da die Radiotoxizität des Abfallinventars während dieser Zeit deutlich abnimmt und zu späteren Zeiten durch die extrem langlebigen Radionuklide ^{238}U , ^{232}Th und deren Folgeprodukte dominiert wird, wobei

Uran- und Thorium-Isotope sehr wirksam durch Löslichkeits- und Sorptionseffekte zurückgehalten werden.

5.1.1 Mögliche Entwicklungen in den nächsten 150 000 Jahren

Zusammenfassend wirken sich die möglichen Entwicklungen am Standort Asse in der folgenden Weise aus /COL 2005b/:

Salzkinetik und differentielle Hebungen/Senkungen

Die Analyse der Entwicklung der Salzstruktur Asse-Heeseberg zeigt, dass die salzkinetischen Bewegungen bis auf minimale Beträge abgeklungen sind. Das Reservoir für Salzzuflüsse aus den nördlich und südlich angrenzenden Mulden in die Salzstruktur und damit das Potenzial für anhaltende Salzkinetik sind gering. Es ist sogar möglich, dass die Schachanlage Asse II in einer Zone liegt, die sich aufgrund strukturparalleler Salzbewegung senkt.

Die Auswirkungen von differentiellen Hebungen und Senkungen auf den Standort über die Betrachtungsperiode von 150 000 Jahren werden als vernachlässigbar angesehen. Ein Potential für eine Beschleunigung der relativen Hebung der Asse gegenüber dem Vorland besteht nicht.

Regionale Hebungen

Die regionale Hebungsrate ist sehr gering. Zudem kann sich eine regionale Hebung nur sehr langfristig, über die regionale Erosion, auf die Systementwicklung am Standort Asse auswirken. Sie ist somit für die Langzeitsicherheit nicht relevant.

Klimatische Entwicklung

Die künftige Klimaentwicklung beeinflusst verschiedene langzeitsicherheitsrelevante Standortbedingungen und Prozesse, wie die gebirgsmechanischen und hydrogeologischen Verhältnisse, die Erosion und die Subrosion. In Anlehnung an Untersuchungen zur möglichen Klimaentwicklung für den Standort Morsleben und dadurch gestützt auf Prognoserechnungen für die globale Klimaentwicklung durch Dritte ergibt sich folgendes „Drehbuch“ für die Klimaentwicklung am Standort Asse in den kommenden rund 150 000 Jahren /COL 2005b/:

Innerhalb der kommenden 150 000 Jahre wird eine Kaltzeit vom Typ der Weichsel-Eiszeit, d.h. ohne Eisüberfahrung bzw. Vergletscherung des Standorts, eintreten. Nach intermittierenden Abkühlungen zu borealen bis periglazialen Verhältnissen (mit eventuell diskontinuierlichem Permafrost) folgen nach dem „Drehbuch“ von 95 000 bis 115 000 Jahren und von 140 000 bis 160 000 Jahren Kaltzeiten mit kontinuierlichem Permafrost, die von einem wärmeren Interstadial unterbrochen werden. Bei dieser Entwicklung werden sich die Grundwasserbewegung und die Subrosion verringern, die Erosion dagegen etwas verstärken.

Die Möglichkeit einer Vergletscherung des Standortes während der nächsten Kaltzeit kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Bei der weniger wahrscheinlichen Klimaentwicklung vom Typ der Saale-Eiszeit mit Eisüberfahrung des Standortes ist mit folgenden Auswirkun-

gen zu rechnen: Die Erosion wird sich erheblich verstärken, wobei allerdings nicht mit einer Tieferlegung der Felsrinnen der wesentlichen Quertäler gerechnet wird. Die Grundwasserneubildung, der Grundwasserfluss und die Subrosion dürften ebenfalls deutlich ansteigen. Durch die erhöhte Auflast durch den Gletscher und den eventuell erst verzögert ansteigenden Wasserdruck an der Gletscherbasis kann die effektive Gebirgsspannung im Deckgebirge und damit auch in der Salzstruktur vorübergehend erheblich ansteigen und dadurch die Konvergenz des Grubengebäudes nochmals reaktivieren (siehe Kapitel 5.2.2). Die Schicht des Permafrosts im Deckgebirge dürfte während der kältesten Phasen vor der Eisüberfahung eine Mächtigkeit im Bereich von 100 m bis 200 m aufweisen und damit nicht bis zur Salzstruktur reichen, umso mehr, als die thermische Leitfähigkeit von Salz höher als jene des Deckgebirges ist. Unter der Eisüberdeckung wird sich die Permafrostschicht zurückbilden.

Bei anderen möglichen Klimaentwicklungen sind keine signifikant ungünstigeren Auswirkungen auf das System Asse als bei den beiden aufgeführten Klimaentwicklungen zu erwarten.

Erosion

Die differentielle Erosion und die regionale Erosion sind sehr gering. Die erstere wird aufgrund der sich verflachenden Geländemorphologie (s.u.) weiter abnehmen. Die regionale Erosion wird sich wegen der geringen regionalen Hebungsrate und der stabilen Verhältnisse im Unterlauf der Vorfluter auch künftig nicht erhöhen. Zeitlich begrenzte Phasen mit stärkerer Erosion, allerdings mit kumuliert mäßigen Auswirkungen, sind während zukünftiger Kaltzeiten (s.o.) zu unterstellen.

Subrosion

Die Subrosion der Salzstruktur Asse betrifft die Salzbarriere und somit eine wichtige Komponente des Multibarrierensystems. Die Subrosionsprognose ist daher von großer langzeitsicherheitsbedeutender Bedeutung. Methodisch basiert die Prognose auf der Morphologie des Asse-Sattels und der Mächtigkeit des Hutgesteins.

Im Zentralteil des Assehöhenzuges findet zwischen dem Schacht Asse 1 und Groß Denkte zur Zeit eine intensive Subrosion statt, welche vermutlich anthropogen beeinflusst ist und sich geologisch kurzfristig wieder deutlich zurückbilden wird. Insgesamt wird der Subrosionsbetrag hier während der kommenden 150 000 Jahre maximal 100 m erreichen, der Salzspiegel also nicht unter die Tiefe von -150 mNN absinken.

Östlich dieser Zone mit intensiver Subrosion, insbesondere im Gebiet der Schachanlage Asse II, ist die Subrosionsrate deutlich niedriger: Ein Absinken des Salzspiegels während 150 000 Jahren ist im Bereich der Schachanlage Asse II um bis zu 45 m, östlich der Störung Groß Vahlberg um bis zu 30 m plausibel. Eine Ausdehnung der Zone mit intensiver Subrosion nach Osten bis in den Bereich der Schachanlage Asse II innerhalb der kommenden 150 000 Jahre ist möglich, allerdings nicht sehr wahrscheinlich. Damit kann auch im Bereich von Asse II der Salzspiegel bis -150 mNN absinken. Selbst in diesem Fall bleibt jedoch zwischen dem Salzspiegel und den obersten Grubenbauen der Schachanlage noch eine Salzbarriere von über 100 m Mächtigkeit /COL 2006a/.

An der Südflanke der Salzstruktur ist die Subrosion vermutlich räumlich inhomogen und auf die Verschneidungen von Strukturflanke und Störungen konzentriert. Sie kann im räumlichen Mittel während der kommenden 150 000 Jahre mehrere Meter betragen. An der Asse-Nordflanke ist die Subrosion sehr gering.

Als Folge der Subrosion am Salzspiegel wird das verstürzte Deckgebirge kontinuierlich nachsacken, wodurch in Verbindung mit lokaler Erosion die Höhendifferenz zwischen dem lokalen Infiltrationsgebiet des Assehöhenzuges und den Vorflutern abnehmen und die lokalen Fließsysteme im Deckgebirge entsprechend verlangsamen. Die zunehmende Teufe des Salzspiegels in Bezug auf die Vorfluter verstärkt zusätzlich den Rückgang der Subrosion.

Erdbeben

Das Gebiet der Asse und deren Umgebung sind seismisch wenig aktiv. Das größte bekannte Erdbeben in einem Umkreis von 50 km ist jenes bei Magdeburg im Jahre 1409 mit $I_0 = VI$ MSK. Die Intensitäten der historischen Erdbeben am Standort lagen unter der Intensität V. Beim Auftreten des Bemessungserdbebens, für das die Intensität $VI\frac{1}{2}$ MSK angenommen wird (vgl. Kapitel 2.4), sind weder eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Grubengebäudes noch weitere bruchhafte Verformungen im Salz- und Deckgebirge, verbunden mit einem Ansteigen der hydraulischen Durchlässigkeiten von Bruchflächen, im relevanten Ausmaß zu erwarten (siehe Kapitel 6.5.3).

Vulkanismus und Meteoriteneinschlag

Nach dem Oberkreide-Vulkanismus vor 100 Mio. Jahren /WRAY 1995/, /ZIM 1989/ wurden im Untersuchungsraum in jüngeren Formationen keine Hinweise auf Vulkanismus beobachtet. Somit sind auch in den folgenden 150 000 Jahren keine derartigen Ereignisse zu unterstellen.

Angesichts der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit eines Meteoriteneinschlags mit Auswirkungen bis in große Teufen und der verheerenden nichtnuklearen Folgen eines derartigen Ereignisses wird dieses Szenario bei der Beurteilung der Langzeitsicherheit nicht unterstellt.

5.1.2 Beurteilung über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren

Ausgehend von den relativ beschränkten möglichen Veränderungen des Systems Asse in den kommenden 150 000 Jahren wurde – trotz der damit verbundenen, zunehmenden Ungewissheiten – auch eine Abschätzung der möglichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahren durchgeführt /COL 2005b/.

Die Extrapolation der Raten von differentieller und regionaler Hebung, differentieller und regionaler Erosion sowie Subrosion am Salzspiegel führen für eine Zeitperiode von 1 Mio. Jahre zu folgenden Schlussfolgerungen:

Die Freilegung der Schachtanlage an der Geländeoberfläche ist ausgeschlossen.

Das Absinken des Salzspiegels bis zu den obersten Sohlen der Schachanlage Asse II ist wenig wahrscheinlich, kann jedoch nicht völlig ausgeschlossen werden.

Die Höhendifferenz zwischen dem Asse-Höhenzug und den Vorflutern wird weiter abnehmen. Die während des Betrachtungszeitraums von 150 000 Jahren zu erwartende signifikante Verlangsamung der Wasserflüsse im Deckgebirge der Asse sowie jene zwischen dem verstürzten Deckgebirge und dem Vorland wird fortschreiten, außer bei Eiszeiten mit Eisüberföhrung oder im Zusammenhang mit sehr langfristig wirkenden Hebungsprozessen.

Die Erkenntnisse der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden bei der Entwicklung der Szenarien für das Systemverhalten am Standort Asse in der Nachbetriebsphase einbezogen (siehe Kapitel 5.2).

5.2 Szenarientwicklung

5.2.1 Zielsetzung und Vorgehen

Die Szenarientwicklung bildet einen wesentlichen Bestandteil des Langzeitsicherheitsnachweises: Sie umfasst die Identifikation der erkannten und möglichen Sachverhalte, Ereignisse, Prozesse sowie der künftigen möglichen Entwicklungen des Systems, die zu einer Freisetzung von Schadstoffen aus den eingelagerten Abfällen bis in die Biosphäre oder zu einer gebirgsmechanischen Beeinträchtigung der Tagesoberfläche föhren können. Sie beschreibt insbesondere die Wirkungsweise der Schließungsmaßnahmen, der technischen und natürlichen Barrieren sowie die sonstigen Verhältnisse am Standort und deren mögliche künftige Entwicklungen. Nicht zuletzt identifiziert sie die potentiellen Ausbreitungspfade von Schadstoffen von den Abfallgebänden bis in die Biosphäre. Sie stellt eine wichtige Grundlage dar für die interne und externe Kommunikation zur Langzeitsicherheit, für die Entwicklung des Sicherheitskonzeptes, für den quantitativen Nachweis der Langzeitsicherheit und für die Identifikation und Ermittlung der sicherheitsrelevanten Daten.

Ziel der Szenarientwicklung ist es deshalb, auf der Grundlage der Standortcharakterisierung (Zustand nach Umsetzen der Schließungsmaßnahmen), der geowissenschaftlichen Langzeitprognose und der Langzeitprognose für die technischen Barrieren systematisch und nachvollziehbar einen Satz von ausgewählten Szenarien zu entwickeln, deren Konsequenzen die Konsequenzen aller in den Grenzen praktischer Vernunft denkbaren künftigen Entwicklungen des Systems abdecken. Ein Szenario ist dabei die drehbuchartige Beschreibung einer möglichen Systementwicklung. Szenarien, bei denen sich das System qualitativ ähnlich entwickelt und insbesondere das Multibarrierensystem (vgl. Kapitel 4.1) qualitativ gleich wirkt, werden zu Szenariengruppen zusammengefasst. Das Referenzszenario ist das repräsentative Szenario der Szenariengruppe, deren Eintretenswahrscheinlichkeit am höchsten ist.

Es liegt in der Natur des vorliegenden Sicherheitsnachweises, dass die gewählten Szenarien durchwegs zu einer Freisetzung von Schadstoffen in die Biosphäre föhren und auf mehr oder weniger ungünstigen Annahmen beruhen. Für eine einfache und nachvollziehbare Nachweisföhrung werden die Szenarien zudem so gewählt, dass mit einer möglichst geringen

Anzahl Szenarien die Forderung nach Vollständigkeit erfüllt wird. Unter allen möglichen Zuständen und Entwicklungen des Systems beschreiben die Szenarien eines Langzeitsicherheitsnachweises, auch das Referenzszenario, deshalb selektiv ungünstige Verhältnisse und zeichnen nicht ein objektiv repräsentatives Bild der Zukunft des Gesamtsystems und dessen Auswirkungen auf die belebte Umwelt.

Die Szenarien werden eingeteilt in solche, die menschliches Eindringen in das Barrierensystem zum Gegenstand haben, und alle anderen Szenarien; letztere werden als „natürliche Entwicklungen“ bezeichnet. Unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Barrierensystem der verschlossenen Schachtanlage Asse kann für eine Zeit, nach der das Wissen um die Schachtanlage und deren Funktion als nicht mehr gesichert angesehen werden kann, nicht ausgeschlossen werden. Da für eine systematische Erfassung der möglichen künftigen menschlichen Handlungen jedoch die wissenschaftlich fundierte Basis fehlt, beschränkt sich die systematische Szenarientwicklung auf die natürlichen Entwicklungen. Die möglichen Auswirkungen eines künftigen unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Barrierensystem der Asse wurde an Hand von unabhängig ausgewählten Szenarien untersucht.

Die Verhältnisse in der Biosphäre und die klimatischen Verhältnisse dürfen für einige Tausend Jahre als angenähert konstant angenommen werden – angesichts der wachsenden Erkenntnisse zur anthropogenen Klimabeeinflussung möglicherweise auch nur für eine kürzere Zeitperiode. Für die Lebens- und Verzehrgeohnheiten der Menschen ist der mögliche Prognosezeitraum kürzer. Aus diesem Grund wird darauf verzichtet, für die Biosphäre eine Szenarientwicklung durchzuführen. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit werden vielmehr unabhängig vom Zeitpunkt der Exposition typische, den heutigen Bedingungen entsprechende Verhältnisse unterstellt.

Die Szenarientwicklung für den Standort Asse erfolgte mit der Methodik von PROSA /PRIJ 1993/, /GRU 1999/. Diese beruht auf einer ein-eindeutigen Zuordnung zwischen einer Szenariengruppe und der qualitativen Wirkungsweise des Multibarrierensystems (MBS). Dafür wurde zunächst eine umfangreiche Liste der potenziell relevanten Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse (FEP für englisch *features, events and processes*) für das System Asse erstellt und anhand von FEP-Listen in der internationalen Literatur auf Vollständigkeit hin überprüft. Gestützt auf die Standortcharakterisierung und die Langzeitprognosen wurden die FEP gleichzeitig in Bezug auf Relevanz und Eintretenswahrscheinlichkeit bewertet. Dies erlaubte eine Einteilung der FEP in die Klassen

- A FEP, die in allen Szenarien als wirksam zu unterstellen sind (Beispiel: radioaktiver Zerfall von Radionukliden)
- B FEP, die möglicherweise wirksam sind und qualitative Unterschiede der Systementwicklung und der Barrierenwirksamkeit bestimmen (Beispiel: ausbleibender oder eintretender Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer, Vergletscherung des Standortes innerhalb der kommenden 150 000 Jahre)
- C FEP, die aufgrund ihrer sehr geringen Eintretenswahrscheinlichkeit in keinem Szenario zu unterstellen sind (Beispiel: Einschlag eines großen Meteoriten)

oder die eine vernachlässigbar geringe Auswirkung auf das System Asse haben
(Beispiel: regionale Hebung, Absinken des Meeresspiegels)

Durch Festlegen, welche der FEP der Klasse B als wirksam und welche als unwirksam unterstellt werden, wird eine Szenariengruppe definiert. Entspricht diese Wahl für jeden FEP der Klasse B der höheren der beiden Wahrscheinlichkeiten für „wirksam“ und für „unwirksam“, dann ist die resultierende Szenariengruppe jene des Referenzszenarios. Die PROSA-Methodik für die Szenarienenwicklung besteht im Wesentlichen darin, ausgehend von einer gewählten Szenariengruppe – für die Anwendung auf den Standort Asse wurde die Szenariengruppe des Referenzszenarios gewählt – durch systematisches Ändern der Annahmen betreffend der Wirksamkeit der B-FEP einen abdeckenden Satz von Szenariengruppen zu entwickeln.

Dieses Vorgehen wurde für die Asse getrennt für das Teilsystem Nahfeld (Grubengebäude einschließlich Wirtsgestein) und für das Teilsystem Geosphäre (Deckgebirge einschließlich potenzielle Transportpfade durch das Wirtsgestein und damit potenzielle Übertrittsorte in das Deckgebirge) unter detaillierter Berücksichtigung der Schnittstelle zwischen den Teilsystemen umgesetzt /COL 2006a/, /COL 2006b/. Im Ergebnis wurden neben der Szenariengruppe des Referenzszenarios jeweils fünf alternative Szenariengruppen für die beiden Teilsysteme identifiziert, wobei drei korreliert in beiden Teilsystemen von der Szenariengruppe des Referenzszenarios abweichen und jeweils zwei nur im entsprechenden Teilsystem.

Die identifizierten Szenariengruppen sind

- Szenariengruppe des Referenzszenarios
- Szenariengruppen, die korreliert in beiden Teilsystemen, „Nahfeld“ und „Geosphäre“, von der Szenariengruppe des Referenzszenarios abweichen
 - Vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (vZdSB)
 - Gasabfluss entlang Tagesschächte (GTs)
 - Vergletscherung des Standortes (Vg)
- Nahfeld-Szenariengruppen
 - Abweichendes chemisches Milieu in den Einlagerungsbereichen (acM)
 - Lösungszutritt zu MAW (LsgMAW)
- Geosphären-Szenariengruppen
 - Ausbreitung verstütztes Deckgebirge – West (vD-W)
 - Ausbreitung verstütztes Deckgebirge – Ost (vD-E)

Im nachfolgenden Kapitel werden die identifizierten Szenariengruppen kurz charakterisiert und hinsichtlich ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit bewertet. Die möglichen Kombinationen der Szenariengruppen für das Nahfeld und für die Geosphäre sind in /COL 2006a/ ausführlich diskutiert.

Entsprechend dem Betrachtungszeitraum in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose deckt die Szenarientwicklung systematisch den Zeitraum von 150 000 Jahren ab (vgl. Kapitel 5.1). Über einen längeren Zeitraum von einigen 100 000 Jahren werden nur ausgewählte FEPs berücksichtigt.

5.2.2 Szenariengruppe des Referenzszenarios

Die Szenariengruppe des Referenzszenarios ist definitionsgemäß – aufgrund der jeweils wahrscheinlichsten Annahme betreffend Wirksamkeit der B-FEP (vgl. Kapitel 5.2.1) – die Gruppe qualitativ gleicher Systementwicklungen mit der höchsten Eintretenswahrscheinlichkeit.

Die einzelnen Szenarien dieser Szenariengruppe werden durch zahlreiche FEP bzw. deren Parameter charakterisiert. Entsprechend vielfältig sind die möglichen Entwicklungen im Grubengebäude und die zeitlichen Verläufe der resultierenden Austrittsraten von Lösung, Gas und Radionukliden bzw. anderen Schadstoffen in das Deckgebirge. Die Auspressrate der Grubenlösung in das Deckgebirge und deren zeitlicher Verlauf, die zeitliche Verzögerung, mit der Radionuklide mit der Grubenlösung in das Deckgebirge übertreten, wie auch die Wegsamkeiten durch den Röttaquitard (vgl. Kapitel 2.5) bestimmen im Einzelnen die Ausbreitung und die Rückhaltung von Radionukliden bzw. anderen Schadstoffen im Deckgebirge bis zum Übertritt in die Biosphäre.

Das Referenzszenario und die zugehörige Szenariengruppe sind durch folgende, sowohl für das Nahfeld als auch für die Geosphäre relevante FEP charakterisiert:

- Klimaentwicklung ohne Vereisung des Standortes innerhalb der kommenden 150 000 Jahre (Typ „Weichsel-Eiszeit“),
- Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere innerhalb des Teufenbereichs 500 m bis 574 m mit wenigstens einer hydraulischen Verbindung zwischen dem Grubengebäude und dem Rötanhydrit in der Südflanke in 500 m Teufe,
- Auspressen von Lösung und Austreten von Gas aus der Grube in den Rötanhydrit der Südflanke zwischen 500 m und 574 m Teufe,
- kein oder höchstens ein sehr geringer Gasfluss entlang der Tagesschächte,
- keine Bildung von neuen Wegsamkeiten von der Grube in das verstürzte Deckgebirge nach rund 100 000 Jahren im Zusammenhang mit Permafrost oder nach mehreren 100 000 Jahren durch das subrosive Absinken des Salzspiegels.

Im Nahfeld sind das Referenzszenario und dessen Szenariengruppe im Besonderen charakterisiert durch

- kein Ansteigen des Lösungspegels in den Fasskegel in der MAW-Kammer und dadurch keine oder höchstens eine vernachlässigbar geringe Mobilisierung von Schadstoffen aus den MAW
- eine wirksame Rückhaltung ausgewählter Radionuklide in den Einlagerungsbereichen der LAW durch Löslichkeit und Sorption.

Das Eindringen von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer wird durch die unter der Sorelbetonglocke eingeschlossene Grubenluft verhindert /COL 2006e/.

Das geochemische Milieu in den Einlagerungskammern und -bereichen der LAW hängt von zahlreichen Sachverhalten ab (Kapitel 6.1). Diese bestimmen die Löslichkeit und Sorption von Radionukliden /INE 2006a/ sowie Löslichkeiten von chemischen und chemotoxischen Stoffen /BUC 2006a/. Im Referenzszenario stellen sich durch Wechselwirkungen des eingeleiteten Schutzfluids mit den eingebrachten Mg-Depots und mit den reaktiven Stoffkomponenten der Abfallgebinde (hauptsächlich Zement und Eisen) – trotz des durch mikrobielle Umsetzung entstehenden CO₂ – rasch neutrale bis schwach alkalische Bedingungen mit reduzierendem Redoxpotenzial ein /INE 2006a/. Ausnahmen bilden einerseits die Einlagerungskammer 2/750(Na2) des ELB LAW1A, in der unter sehr ungünstigen Annahmen bezüglich der CO₂-Bildung eine schwache Versauerung des Milieus eintreten kann, und andererseits die Einlagerungskammern 6/750 und 11/750 des ELB LAW3, in denen sich aufgrund des hohen Zementinventars ein hoher pH-Wert einstellen wird (vgl. Tabelle 6.1-1). Aufgrund des geringen Lösungsaustauschs in den Porenvolumina der Einlagerungskammern und der teilweise ähnlichen Lösungszusammensetzungen in benachbarten ELK verändern sich die geochemischen Milieus auch langfristig nur geringfügig /INE 2006b/.

Im Hutgestein und im Deckgebirge zeichnen sich das Referenzszenario und dessen Szenariengruppe durch folgende Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse (bzw. deren Ausbleiben) aus:

- vorherrschender Transport der aus dem Grubengebäude ausgetretenen Radionuklide in Lösung durch den Röttaquitard (*so2-so4*) in den Muschelkalk, hauptsächlich durch den Scherdeformationsbereich S3/D9 und die Querstörung der Ammerbeek, untergeordnet auch – nach einem schichtparallelen Transport im Rötanhydrit – entlang anderer Störungszonen,
- Übertritt der durch den Röttaquitard transportierten Radionuklide in den Muschelkalk, dort Ausbreitung entlang kurzer Wege an die Geländeoberfläche im Tal der Ammerbeek oder schichtparallel gegen die Exfiltrationsgebiete im Tal von Wittmar und bei Groß Denkte,
- kein oder nur ein untergeordnetes Hochpressen von kontaminierter Lösung in das verstürzte Deckgebirge bzw. Hutgestein oberhalb der Schachanlage Asse II entlang des Rötanhydrit, evtl. streckenweise entlang der Anhydritmittel durch das Zechstein,
- Ausbreitung der in das verstürzte Deckgebirge oberhalb der Schachanlage Asse II gelangten Radionuklide entlang kurzer Wege an die Geländeoberfläche im Tal der Ammerbeek oder in der Tiefe in die Nordflanke der Salzstruktur,
- untergeordnete Ausbreitung von Radionukliden in die Subrosionsgerinne oberhalb und westlich der Schachanlage Asse I gegen Groß Denkte,
- Austritt von radionuklidhaltigen Gasen in den Rötanhydrit der Südflanke und dichtegetriebener Aufstieg in der Gasphase.

Die für die Langzeitsicherheit maßgebenden Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse im Nahfeld und in der Geosphäre sind ausführlich in /COL 2006a/ und /COL 2006b/ beschrieben.

Eine Zusammenfassung, die allerdings nicht spezifisch für die einzelnen Szenariengruppen ist, enthält Kapitel 5.3.

5.2.3 Alternative Szenariengruppen

Die alternativen Szenariengruppen beschreiben – wie in Kapitel 5.2.1 ausgeführt – weniger wahrscheinliche Systementwicklungen als die Szenariengruppe des Referenzszenarios. Sie unterscheiden sich von der letztgenannten durch eine qualitativ abweichende Wirkung des Barrierensystems. Sie lassen sich wie folgt gliedern:

- Szenariengruppen, die korreliert in den beiden Teilsystemen „Nahfeld“ und „Geosphäre“ von der Szenariengruppe des Referenzszenarios abweichen,
- Nahfeld-Szenariengruppen,
- Geosphären-Szenariengruppen.

Nachfolgend werden die alternativen Szenariengruppen kurz charakterisiert und hinsichtlich ihrer Eintretenswahrscheinlichkeit bewertet. Eine ausführliche Diskussion enthalten /COL 2006a/ und /COL 2006b/.

Szenariengruppe vZdSB „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“

In der alternativen Szenariengruppe vZdSB wird unterstellt, dass sich die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere bis zum Ende der frühen Nachbetriebsphase bis in den Firstbereich der 490-m-Sohle ausweitet, damit von 574 m bis 474 m Teufe reicht und dass auch Wegsamkeiten von der Grube in das Deckgebirge der Südflanke in 474 m Teufe existieren. In den Szenarien der Gruppe vZdSB entweicht Gas früher als in der Szenariengruppe des Referenzszenarios aus der Grube in das Deckgebirge der Südflanke, denn dies erfordert nur ein geringmächtiges Gaspolster im Grubenhöchsten. Die geringere Gasspeicherung im Grubenhöchsten beeinflusst auch die Lösungsbewegung in der Grube. Die relevanten Prozesse und auch die Vielfalt der Szenarien der Gruppe vZdSB sind abgesehen von den genannten Unterschieden gleich wie in der Szenariengruppe des Referenzszenarios. Die alternative Szenariengruppe vZdSB ist wie folgt charakterisiert:

- Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke zwischen 574 m und 474 m Teufe,
- Existenz von hydraulischen Wegsamkeiten in 474 m Teufe von der Grube durch die Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke,
- Austritt von Gas aus dem Grubenhöchsten in das Deckgebirge der Südflanke ohne vorgängige Bildung eines relativ mächtigen Gaspolsters.

Im Übrigen entspricht diese Szenariengruppe jener des Referenzszenarios. Das Eintreten der alternativen Szenariengruppe vZdSB wird als mäßig wahrscheinlich eingeschätzt.

Szenariengruppe GTs „Gasabfluss entlang Tagesschächte“

Die alternative Szenariengruppe GTs beschreibt den Fall, dass (1) die Permeabilität eines oder beider Schachtverschlüsse (einschließlich ihrer Auflockerungszonen) ausreichend hoch und die Gaseindringdrücke ausreichend niedrig und (2) die Permeabilität der mit Sorelbeton verfüllten Auffahrungen zwischen dem Baufeld in der Südflanke und den Tagesschächten ausreichend hoch sind, um Gas in erheblicher Menge entlang der verschlossenen Tagesschächte entweichen zu lassen. Falls der Gasabfluss entlang der Tagesschächte stark ist, bildet sich im Grubenhöchsten kein ausreichend mächtiges Gaspolster, um zusätzlich einen Gasabfluss über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere auszulösen. Die veränderte Gasspeicherung im Grubenhöchsten beeinflusst die Lösungsbewegung in der Grube. Ein nennenswerter Austritt von Lösung entlang der verschlossenen Tagesschächte kann auch bei erhöhter Permeabilität der Schachtverschlüsse ausgeschlossen werden /ALSA 2005a/. Der Übertritt von Lösung in das Deckgebirge erfolgt daher wie in der Szenariengruppe des Referenzszenarios über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere. In Bezug auf den Transport von Schadstoffen in Lösung wird diese Szenariengruppe durch jene des Referenzszenarios und die alternative Szenariengruppe vZdSB abgedeckt. Die Auswertung der Szenariengruppe GTs kann sich deshalb im Nahfeld und im Deckgebirge auf den Transport und Austritt von radioaktiven Gasspezies aus dem Grubengebäude beschränken.

Die für die Langzeitsicherheit wichtigsten Prozesse und Sachverhalte im Deckgebirge sind in Abweichung von der Szenariengruppe vZdSB jene des dichtegetriebenen Aufstiegs von Gas entlang der Tagesschächte durch das Wirtgestein, das Hutgestein und das verstürzte Deckgebirge. Dieser Gasanstieg kann durch die Schachtverschlüsse in Bezug auf die Rate gedrosselt sein, er ist aufgrund des stärker kanalisierten Aufstiegspfades in Bezug auf die Transportgeschwindigkeit jedoch rascher als jener entlang natürlicher Wegsamkeiten in der Szenariengruppe vZdSB. Von besonderer Bedeutung sind die Lösung von Gas im Porenwasser der Schachtverfüllung und der Übertritt aus dem verfüllten Schacht in das umgebende Deckgebirge.

Die alternative Szenariengruppe GTs ist wie folgt charakterisiert:

- erhöhte Permeabilität entlang der mit Sorelbeton verfüllten Auffahrungen auf der 490-m-Sohle und entlang einem (oder beiden) verschlossenen Tagesschächten sowie verminderter Gaseindringdruck der betroffenen Schachtverschlüsse (einschließlich Auflockerungszone),
- erheblicher Gasaustritt entlang einem oder beider Tagesschächte,
- kein Gasaustritt durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge der Südflanke,
- kanalisierte, dichtegetriebene Aufstiege der radioaktiven Gasspezies entlang der Tagesschächte durch das verstürzte Deckgebirge.

Im Übrigen entspricht diese Szenariengruppe jener des Referenzszenarios. Das Eintreten der Szenariengruppe GTs wird als gering wahrscheinlich eingestuft.

Nahfeld-Szenariengruppe acM „abweichendes chemisches Milieu in den Einlagerungsbereichen“

In den alternativen Szenarien der Nahfeld-Szenariengruppe acM wird unterstellt, dass die Entwicklung des chemischen Milieus in einem oder mehreren Einlagerungsbereichen aus nicht näher spezifizierten Gründen derart stark vom Referenzszenario abweicht, dass dort eine deutlich reduzierte Rückhaltung von Radionukliden durch Löslichkeit oder Sorption gegenüber den Verhältnissen in der Szenariengruppe des Referenzszenarios erfolgt. Ansonsten stimmen die wirksamen und nicht wirksamen FEP mit jenen der Szenariengruppe des Referenzszenarios überein.

Solche Verhältnisse sind wenig wahrscheinlich, denn die Schließungsmaßnahmen sind dafür ausgelegt, das geochemische Milieu in den Einlagerungsbereichen derart zu beeinflussen, dass sicherheitsrelevante Radionuklide deutlich zurückgehalten werden.

Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW „Lösungszutritt in den Fasskegel in der MAW-Kammer“

Die alternative Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW unterscheidet sich nur beim ELB MAW von der Szenariengruppe des Referenzszenarios. In den Szenarien der Szenariengruppe LsgMAW wird abweichend vom Referenzszenario angenommen, dass Schutzfluid während des Einleitens in das Baufeld in der Südflanke und in der frühen Nachbetriebsphase in wesentlichem Ausmaß in die Kammern 8a/532 und 8b/532, den MAW-Nahbereich, eindringt und die eingeschlossene Grubenluft rasch entlang von Wegsamkeiten aus der Firste des Nahbereichs entweicht. Beim Anstieg des Fluiddrucks in den ersten Jahrzehnten der Nachbetriebsphase vermag der Lösungspegel in der Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW bis in den MAW-Fasskegel hochzusteigen. Unter der Sorelbetonglocke und in der Firste des Nahbereichs verbleibt in dieser Szenariengruppe derart wenig Grubenluft, dass sie nach Kompression das fluidzugängliche Volumen im Fasskegel nicht auszufüllen und dadurch einen Lösungszutritt nicht zu verhindern vermag.

Mit dem Lösungszutritt zu den Abfällen im Fasskegel setzt zum einen die Mobilisierung der Radionuklide und der anderen Schadstoffe ein und steigt zum anderen die Gasbildung im Fasskegel an. Da auch in der Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW die Sorelbetonglocke in der MAW-Kammer als undurchlässig angenommen wird, kann das gebildete Gas den Fasskegel nur über die Sohle der MAW-Kammer verlassen. Gasbildung im Fasskegel verdrängt somit die zugetretene Lösung wieder aus dem Fasskegel. Dadurch kommt die Mobilisierung der Radionuklide und anderen Schadstoffe sowie – etwas verzögert – auch die Gasbildung wieder zum Erliegen. Die Prozesse bei einem Lösungszutritt in den Fasskegel entsprechen sonst jenen in den Einlagerungsbereichen der LAW.

Die alternative Nahfeld-Szenariengruppe LsgMAW ist wie folgt charakterisiert:

- rasches Entweichen der Grubenluft aus den Kammern 8a/532 und 8b/532 während des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke und während der frühen Nachbetriebsphase, begleitet von einem raschen Eindringen von Schutzfluid in die beiden Kammern, anschließend

- Eindringen von Lösung in den Fasskegel in der MAW-Kammer bis in eine nennenswerte Höhe während der Periode des Anstiegs des Fluiddrucks in der Grube
- Mobilisierung von Radionukliden und anderen Schadstoffen aus den MAW mit Wirkung von Löslichkeitsgrenzen und Sorption
- stärkere Gasbildung im Fasskegel in der MAW-Kammer als in der Szenariengruppe des Referenzszenarios
- relativ rasches Verdrängen der Lösung aus dem MAW-Fasskegel und Trockenfallen der MAW

Im Übrigen entspricht diese Szenariengruppe jener des Referenzszenarios, insbesondere in Bezug auf die LAW. Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der Szenariengruppe LsgMAW wird als gering bis mäßig eingeschätzt.

Geosphären-Szenariengruppe vD-W „Ausbreitung verstütztes Deckgebirge – West“

Die alternative Geosphären-Szenariengruppe vD-W unterscheidet sich von der Gruppe des Referenzszenarios in Bezug auf die Ausbreitungspfade von Schadstoffen in Lösung im Deckgebirge. In den Szenarien der Geosphären-Szenariengruppe vD-W sind die Verhältnisse im Deckgebirge, speziell die Permeabilitäten des Scherdeformationsbereichs S3/D9 und der Störungszonen im Röt-aquitard so2-so4, einerseits und die Auspressrate von Lösung aus der Grube andererseits derart, dass der größte Anteil der ausgepressten kontaminierten Grubenlösung entlang des Rötanhydrit und eventuell der Anhydritmittel in das verstützte Deckgebirge hoch gepresst wird. Verstärkt durch eine zuvor erfolgte rasche Ausdehnung der Subrosionsgerinne am Salzspiegel gegen Osten gelangt die hoch gepresste Lösung in dieser Szenariengruppe vorwiegend in den Bereich westlich der unterirdischen Grundwasserscheide im verstützten Deckgebirge nahe der Remlinger Herse. In der Folge breiten sich die Radionuklide hauptsächlich und mit großer Geschwindigkeit in den Subrosionsgerinnen nach Westen bis in das Gebiet von Groß Denkte aus. Dort werden sie mit dem natürlichen Grundwasserfluss an die Geländeoberfläche hoch geschleppt. Die alternative Geosphären-Szenariengruppe vD-W unterscheidet sich von der Szenariengruppe des Referenzszenarios durch

- einen stark behinderten Transport von ausgepresster Grubenlösung durch den Röt-aquitard in den Muschelkalk,
- das Hochpressen des größten Teils der aus der Grube austretenden kontaminierten Grubenlösung in das verstützte Deckgebirge, verbunden mit einem schichtparallelen Transport im Rötanhydrit in westlicher Richtung,
- eine relativ rasche Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen Osten, dadurch auch eine Verschiebung der unterirdischen Grundwasserscheide im verstützten Deckgebirge nördlich der Remlinger Herse gegen Osten,
- den Übertritt des größten Teils der hoch gepressten Lösung westlich der unterirdischen Grundwasserscheide in das verstützte Deckgebirge und dadurch in die Subrosionsgerinne,

- den Radionuklidtransport entlang der Subrosionsgerinne gegen Groß Denkte mit anschließendem Hochschleppen durch den natürlichen Grundwasserfluss und Freisetzung in die Biosphäre im Raum Groß Denkte.

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der alternativen Geosphären-Szenariengruppe vD-W wird gestützt auf die Modellrechnungen zur Ausbreitung der Grubenlösung in der Nachbetriebsphase im Deckgebirge (vgl. Kapitel 6.8 und /COL 2006d/) als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

Geosphären-Szenariengruppe vD-E „Ausbreitung verstürztes Deckgebirge – Ost“

Die alternative Geosphären-Szenariengruppe vD-E unterscheidet sich wie die Szenariengruppe vD-W von der Gruppe des Referenzszenarios nur in Bezug auf die Ausbreitungspfade von Schadstoffen in Lösung im Deckgebirge. Sie setzt – wie die Szenariengruppe vD-W – ebenfalls den behinderten Transport von Grubenlösung durch den Rötäquitard in den Muschelkalk und das Hochpressen des größten Anteils der aus der Grube austretenden kontaminierten Lösung in das verstürzte Deckgebirge voraus. Sie unterscheidet sich von der Szenariengruppe vD-W durch den Umstand, dass sich die Subrosionsgerinne nicht oder nur wenig gegen Osten ausdehnen und die hoch gepresste kontaminierte Lösung vorwiegend östlich der unterirdischen Grundwasserscheide nahe der Remlinger Herse in das verstürzte Deckgebirge übertritt. Von der Szenariengruppe vD-W unterscheidet sich die alternative Szenariengruppe vD-E durch

- das Ausbleiben einer Ausdehnung der Subrosionsgerinne gegen Osten,
- höchstens eine beschränkte schichtparallele Ausbreitung der ausgepressten Grubenlösung im Rötanhydrit gegen Westen, z.B. durch Versatz des Rötanhydrit an Störungen,
- den vorwiegenden Übertritt der hoch gepressten kontaminierten Lösung östlich der unterirdischen Grundwasserscheide in das verstürzte Deckgebirge,
- den Radionuklidtransport entlang kurzer Wege in das Tal der Ammerbeek und dessen Verlängerung entlang der Diagonalstörung Groß Vahlberg oder mit den Tiefenabflüssen aus dem verstürzten Deckgebirge in die Nord- und/oder die Südflanke der Salzstruktur.

Die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten dieser alternativen Geosphären-Szenariengruppe ist ähnlich jener der Szenariengruppe vD-W, sie wird – ebenfalls gestützt auf die Modellrechnungen zur Ausbreitung der Grubenlösung in der Nachbetriebsphase im Deckgebirge (vgl. Kapitel 6.8 und /COL 2006d/) – als sehr unwahrscheinlich eingestuft.

Szenariengruppe Vg „Vergletscherung des Standortes“

Die alternative Szenariengruppe Vg geht von einer Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes innerhalb der kommenden 150 000 Jahre, jedoch frühestens nach 100 000 Jahren, im Ausmaß der Saale-Vereisung (vgl. Kapitel 5.1) aus. Die Systementwicklung in dieser Szenariengruppe weicht erst mit dem Vorstoßen des Eisrandes von Norden gegen

den Standort Asse, d.h. ab rund 100 000 Jahren, von der Entwicklung in der Szenariengruppe des Referenzszenarios ab. Um eine möglichst abdeckende Szenariengruppe zu definieren, wird zudem angenommen, dass vor dem Vorrücken des Gletschers über den Standort Asse direkte Wegsamkeiten vom Grubengebäude zum Salzspiegel durch die Steinsalz-Barriere entstehen und sich die Subrosionsgerinne bis zu den Tagesschächten ausgedehnt haben.

Die alternative Szenariengruppe Vg entspricht bis 100 000 Jahre jener des Referenzszenarios und ist für die anschließende Zeitperiode wie folgt charakterisiert:

- Klimaentwicklung mit Vergletscherung des Standortes innerhalb der kommenden 150 000 Jahre, jedoch frühestens nach rund 100 000 Jahren,
- Absinken des Salzspiegels mit Nachstürzen des darüber liegenden Deckgebirges um 30 m bis 100 m bis zur Vergletscherung des Standortes,
- Entstehung neuer Wegsamkeiten von der Grube zum Salzspiegel und in das verstürzte Deckgebirge ab rund 100 000 Jahren,
- Ausdehnung der Subrosionsgerinne nach Osten bis zu den Tagesschächten,
- deutlich erhöhte Gebirgsspannung durch Auflast während der Vergletscherung,
- höherer Fluiddruck im Deckgebirge und im Grubengebäude mit verzögertem Anstieg nach Vordringen des Eisrandes über den Standort,
- Eindringen von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer bis in eine nennenswerte Höhe während des Anstiegs des Fluiddrucks im Grubengebäude,
- Mobilisierung von Radionukliden aus den MAW nach Lösungszutritt mit Wirkung von Löslichkeitsgrenzen und Sorption,
- erhöhte effektive Gebirgsspannung während des Vordringens des Eisrandes über den Standort, Rückgang der effektiven Gebirgsspannung auf ähnliche Werte wie vor der Vereisung durch den o.g. Anstieg des Fluiddrucks im Deckgebirge,
- „kurzzeitig“ erhöhte Konvergenzrate und Auspressen von kontaminierter Lösung (gegenüber dem Wert vor der Vergletscherung),
- Übertritt von Radionukliden durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in den Rötanhydrit, anschließende Ausbreitung im Deckgebirge qualitativ gleich wie in Szenariengruppe des Referenzszenarios,
- eventuell kurzfristiges Auspressen von kontaminierter Lösung entlang der neuen Wegsamkeiten direkt in das verstürzte Deckgebirge,
- erhöhte hydraulische Gradienten im Deckgebirge in Ost-West – Richtung als Folge des hydraulischen Kontakts mit dem Kluftwasser in der Eismasse.

Die Vergletscherung des Standortes während der nächsten Eiszeit und damit die alternative Szenariengruppe Vg wird als weniger wahrscheinlich als die für die anderen Szenariengruppen unterstellte nächste Eiszeit vom Typ „Weichsel“ eingestuft.

5.3 Relevante Ereignisse und Prozesse

Die wesentlichen Ereignisse und Prozesse, die die Entwicklung des Gesamtsystems sowie den Transport von Radionukliden und anderen Schadstoffen aus den Abfällen bis in die Biosphäre am Standort beeinflussen, wurden für das Nahfeld, bestehend aus dem Grubengebäude und der Steinsalz-Barriere, in /COL 2006b/ und für das Fernfeld, bestehend aus dem Deckgebirge, in /COL 2006a/ identifiziert und beschrieben.

Die wichtigsten Prozesse im Nahfeld sind

- Entwicklung des chemischen Milieus in den Einlagerungskammern und –bereichen,
- Mobilisierung von Radionukliden und anderen Schadstoffen aus den Abfällen, differenziert nach Zusammensetzung und Konditionierung der Abfälle sowie nach Abfällen mit und ohne verlorene Betonabschirmung,
- Rückhaltung von Radionukliden und anderen Schadstoffen in den Einlagerungskammern und –bereichen durch Löslichkeit und Sorption,
- Verhinderung, evtl. nur Behinderung, des Lösungszutritts in den Fasskegel der MAW-Kammer durch eingeschlossene Luft im MAW-Fasskegel und in den beiden Abbauen unterhalb der MAW-Kammer und dadurch
- keine Mobilisierung von Radionukliden und Schadstoffen aus den MAW, evtl. verminderte Mobilisierung durch teilweisen Lösungszutritt im Vergleich mit der Mobilisierung bei ungehindertem Lösungszutritt
- Konvergenz der Grubenbaue, differenziert nach Ort und Versatz und abhängig vom Fluiddruck sowie von der mit der Zeit ansteigenden Stützwirkung des Versatzes,
- Entwicklung von Porosität und hydraulischer Permeabilität des Versatzes in den Grubenbauen sowie in den aufgelockerten Bereichen des Wirtsgesteins, wie z. B. Schweben und Pfeilern,
- Korrosion von Eisen, Stahl und weiteren Metallen (Aluminium und Zink) sowie Zersetzung organischer Substanzen,
- Gasbildung in den Einlagerungsbereichen und in Grubenbereichen außerhalb der Einlagerungsbereiche, differenziert nach anorganischen (CO₂) und organischen (CH₄) Kohlenstoffverbindungen sowie übrigen Gasspezies,
- Gasspeicherung im Porenraum des Versatzes sowie unter lokalen Sperrschichten im Grubengebäude,
- Dichtegetriebener Aufstieg von Gas gegen das Grubenhöchste,
- Gasspeicherung im Grubenhöchsten,
- Lösungsbewegung durch Konvergenz und Gasspeicherung,
- Änderungen der Lösungsdichte durch Wechselwirkung mit Zement und Mg-Depot und dadurch eventuell ausgelöste konvektive Lösungsbewegung,

- Transport von Radionukliden und anderen Schadstoffen in gelöster Phase durch Advektion/Dispersion und Diffusion unter Berücksichtigung von kleinräumigen und großräumigen Kanalisierungseffekten,
- Abnahme der Radionuklid- und Schadstoffkonzentration in Lösung durch Vermischung mit unkontaminierter Lösung im Grubengebäude (Verdünnung),
- Transportverzögerung im Grubengebäude,
- Auspressen von Grubenlösung in das Deckgebirge, behindert durch den hydraulischen Widerstand im Deckgebirge,
- dichtegetriebenes Austreten von Gas über die oberste Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge nach Aufbau eines ausreichend mächtigen Gaspolsters im Grubenhöchsten und
- Austritt von radioaktiven Gasspezies (volatilen Radionukliden) in das Deckgebirge.

Die wichtigsten Prozesse, die die Entwicklung in der Geosphäre und den Transport von Radionukliden und anderen Schadstoffen im Deckgebirge bis in die Biosphäre bestimmen, sind:

- Geomechanische Beanspruchungen der Gesteinsverbände in der Südflanke des Grubengebäudes, wie Verformungen und Verschiebungen, durch die anhaltende Konvergenz,
- Lösungsaustritt in das Deckgebirge, beeinflusst durch den hydraulischen Widerstand im Deckgebirge,
- Ausbreitung der ausgepressten Grubenlösung im Deckgebirge, beeinflusst durch Unterschiede von Dichte und Viskosität der verschiedenen Lösungen,
- konkurrierende Ausbreitung im Deckgebirge durch den Röttaquitard in den Muschelkalk und entlang des Rötanhydrit (evtl. streckenweise entlang der Anhydritmittel durch den Zechstein) in das verstückte Deckgebirge oberhalb des Salzspiegels,
- Transport von Radionukliden und anderen Schadstoffen in gelöster Phase durch Advektion/Dispersion und Diffusion,
- Transportverzögerung durch geringe Abstandsgeschwindigkeiten, Matrixdiffusion und Sorption, wobei Sorption und teilweise auch Matrixdiffusion aufgrund der Datelage quantitativ nicht belastet werden,
- Abnahme der Radionuklid- und Schadstoffkonzentration in Lösung durch Vermischung mit unkontaminierter Lösung im Deckgebirge, im oberflächennahen Grundwasser und in Oberflächengewässern (Verdünnung),
- dichtegetriebener Aufstieg von Gas von der Übertrittsstelle in das Deckgebirge gegen die Geländeoberfläche mit Einfluss von Kanalisierung und Lösung von Gas im Deckgebirgswasser und
- Übertritt von gelösten und volatilen Radionukliden und anderen Schadstoffen in die Biosphäre, Transport von Radionukliden durch die verschiedenen Biosphärenkompartimente und Exposition von postulierten betroffenen Personen.

Diese Prozesse wurden bezüglich der gebirgsmechanischen Entwicklung in /IfG 2006b/ und /SRO 2006/, bezüglich des Transports von chemischen und chemotoxischen Stoffen in /BUC 2006a/ und /BUC 2006b/ sowie bezüglich des Transports von Radionukliden in /COL 2006a/, /COL 2006b/, /ALSA 2005a/, /ALSA 2006c/ und /COL 2006f/ soweit beschrieben, wie es für die Umsetzung in konzeptuelle Modelle und Berechnungsmodelle sowie für die Festlegung von Parameterwerten für den Nachweis der Langzeitsicherheit erforderlich ist. Wesentliche Aspekte für die Definition der konzeptuellen Modelle und für deren Umsetzung in die Berechnungsmodelle sind in den Kapiteln 6 und 7 nochmals zusammenfassend erläutert.

6 Modellierung von Einzelprozessen und Teilsystemen

6.1 Geochemische Modellrechnungen für die Einlagerungskammern

Geochemische Prozesse in den Einlagerungskammern beeinflussen maßgeblich die Entwicklung des Gesamtsystems und die Ausbreitung von Schadstoffen. Im Folgenden werden die geochemischen Prozesse dargestellt, die mit der Einbringung des Mg-Depots und des Schutzfluids in die Einlagerungskammern einsetzen.

Die Untersuchung der geochemischen Prozesse und die Ermittlung des geochemischen Milieus hatten zum Ziel, die geochemischen Bedingungen und die langzeitige Entwicklung in den Einlagerungskammern zu prognostizieren, um

- die maximal möglichen Konzentrationen ausgewählter Radionuklide (Kapitel 6.2.1),
- die maximalen Stoffkonzentrationen chemischer und chemotoxischer Stoffe (Kapitel 6.2.2),
- die korrosive und mikrobielle Gasbildung (Kapitel 6.3) sowie
- die Veränderung der Lösungsdichte (Kapitel 6.4)

in der Nachbetriebsphase zu ermitteln. Die Entwicklung des geochemischen Milieus wirkt sich somit unmittelbar auf die Mobilisierung bzw. Immobilisierung von Schadstoffen und auf deren Ausbreitung aus.

6.1.1 Konzeptuelles Modell und Datenbasis

Geochemische Prozesse in den Einlagerungskammern sind die Folge von chemischen und mikrobiellen Reaktionen, die nach der Einstellung eines Gleichgewichtszustandes streben. Qualität und Quantität der geochemischen Prozesse hängen von den reaktiven Stoffen ab und werden in ihrer Gesamtheit durch das geochemische Milieu beschrieben. Das Milieu wird von der chemischen Zusammensetzung von Lösung, Gasen und Festphasen bestimmt, die sich nach Abschluss der geochemischen Prozesse im Gleichgewicht befinden. Die wesentlichen Prozesse sind

- die Korrosion von Metallen,
- die Zementkorrosion,
- die mikrobielle Degradation von organischen Bestandteilen sowie
- die Umsetzung von Mg-Depot und Salzversatz.

Die Prozesse sind in Kapitel 6.1.2 kurz erläutert. Der zeitliche Verlauf, d.h. die Kinetik, der Reaktionen unterscheidet sich teilweise deutlich und ist für einige Reaktionen bisher nicht umfassend bekannt.

Das geochemische Milieu hängt vom stofflichen Inventar der Abfallgebinde /BUC 2006a/, von den bereits eingebrachten Versatzstoffen /GSF 2006k/ sowie von den einzubringenden Versatzstoffen – Sorelbeton und Mg-Depot – ab (vgl. Kapitel 4). Die Situation, die nach Durchführung der vorgesehenen Verfüllmaßnahmen in den Einlagerungskammern und der unmittelbaren Umgebung angenommen wird, ist ausführlich in /GSF 2006e/ beschrieben.

Die Analyse der geochemischen Prozesse und die Prognose des geochemischen Milieus und der Elementkonzentrationen für ausgewählte Radionuklide wurden auf Grundlage von geochemischen Modellrechnungen sowie von experimentellen Untersuchungen im Labor- und Gebindemaßstab durchgeführt. Die thermodynamischen Modellrechnungen erfolgten im Wesentlichen unter Verwendung des Programmpakets EQ3/6, Release 7.2 /WOL 1992a/ /WOL 1992b/ /WOL 1992c/. Wesentlicher Bestandteil der verwendeten Datenbasis ist der HMW-Datensatz /HAR 1984/ für das System der ozeanischen Salze. Die Datensätze wurden entsprechend dem internationalen Kenntnisstand aktualisiert bzw. für standortspezifische Erfordernisse ergänzt. Dies betrifft standortspezifisch relevante aquatische Spezies und Festphasen, wie z.B. Actiniden, aquatische Fe-, Si- und Al-Spezies sowie feste Phasen des Zementsystems, mit den zugehörigen Löslichkeitsprodukten, Komplexbildungskonstanten und Pitzer-Koeffizienten. Die Änderungen in den thermodynamischen Datensätzen basieren im Wesentlichen auf experimentellen Untersuchungen und neueren Veröffentlichungen zur aquatischen Thermodynamik, die in /INE 2003c/ und /INE 2006a/ ausführlich beschrieben sind.

Als Modellannahme für die geochemischen Modellierungen wurde davon ausgegangen, dass die Einlagerungskammern als quasi geschlossene Systeme betrachtet werden können (Abbildung 6.1-1). Ein quasi geschlossenes System (QCS⁹) ist durch einen geringen und langsamen Stoffaustausch mit der Umgebung charakterisiert. In der Regel laufen die chemischen Reaktionen¹⁰ innerhalb eines solchen Systems deutlich schneller ab als der Lösungsaustausch mit der Umgebung, d.h. dass die Umsetzungsraten von reaktiven Kammerinhaltsstoffen in der Lösung deutlich größer als die Austauschraten von Lösung mit der Umgebung sind /INE 2006a/. Eine Abschätzung der erwarteten Aufenthaltszeiten der Lösungen von mehr als 500 Jahren in den Einlagerungskammern sowie der Equilibrierungszeiten ergab, dass die Aufenthaltszeiten im Vergleich zu den Equilibrierungszeiten der meisten reaktiven Kammerinhaltsstoffe hinreichend lang sein werden. Als Ergebnis der Überprüfung resultiert, dass die Ergebnisse der thermodynamischen Modellrechnungen die Verhältnisse in den realen Systemen hinreichend genau beschreiben können /INE 2006b/.

Zwischen benachbarten Einlagerungskammern und Abbauen wird aufgrund hydraulischer Wegsamkeiten ein mehr oder weniger starker Lösungsaustausch stattfinden. Durch detaillierte Modellrechnungen¹¹ zu Fluidbewegungen in den Einlagerungsbereichen und deren geochemische Interpretation wurde nachgewiesen, dass der Lösungsaustausch in 9 der 13

⁹ Die Abkürzung QCS wurde aus der englischen Übersetzung *Quasi Closed System* abgeleitet.

¹⁰ Eine Ausnahme von diesem Sachverhalt stellt die Umsetzung von organischen Abfallkomponenten zu anorganischen Kohlenstoffverbindungen dar. Eine Variation der Umsetzungsraten lässt sich unter Verwendung des QCS-Modellansatzes simulieren.

¹¹ Die Detailmodelle sind in Kapitel 6.2 angesprochen

Einlagerungskammern über den Zeitraum von 100 000 Jahren keine signifikanten Veränderungen der Milieubedingungen hervorrufen wird. In vier Einlagerungskammern sind durch die Austauschvorgänge merkliche Abweichungen des geochemischen Milieus zu erwarten /INE 2006b/.

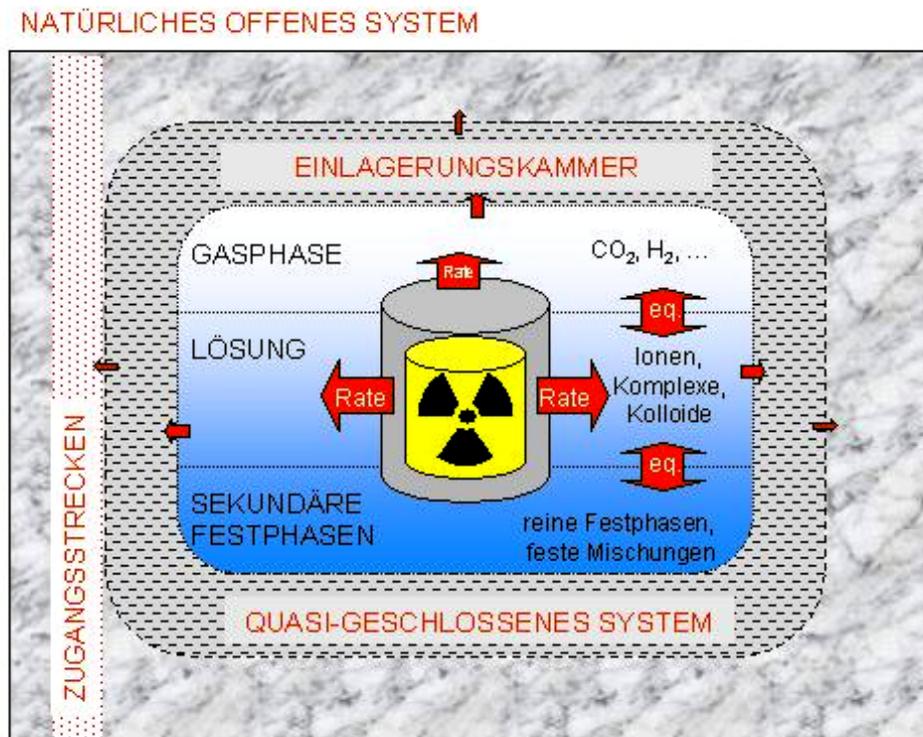


Abb. 6.1-1: Schematische Darstellung einer Einlagerungskammer als ein System mit eingeschränktem Lösungsaustausch mit der Umgebung /INE 2006a/.

Für jede Einlagerungskammer wurde die Lösungszusammensetzung, die sich nach Umsetzung der reaktiven Kammerinhaltsstoffe im Kontakt mit dem Schutzfluid bis zum stabilen Gleichgewicht von Lösungs-, Gas- und Festphasen einstellt, berechnet. Die Modellrechnungen wurden für den chemischen Gleichgewichtszustand in jeder Einlagerungskammer durchgeführt. Neben dem geochemischen Milieu wurden auch die maximal möglichen Konzentrationen für ausgewählte Radionuklide unter Berücksichtigung von Löslichkeiten und Sorption berechnet (siehe Kapitel 6.1.3).

In einem experimentellen Programm wurden die in den Einlagerungskammern relevanten geochemischen Prozesse untersucht und mit den Ergebnissen der thermodynamischen Modellrechnungen verglichen. Die experimentellen Untersuchungen umfassten

- die Wechselwirkungen von MgCl₂-reichen Lösungen mit Kammerinhaltsstoffen, wie Zement, Eisen, Mg-Depot, anorganische Kohlenstoffverbindungen und Steinsalz,
- Löslichkeitsexperimente für ausgewählte Radionuklide in reinen hochsalinen MgCl₂- und NaCl-Lösungen sowie in standortspezifischen Salzlösungen,

- Sorptionsexperimente für ausgewählte Radionuklide in mehreren Lösung-Feststoff-Systemen und
- den Nachweis der Wirksamkeit von Brucit-Granulat und Brucit als Mg-Depot.

Die Untersuchungen des experimentellen Programms haben die Ergebnisse der thermodynamischen Modellrechnungen bestätigt und die thermodynamische Datenbasis abgesichert. Insbesondere konnten die berechneten Zusammensetzungen der Lösungen und Korrosionsprodukte sowie die maximal möglichen Konzentrationen von ausgewählten Radionukliden experimentell bestätigt werden. Die Untersuchungen und Ergebnisse des experimentellen Programms sind ausführlich in /INE 2005a/ und /INE 2006a/ dargelegt.

6.1.2 Ergebnisse für das geochemische Milieu

Nachfolgend werden die für die Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern als relevant erachtete geochemische Prozesse kurz erläutert. Die ablaufenden chemischen Reaktionen sind im Detail sehr komplex, lassen sich aber auf Grundlage chemischer Gesetzmäßigkeiten auf wenige Prinzipien zurückführen. Diese sind voneinander abhängig bzw. wirken auch aufeinander zurück (vgl. Abbildung 6.1-2). Mit der Einbringung des Mg-Depots und Schutzfluids setzen die Wechselwirkungen zwischen dem Schutzfluid und den reaktiven Kammerinhaltsstoffen sofort ein. Entsprechend den unterschiedlichen kammer-spezifischen Verhältnissen variiert die Bedeutung der verschiedenen Prozesse.

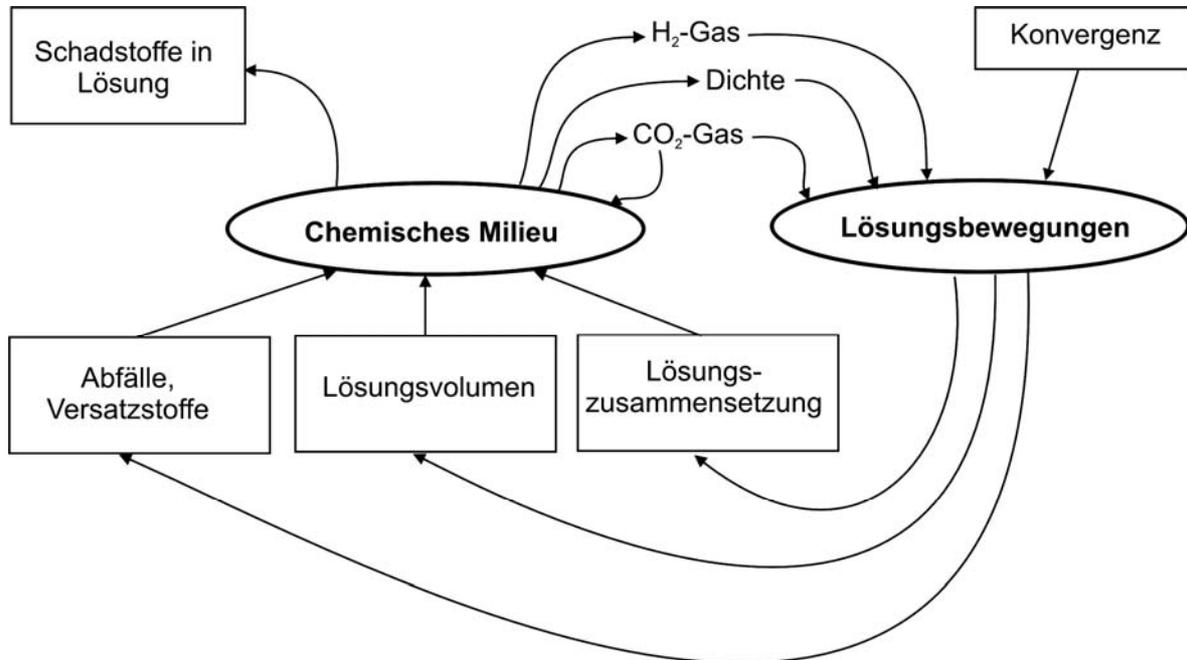


Abb. 6.1-2: Schematische Darstellung des Systems Einlagerungskammer einschließlich seiner Wechselwirkungen mit der Umgebung

Metallkorrosion

Das Schutzfluid ist durch den Kontakt mit der Grubenluft an Sauerstoff gesättigt. Unter den aerob-feuchten Bedingungen kommt es zur Korrosion an den Außenschichten der metallischen Abfallbehälter. Durch die Korrosionsprozesse wird Sauerstoff innerhalb eines Jahres verbraucht, das Redoxpotenzial nimmt ab und das geochemische Milieu wird anaerob. Die Korrosion setzt sich unter anaeroben Bedingungen mit einer deutlich geringeren Rate fort, wobei Wasserstoff-Gas gebildet wird (siehe auch Kapitel 6.3 und /IST 2005b/).

Zementkorrosion

Das Schutzfluid ist reich an $MgCl_2$ und $MgSO_4$. Im Kontakt mit einer derartigen Lösung ist Zementstein, der zur Konditionierung der Abfälle (Abfallmatrizes) und zur Verpackung von Abfallgebinden (VBA) verwendet wurde, thermodynamisch nicht stabil. Daher kommt es zu einem Ca–Mg–Austausch zwischen dem Zementstein und Schutzfluid, wobei sich je nach Verhältnis zwischen Zementstein und Lösungsmenge eine Mg- oder Ca-dominierte Lösung mit einem neutralen bis schwach alkalischen oder einem stark alkalischen pH-Wert einstellt. Die Korrosion der zementierten Abfälle erfolgt in mehreren Entwicklungsschritten: Zunächst wird eine Ankopplung der Lösung an das Abfallprodukt (Benetzung) und an das mehr oder weniger mit Lösung gefüllte Porensystem des Abfallprodukts erfolgen¹². Innerhalb von Tagen beginnen diffusionskontrollierte Austauschprozesse, wobei die Menge der ausgetauschten Stoffe von der verfügbaren Oberfläche abhängt. Aus der Lösung dringen hauptsächlich Cl^- , SO_4^{2-} und Mg^{2+} in die Zementporen ein, während vor allem OH^- und Ca^{2+} aus dem Zementprodukt nach außen diffundieren. Im Zementprodukt löst sich Portlandit ($Ca(OH)_2(s)$) auf, wodurch die mechanische Festigkeit der Abfallmatrix abnimmt. Es bilden sich Zementkorrosionsprodukte, die ihrerseits wiederum als Sorbent für Radionuklide bzw. auch für andere Schadstoffe fungieren können. Im Verlauf von einigen Monaten bis wenigen Jahren nimmt der pH-Wert im Porenwasser des Zementprodukts von außen nach innen ab, wodurch die hydratisierten Ca-Silikate (CSH-Phasen) instabil werden. Durch die Bildung von Ca-Sulfat im Zementprodukt kommt es zur Volumenzunahme, welche die Struktur der Abfallmatrix weiter beeinträchtigt. Infolge dessen wird die Abfallmatrix von außen nach innen fortschreitend zerstört und Schadstoffe können mobilisiert werden.

In den meisten Einlagerungskammern werden neutrale bis schwach alkalische $MgCl_2$ -reiche Lösungszusammensetzungen bei vollständiger Umsetzung des Zementsteins durch Bildung von Sorelphasen und/oder Brucit gepuffert (Tabelle 6.1-1). Die Lösungszusammensetzungen in den Einlagerungskammern variieren in Abhängigkeit von den Verhältnissen von Zementmenge, Brucitmenge, Kohlenstoffmenge, Menge an Salzversatz und initialer Lösungsmenge (Schutzfluid). In den Einlagerungskammern mit einem günstigen Verhältnis bleiben die Lösungszusammensetzungen Mg-betont, wie z.B. in den Einlagerungskammern 8/750 und 10/750.

In den Einlagerungskammern, in denen die Brucit-Menge die Menge an Zementstein überwiegen wird, kommt es durch Ausfällung von Sorelphasen bei gleichzeitiger Nachlösung von

¹² Dabei können bereits Schadstoffe gelöst bzw. mobilisiert werden.

leicht löslichem Steinsalz zur Verringerung der Mg-Konzentration in Lösung. Diese Lösungszusammensetzungen sind Na-betont, wie z. B. in den Einlagerungskammern 1/750 und 12/750.

In den Einlagerungskammern, in denen das Verhältnis von Zementmenge und der Menge Schutzfluid einen Schwellenwert (etwa 1,25 kg Zement je kg Wasser) erreicht und auch keine Dominanz von Brucit-haltigen Versatzstoffen vorliegt, können sich bis zum Erreichen des Gleichgewichts stark alkalische CaCl_2 -betonte Lösungszusammensetzungen bilden. Hier ist es möglich, dass die pH-Werte bis auf 11 ansteigen. Solche Lösungszusammensetzungen werden sich in den Einlagerungskammern 6/750 und 11/750 ausbilden. In der Einlagerungskammer 4/750 liegen Verhältnisse vor, bei denen sich eine Ca- und Na-betonte Lösungszusammensetzung bilden wird (Tabelle 6.1-1).

Während sich die Unterschiede der Mg- und Na-betonten Lösungszusammensetzungen nur in geringem Ausmaß auf die maximal möglichen Konzentrationen der ausgewählten Radionuklide auswirken, treten in den Ca-betonten Lösungen teilweise relevante Unterschiede im Vergleich zu den anderen Lösungen auf (siehe Kapitel 6.1.3).

Durch Modellrechnungen zu den Fluidbewegungen zwischen den Einlagerungskammern wurde gezeigt, dass sich für 9 Einlagerungskammern keine relevanten Änderungen durch den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern ergeben werden. Dagegen sind in der Einlagerungskammer 10/750 nach etwa 3000 Jahren, in den Einlagerungskammern 4/750 und 7/750 nach etwa 30 000 Jahren und in der Einlagerungskammer 11/750 nach etwa 100 000 Jahren Veränderungen zu erwarten /INE 2006b/.

Mit der Umsetzung der Abfallmatrizes, z. B. des Zementprodukts, nimmt die Verfügbarkeit der Radionuklide bzw. der Schadstoffe in der Lösung zu. Die Mobilisierung als Folge der Korrosion der Abfallmatrix wird in Kapitel 6.1.3 beschrieben.

Tab. 6.1-1: Lösungszusammensetzungen in den Einlagerungskammern nach Umsetzung der reaktiven Kammerinhaltsstoffe im Gleichgewichtszustand /INE 2006a/

	1/750	2/750	4/750	5/750	6/750	7/750	8/750
pH _{EQ3/6}	8,7	8,7	8,9	7,8	11,0	8,6	7,8
log(m _{H+})	-9,4	-9,4	-9,6	-8,7	-11,7	-9,3	-8,7
Ca / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,02	0,02	2,0	0,2	3,5	3,3	0,2
Cl / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	6,5	6,5	7,4	9,2	8,4	8,9	9,4
K / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,8	0,8	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4
Mg / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,5	0,5	0,2	4,0	2·10 ⁻⁵	0,5	4,1
Na / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	4,8	4,8	2,3	0,5	1,1	0,9	0,4
S / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,1	0,1	1·10 ⁻³	2·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴	4·10 ⁻⁴	2·10 ⁻³
CO ₃ ²⁻ / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	1·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁷	5·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁵
HCO ₃ ⁻ / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁸	2·10 ⁻⁵	1·10 ⁻¹¹	3·10 ⁻⁹	3·10 ⁻⁵
C / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	2·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	8·10 ⁻⁶	4·10 ⁻⁴	8·10 ⁻⁶	8·10 ⁻⁶	4·10 ⁻⁴
	10/750	11/750	12/750	2/750Na2	7/725Na2	8a/511	
pH _{EQ3/6}	7,7	11,0	8,7	5,1	7,8	8,7	
log(m _{H+})	-8,7	-11,7	-9,4	-6,1	-8,7	-9,4	
Ca / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,05	3,4	0,02	0,01	2·10 ⁻³	0,02	
Cl / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	9,4	8,3	6,6	9,4	9,1	7,2	
K / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,3	0,4	1,0	0,4	0,5	2,0	
Mg / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	4,3	5·10 ⁻⁵	0,5	4,5	4,2	0,5	
Na / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	0,4	1,2	4,7	0,4	0,5	4,4	
S / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	6·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴	0,1	4·10 ⁻²	0,2	0,1	
CO ₃ ²⁻ / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	1·10 ⁻⁵	5·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁵	3·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁵	
HCO ₃ ⁻ / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	3·10 ⁻⁵	1·10 ⁻¹¹	2·10 ⁻⁵	0,3	3·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁵	
C / mol (kg H ₂ O) ⁻¹	4·10 ⁻⁴	1·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁴	0,6	4·10 ⁻⁴	2·10 ⁻⁴	

pH_{EQ3/6}: pH-Wert definiert über Splitting-Konvention im Pitzer-Formalismus von EQ3/6;

log(m_{H+}): Logarithmus der molalen H⁺-Konzentration

Mikrobielle Degradation

Die Abfälle enthalten zum Teil beträchtliche Mengen organischer Bestandteile, z.B. Papier, Zellulose, Kunststoffe und andere Stoffe /BUC 2006a/. Aus den organischen Bestandteilen können durch mikrobielle Abbauprozesse sowohl CO_2 und CH_4 als auch Carbonatlösungspezies und -festphasen gebildet werden. Für das geochemische Milieu sind insbesondere die anorganischen Kohlenstoffverbindungen von großer Bedeutung. Die Konzentration an gasförmigem CO_2 und gelösten Carbonatspezies werden durch die Ausfällung von Carbonatfestphasen begrenzt. Da die mikrobielle Umsetzung zu CO_2 und Carbonatspezies in Ca- und Mg-reichen Lösungen erfolgt, werden der überwiegende Teil des gelösten CO_2 als Mg/Ca-Carbonat ausgefällt und die pH-Werte gepuffert /INE 2006a/.

Die für die Degradation organischer Bestandteile von den Mikroben benötigten Nährstoffe, wie z.B. Nitrate und Sulfate, sind in den Abfällen, dem Schutzfluid und in den Salzen nur begrenzt enthalten. Die mikrobielle Degradation organischer Bestandteile hat bereits vor der Einlagerung der Abfälle begonnen und wird sich nach dem Verbrauch des Sauerstoffs im anaeroben Milieu fortsetzen /IST 2005b/. Bei realitätsnaher Abschätzung der mikrobiellen Degradation ist unter Berücksichtigung des sich einstellenden geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern eine vollständige Umsetzung des organischen Materials nicht zu erwarten. Unter der unwahrscheinlichen Annahme eines vollständigen Verbrauchs des Nährstoffangebots könnte in einigen Einlagerungskammern die Stoffmenge an CO_2 und gelösten Carbonatspezies die Stoffmenge an Ca^{2+} und Mg^{2+} in der Lösung überschreiten. In diesem Fall wäre eine Abnahme des pH-Wertes in den sauren Bereich nicht auszuschließen /INE 2005b/. Um auch einer solch unwahrscheinlichen Entwicklung entgegen zu wirken, ist vorgesehen, die für eine vollständige Pufferung des „verfügbaren anorganischen Kohlenstoffs“¹³ hinreichend großen Mengen von Mg-Depot einzubringen /GSF 2006e/. In Einlagerungskammer 2/750Na2 kann die notwendige Menge an Mg-Depot nicht eingebracht werden. Deshalb kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich dort eine leicht saure MgCl_2 -reiche Lösung bildet.

In allen Einlagerungskammern (außer 2/750Na2) werden die Konzentrationen an gelösten Carbonat-Ionen, wie z.B. HCO_3^- und CO_3^{2-} , in den Lösungen deutlich begrenzt (Tabelle 6.1-1).

Beeinflussung des geochemischen Milieus durch ein Mg-Depot

Die Wirksamkeit des Mg-Depots wurde für Brucit-Granulat experimentell und mittels thermodynamischer Modellrechnungen nachgewiesen. Experimente haben außerdem bestätigt, dass in Anwesenheit von Brucit und/oder von Sorelphasen die Carbonatkomplexierung und die Lösungskonzentration von Plutonium begrenzt werden. Detaillierte Ausführungen hierzu befinden sich in /INE 2003b/ und /INE2004a/.

¹³ Hierbei wurde angenommen, dass der verfügbare anorganische Kohlenstoff einer Einlagerungskammer gemäß /IST 2005a/ vollständig in carbonatischer Form in der Lösung vorliegt.

Die für die Nachverfüllung der Einlagerungskammern vorgesehenen Mengen Mg-Depot sind ausreichend, um das geochemische Milieu in den Einlagerungskammern im neutralen bis alkalischen Bereich zu puffern – durch Fällung der gelösten anorganischen Kohlenstoffverbindungen als Ca/Mg-Carbonat. Nur in der Einlagerungskammer 2/750Na2 besteht – wie bereits erwähnt – die Möglichkeit, dass der pH-Wert in den schwach sauren Bereich absinkt.

Die Pufferung des pH-Werts in der austretenden Lösung kann auch durch das Einbringen des notwendigen Mg-Depots in die Transportpfade außerhalb der Einlagerungskammer erfolgen /INE 2006a/. In die Transportpfade aus den Einlagerungskammern 2/750Na2 und 7/725Na2, welche mit der Kammer 2/750Na2 hydraulisch stark korrespondiert, werden die für eine Pufferung des pH-Werts im neutralen bis schwach alkalischen Bereich notwendigen Mengen an Mg-Depot eingebracht /GSF 2006e/¹⁴. Geochemische Modellrechnungen zeigen zudem, dass selbst ein sehr intensiver Lösungszutritt aus der Einlagerungskammer 2/750Na2 keine Versauerung in der Einlagerungskammer 7/725Na2 hervorrufen wird.

Umlösung von Kalisalzen

In den Einlagerungskammern 7/750 und 1/750 ist in geringem Ausmaß Carnallit aufgeschlossen. In den Einlagerungskammern 2/750Na2 und 7/725Na2 ist sowohl im anstehenden Übergangssalz als auch im verstürzten Salzversatz etwas Kieserit vorhanden /GSF 2006e/. Im Kontakt mit dem Schutzfluid werden Carnallit und Kieserit nur sehr geringfügig gelöst. Dagegen werden die infolge von Zementkorrosion bzw. Brucitumsetzung an Mg^{2+} und Sulfat verarmten Lösungen durch Umlösung von Carnallit bzw. Auflösung von Kieserit Mg^{2+} und Sulfat wieder aufnehmen. Die verfügbaren Mengen an Carnallit bzw. Kieserit sind jedoch so gering, dass hierdurch die Pufferwirkung in Bezug auf die pH-Werte und Karbonatkonzentrationen nicht wesentlich beeinflusst wird.

Korrosion von Sorelbeton

Für die Errichtung von technischen Barrieren ist die Verwendung von Sorelbeton vorgesehen /GSF 2006e/ /GSF 2006f/. Laboruntersuchungen und Modellrechnungen belegen, dass der Sorelbeton im Schutzfluid chemisch langzeitstabil ist /INE 2002/. Im Kontakt mit neutralen bis schwach alkalischen $MgCl_2$ -reichen Lösungen befindet sich der Sorelbeton nach einem geringfügigen Umsatz von Sorelphasen¹⁵ im chemischen Gleichgewicht mit der Lösung /BAF 2005b/. Im Kontakt mit alkalischen $CaCl_2$ -reichen Lösungen werden die hohen pH-Werte durch Reaktion mit Sorelphasen bis auf einen pH-Wert von etwa 9 verringert. In den Einlagerungskammern 4/750 und 11/750, in die auch Sorelbeton eingebracht werden soll, ist diese Reaktion möglich.

¹⁴ Dies wurde bei der Berechnung des geochemischen Milieus in der Einlagerungskammer 2/750Na2 nicht mit berücksichtigt.

¹⁵ Nach geringem Umsatz von etwa 50 g bzw. 0,24 mol Mg-Oxychlorid pro kg H_2O (in Lösung) befinden sich Sorelbeton und zementbeeinflusste Lösungen in einem stabilen Gleichgewicht /INE 2002/. Dies entspricht der Aussage in /BAF 2005b/, wonach die Langzeitbeständigkeit der stabilen Sorelphase in Salzlösungen mit 0,5 mol Mg^{2+} /kg H_2O nachgewiesen ist.

6.1.3 Ergebnisse für die Mobilisierung von Schadstoffen

Die Mobilisierung bezeichnet den Übergang von Radionukliden bzw. von chemotoxischen Stoffen aus einer im Abfall bzw. in der Abfallmatrix gebundenen Form in eine für den Transport verfügbare Form außerhalb der Abfallgebinde, wie

- gelöst im Porenwasser,
- in ausgefällter Form,
- in sorbierter Form in oder an Umsetzungsprodukten,
- volatil in der Gasphase.

Ein Großteil des Abfallinventars ist in Zement, Beton oder Bitumen fixiert. Die Mobilisierung beginnt mit dem Kontakt von Schutzfluid und Abfallgebinden, wobei die Mobilisierungsrate von der Größe der Kontaktfläche zwischen dem Schutzfluid und der Abfallmatrix abhängt (vgl. auch Kapitel 6.1.2). Die Schadstoffmobilisierung wird durch den Korrosionsfortschritt der Matrices und Verpackungen sowie auch vom geochemischen Milieu bestimmt.

Die für die Mobilisierung bzw. Immobilisierung der Radionuklide sowie der chemotoxischen Schadstoffe relevanten geochemischen Prozesse in den Einlagerungskammern und deren Nahbereich sind in Abbildung 6.1-3 schematisch dargestellt. Die aus den Abfallmatrices mobilisierbaren Schadstoffe unterliegen einer Vielzahl komplexer chemischer Reaktionen, die die Mobilität erhöhen können. Hierzu gehören Redox-, Hydrolyse- und Komplexierungsreaktionen sowie die Bildung von Eigenkolloiden oder die Bindung an Fremdkolloide. Dem entgegen können mobilisierte Schadstoffspezies auf Feststoffoberflächen durch Sorption zurückgehalten oder im Fall von Übersättigungen in neue Festphasen eingebaut werden.

Die Mobilisierung von Caesium, Neptunium und Uran aus zementierten Abfallgebinden wurde in Langzeitexperimenten mit Abfallsimulaten untersucht /KIE 2000/ /KIE 2004/. Aus den Ergebnissen der Experimente und aus kammer-spezifischen Reaktionsfortschrittsrechnungen wird abgeleitet, dass die zementierten Matrices der LAW- und MAW-Gebinde nach etwa 10 bis 15 Jahren vollständig korrodiert sein können. Bei einem eingeschränkten Kontakt des Schutzfluids mit der Abfallmatrix, z.B. bei Ummantelung mit VBA, kann sich die vollständige Korrosion der zementierten Abfallmatrices um 50 bis 100 Jahre verzögern /INE 2006a/. Für bituminierte Abfallmatrices ist die Auslaugung geringer. Das Inventar aus den bituminierten Gebinden wird frühestens nach 50 Jahren verfügbar sein.



Abb. 6.1-3: Relevante geochemische Prozesse für die Freisetzung bzw. Rückhaltung von Radionukliden bzw. chemotoxischen Stoffen in Einlagerungskammern /INE 2006a/.
RN: Radionuklid

Die Mobilisierung der Radionuklide bzw. der Schadstoffe kann zudem durch Löslichkeiten und Sorption begrenzt werden. Nach Modellrechnungen und Laboruntersuchungen stellen sich bei neutralen bis schwach alkalischen pH-Werten von 7 bis 9 für dosisbestimmende Actiniden – wie Americium, Plutonium, Uran – niedrige Löslichkeiten ein und das Sorptionsvermögen ist in diesen Lösungs-Feststoff-Systemen relativ hoch /INE 2003c/ /INE 2005a/ /INE 2006a/. Aus diesem Grund wird das geochemische Milieu durch das Einbringen von Mg-Depot günstig beeinflusst.

Die maximal möglichen Konzentrationen von Americium, Neptunium, Plutonium, Radium, Strontium, Thorium und Uran in den Einlagerungskammern sind unter der Berücksichtigung von Löslichkeiten und Sorption ermittelt worden. Sorptionseffekte wurde für Plutonium und Americium berücksichtigt und der Einfluss auf die maximal möglichen Konzentrationen in den Einlagerungskammern zur sicheren Seite hin abgeschätzt /INE 2006a/. Die Bandbreite der meisten maximal möglichen Konzentrationen beträgt etwa eine Größenordnung nach oben und unten /INE 2006a/.

Der Vergleich der maximal möglichen Konzentrationen mit den inventarbestimmten Konzentrationen¹⁶ in den einzelnen Einlagerungskammern zeigt, dass nur Konzentrationen von Uran, Thorium, Plutonium und vereinzelt Americium begrenzt werden (siehe Abbildungen 6.1-4 bis 6.1-7). Diese Begrenzungen sind wichtig, da diese Radionuklide und deren Zerfallsprodukte die Gesamtaktivität bzw. die Radiotoxizität des Inventars langfristig dominieren und somit die potenziellen Strahlenexpositionen bestimmen werden.

In Abbildung 6.1-4 werden die kammer-spezifisch berechneten, maximal möglichen Am(III)-Konzentrationen unter Berücksichtigung von Löslichkeit und Sorption mit den inventarbestimmten Konzentrationen verglichen. Die maximal möglichen Konzentrationen von Am(III) sind in Mg- und Na-betonten Lösungen sehr ähnlich und wirken aufgrund der unterschiedlichen kammer-spezifischen Inventare nur teilweise begrenzend. Dagegen sind die maximal möglichen Konzentrationen von Am(III) in CaCl₂-betonter Lösung, wie in den Einlagerungskammern 6/750 und 11/750, sowie in einem schwach sauren Milieu – welches in der Einlagerungskammer 2/750Na₂ nicht auszuschließen ist – deutlich höher und wirken deshalb nicht begrenzend.

In Abbildung 6.1-5 werden die kammer-spezifisch berechneten, maximal möglichen Pu(III/IV)-Konzentrationen unter Berücksichtigung von Löslichkeit und Sorption mit den inventarbestimmten Konzentrationen verglichen. Die maximal möglichen Konzentrationen von Pu(III/IV) sind in allen Lösungen sehr ähnlich und wirken in den meisten Einlagerungskammern begrenzend, Ausnahmen sind die Einlagerungskammern 4/750 und 2/750Na₂. In der Einlagerungskammer 4/750 ist das Pu-Inventar zu gering, um die Löslichkeit erreichen zu können. In einem schwach sauren Milieu, welches in Einlagerungskammer 2/750Na₂ nicht auszuschließen ist, ist die maximal mögliche Konzentration von Pu(III/IV) deutlich höher und wirkt daher nicht begrenzend. Die Pufferung des pH-Werts und die Verringerung der Konzentration von Pu(III/IV) durch die Löslichkeit werden auch durch das Einbringen der dafür notwendigen Mengen an Mg-Depot in die unmittelbaren Transportpfade aus der Einlagerungskammer¹⁷ erfolgen /INE 2006a/.

In Abbildung 6.1-6 werden die kammer-spezifisch berechneten U(VI)-Löslichkeiten mit den inventarbestimmten Konzentrationen verglichen. Die Löslichkeiten von U(VI) sind in allen Lösungen gleich und reduzieren die inventarbestimmten Konzentrationen in allen Einlagerungskammern um mindestens eineinhalb Größenordnungen.

In Abbildung 6.1-7 werden die kammer-spezifisch berechneten Th(IV)-Löslichkeiten mit den inventarbestimmten Konzentrationen verglichen. Die Löslichkeiten von Th(IV) sind in Mg- und Na-betonten Lösungen gleich. Dagegen sind die Löslichkeiten von Th(IV) in CaCl₂-betonter Lösung, wie in den Einlagerungskammern 6/750 und 11/750, deutlich höher. Die Löslichkeiten begrenzen die inventarbestimmten Konzentrationen in allen Einlagerungskammern mehr oder weniger stark, jedoch jeweils um mindestens eine Größenordnung.

¹⁶ Quotient aus Radionuklidinventar und Lösungsvolumen.

¹⁷ Der quantitative Nachweis für die Pufferung von Radionuklidkonzentrationen wurde für die Transportpfade aus der Einlagerungskammer 2/750Na₂ bisher nicht geführt.

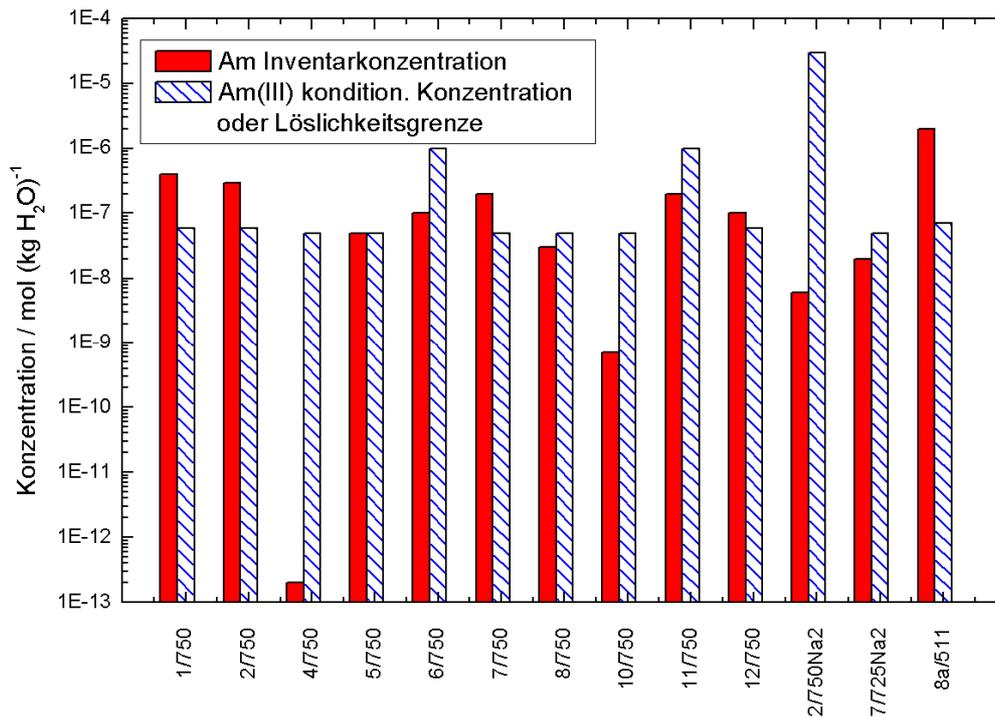


Abb. 6.1-4: Vergleich der kammerspezifischen Am-Inventarkonzentrationen mit maximal möglichen Am(III)-Konzentrationen unter Berücksichtigung von Löslichkeit und Sorption

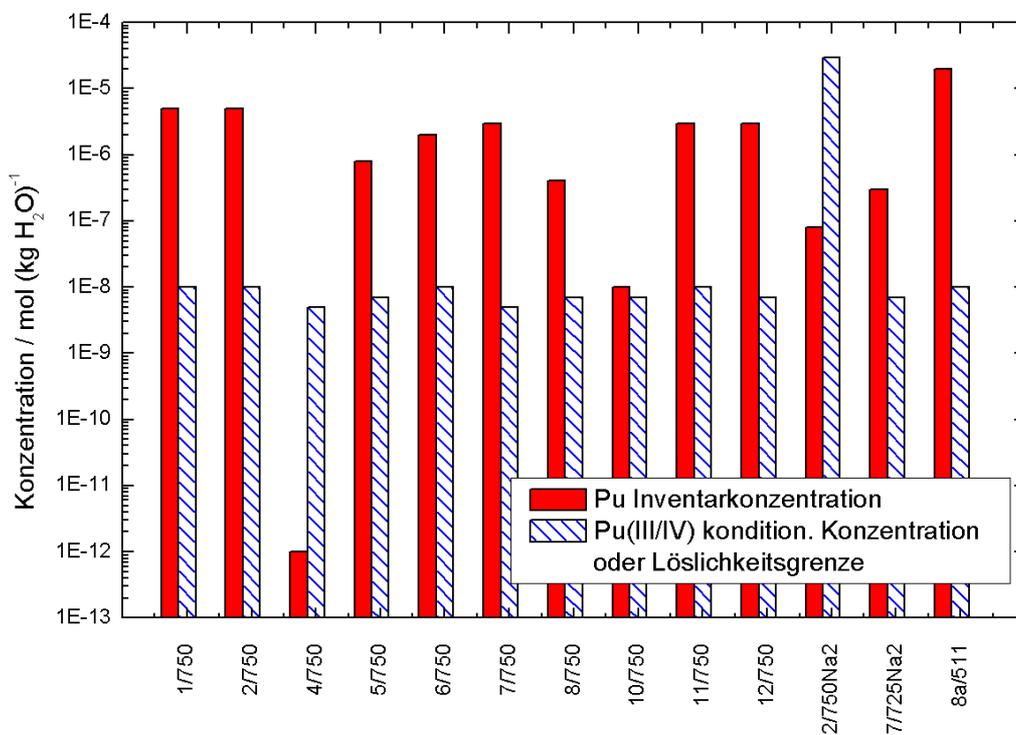


Abb. 6.1-5: Vergleich der kammerspezifischen Pu-Inventarkonzentrationen mit maximal möglichen Pu(III/IV)-Konzentrationen unter Berücksichtigung von Löslichkeit und Sorption. Verhältnisse vor einer möglichen Änderung in der ELK 11/750.

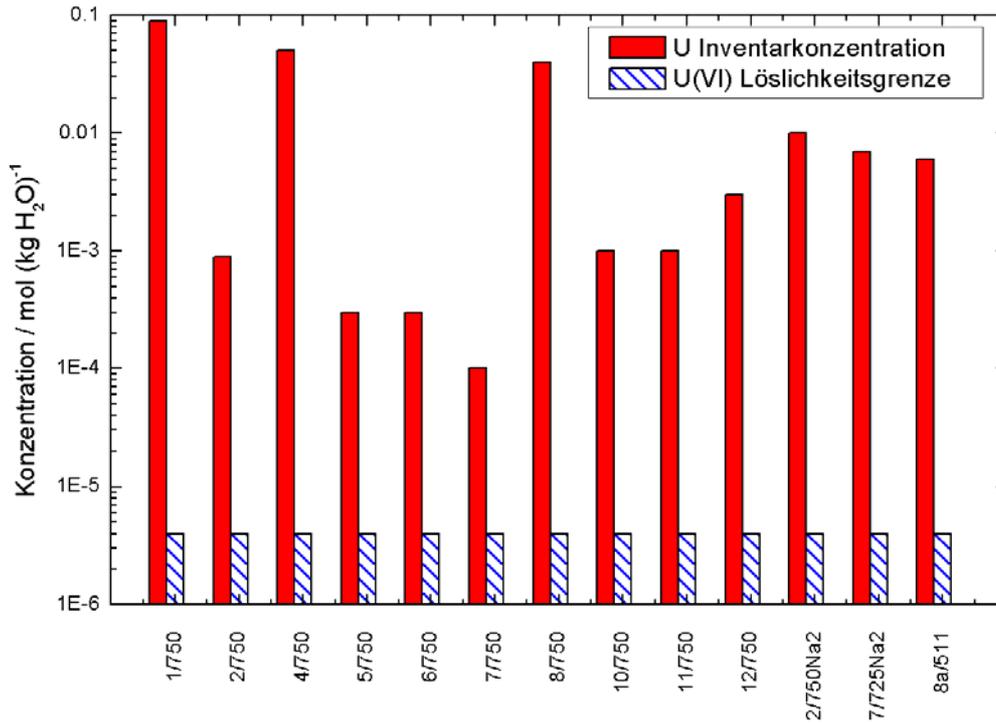


Abb. 6.1-6: Vergleich der kammer-spezifischen U-Inventarkonzentrationen mit U(VI)-Löslichkeitsgrenzen

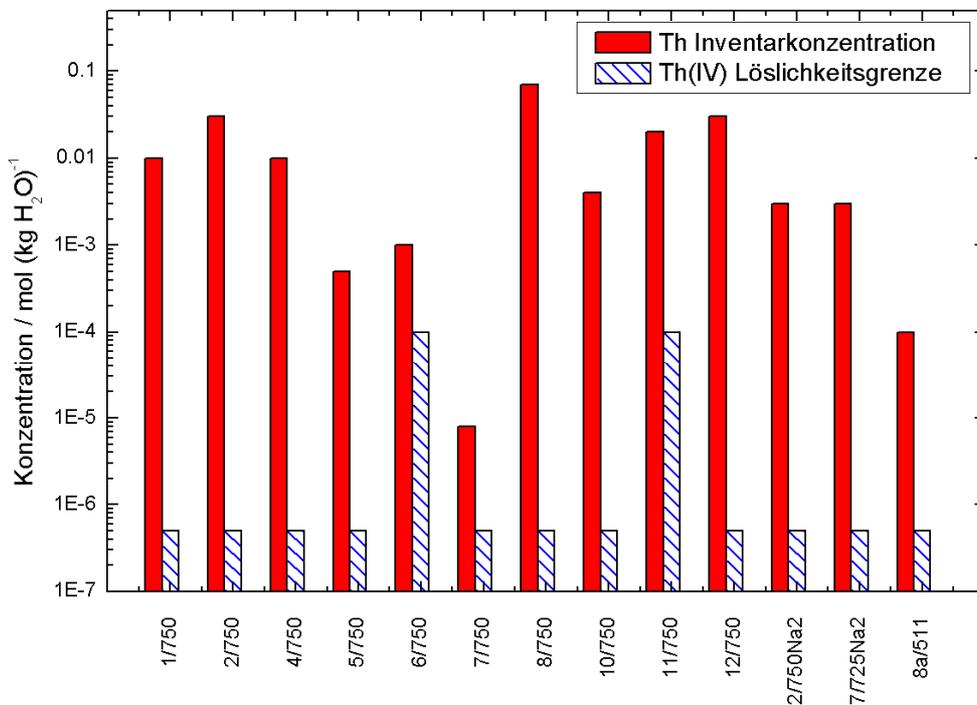


Abb. 6.1-7: Vergleich der kammer-spezifischen Th-Inventarkonzentrationen mit Th(IV)-Löslichkeitsgrenzen

6.2 Ermittlung der Quellterme für die Transportmodellierungen

In den Nachweismodellen werden mehrere benachbarte Einlagerungskammern und Abbaue, die aufgrund der Verhältnisse in der Schachtanlage nicht durch Strömungsbarrieren getrennt werden können und zwischen denen relativ durchlässige hydraulische Verbindungen bestehen, zu Einlagerungsbereichen zusammengefasst (siehe Tabelle 2.1-1). Auf Grundlage der in Kapitel 6.1 ermittelten maximal möglichen Konzentrationen in den Einlagerungskammern werden nachfolgend maximal mögliche Konzentrationen für die Einlagerungsbereiche abgeleitet.

6.2.1 Radionuklid-Quellterm

Die spezifischen Radionuklid-Quellterme für die einzelnen Einlagerungsbereiche sind wichtige Eingangsgrößen für die Berechnung der Konsequenzen einer potenziellen Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad, siehe Kapitel 7.5. Der Radionuklid-Quellterm beschreibt die Konzentrationen der mobilisierten Radionuklide, die durch die Umsetzung der Abfallmatrizes und -behälter entstehen. Sie sind entweder inventarbestimmt oder werden durch die maximal möglichen Konzentrationen begrenzt. Der Radionuklid-Quellterm für einen Einlagerungsbereich beschreibt die Radionuklidkonzentrationen in den Lösungen, die aus diesem Einlagerungsbereich in die angrenzenden Grubenbaue (Nahbereich) austreten.

6.2.1.1 Datenbasis

Die Ableitung der maximal möglichen Elementkonzentrationen für die einzelnen Einlagerungskammern basiert auf thermodynamischen Modellrechnungen, mit denen unter Berücksichtigung der Stoffinventare das sich einstellende geochemische Milieu sowie spezifische Konzentrationen unter Berücksichtigung von Löslichkeit und Sorption für die Elemente berechnet wurden, siehe Kapitel 6.1. Sorptionsprozesse wurden nur für die Bestimmung der maximal möglichen Plutonium- und Americium-Konzentrationen berücksichtigt. Alle für die Ableitung der maximal möglichen Elementkonzentrationen herangezogenen Werte sind ausführlich in /INE 2006a/ erläutert.

Aussagen zur zeitlichen Entwicklung des geochemischen Milieus aufgrund der zufließenden Lösungen aus benachbarten Grubenbauen basieren ebenfalls auf geochemischen Modellrechnungen /INE 2006b/. Eingeflossen sind die Ergebnisse von Modellrechnungen für einzelne, detailliert modellierte LAW-Einlagerungsbereiche mit dem Rechenprogramm KAFKA, mit denen der mögliche Lösungsaustausch zwischen den einzelnen Grubenbauen in einem Einlagerungsbereich quantifiziert wurde /ALSA 2006d/. Die Ableitung der maximal möglichen Elementkonzentrationen und deren zeitliche Entwicklung in den Einlagerungsbereichen ist in /ALSA 2006b/ ausführlich erläutert.

6.2.1.2 Modellierung

Die Vorgehensweise bei der Ableitung der maximal möglichen Elementkonzentrationen berücksichtigt die Strömungsverhältnisse zwischen den Grubenbauen. Jeder Einlagerungsbe-

reich besteht aus Einlagerungskammern und benachbarten Grubenbauen (vgl. Kapitel 2.1.1). Diese werden im Strukturmodell, das den sicherheitsanalytischen Modellrechnungen zugrunde liegt, in einem Modellsegment zusammengefasst. Im Laufe der Zeit wird es sowohl zwischen den Einlagerungsbereichen und dem übrigen Grubengebäude als auch in den Einlagerungsbereichen selbst zu Lösungsströmen kommen, letztere sind mit den Detailmodellen¹⁸ berechnet worden. Außerdem wird Lösung aus den Einlagerungsbereichen ausgepresst, wobei in der Regel Lösungen aus einem Einlagerungsbereich über verschiedene, parallele Wege – aus einer Kammer oder auch aus mehreren Grubenbauen – abfließen können.

Die Rechnungen mit den Detailmodellen zu den Einlagerungsbereichen basieren auf dem Strukturmodell D5a /Asse-Datenbank/, wobei das Baufeld in der Südflanke vereinfacht und der jeweilige Einlagerungsbereich detailliert abgebildet worden sind. Dabei wurden insbesondere die einzelnen Einlagerungskammern und die benachbarten Kammern sowie die Durchhiebe und Auflockerungszonen detailliert nachgebildet. Die räumlichen Verhältnisse in den Einlagerungsbereichen entsprechen der in /GSF 2006k/ beschriebenen Situation. Die Parameterdatensätze basieren auf den Verhältnissen in den Einlagerungsbereichen nach Verfüllung und Einleitung des Schutzfluids auf der 750-m-Sohle. Die für diesen Zeitpunkt angenommene Situation ist in /GSF 2006e/ umfassend dargelegt. Um direkte konvektive Lösungsbewegungen zwischen benachbarten Grubenbauen erfassen zu können, werden Durchhiebe und Auflockerungszonen im Sohlen- und Firstniveau zwischen benachbarten Grubenbauen getrennt modelliert. Wichtige Eingangparameter sind dabei die anfänglichen Lösungsdichten in den einzelnen Grubenbauen, für die begründete Annahmen getroffen wurden (vgl. Kapitel 6.4). Die Datensätze für die Detailmodelle sind in /ALSA 2006d/ aufgeführt.

Die Bilanzierung der Lösungsflüsse zwischen den einzelnen Grubenbauen eines Einlagerungsbereiches und des Lösungsaustausches in den Einlagerungskammern erfolgte dann auf Basis der zeitlichen Entwicklung von kammer-spezifischen Tracerkonzentrationen. Die den einzelnen Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu- und aus diesen abfließenden Lösungsmengen wurden für fünf Zeiträume t_i berechnet /ALSA 2006b/. Für diese Zeiträume wurden daraus die relativen Anteile $A_{ELK,ti}$ der einzelnen Einlagerungskammern an der Gesamtmenge an Lösung ermittelt, die aus dem Einlagerungsbereich im jeweiligen Zeitraum abfließt.

Die maximal möglichen Elementkonzentrationen der Einlagerungsbereiche beziehen sich auf die Konzentrationen in der aus den ELB austretenden Lösung. Damit werden nur die Radionuklidkonzentrationen berücksichtigt, die tatsächlich zu einem Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen heraus beitragen.

Auf Basis der relativen Beiträge $A_{ELK,ti}$ der einzelnen Einlagerungskammern eines Einlagerungsbereiches zur Gesamtmenge an abfließender Lösung sowie der jeweiligen, kammer-spezifisch ermittelten maximal möglichen Elementkonzentration $C_{max}(el)_{ELK,ti}$ wird für jeden

¹⁸ Detailmodelle wurden nur für die Einlagerungsbereiche LAW2, LAW3 und LAW4 erstellt. Auf ein gemeinsames Detailmodell für die Einlagerungsbereiche LAW1A und LAW1B, die hydraulisch stark miteinander vernetzt sind /GSF 2006e/, wurde verzichtet.

Zeitraum t_i die maximal mögliche Gesamtkonzentration des Elementes $c(el)_{ELB,t_i}$ in der Lösung bestimmt, die in dem Zeitraum aus dem Einlagerungsbereich in die übrigen Grubenbaue abfließt:

$$c(el)_{ELB,t_i} = \sum_{ELK} (C_{\max}(el)_{ELK,t_i} \cdot A_{ELK,t_i}) \quad (1)$$

Dieser Zahlenwert unterscheidet sich für die verschiedenen Zeiträume t_i . Um einen einheitlichen Zahlenwert für alle Zeiträume verwenden zu können, wird der maximale Wert für die verschiedenen Zeiträume t_i verwendet und auf die nächste Nachkommastelle aufgerundet. Ausnahmen von dieser generellen Vorgehensweise bestehen in den Fällen, in denen sich aufgrund eines Wechsels im geochemischen Milieu sehr starke Änderungen in elementenspezifischen maximalen Konzentrationswerten ergeben: Da dies zu unnötigen Überschätzungen der Elementkonzentrationen in bestimmten Zeiträumen führen würde, werden hier zeitraum-spezifisch unterschiedliche Werte nach der hier beschriebenen Vorgehensweise ermittelt.

Bei der gewählten Vorgehensweise wurde die Einführung zusätzlicher Konservativitäten weitgehend vermieden, da der Wert praktisch der höchsten berechneten bzw. experimentell bestimmten Konzentration in dem Zeitbereich entspricht, für den das geochemische Milieu gültig ist. Die Vorgehensweise erweist sich wegen der Berücksichtigung relativer Lösungsmengen als robust hinsichtlich einer Variation der Lösungsströme zwischen den einzelnen Grubenbauen in sinnvollen Bandbreiten. Vorteilhaft ist auch, dass die Referenzwerte sowie die oberen und unteren Bandbreitenwerte in konsistenter Weise abgeleitet werden.

6.2.1.3 Ergebnisse

Maximal mögliche Elementkonzentrationen von Americium, Neptunium, Plutonium, Radium, Strontium, Thorium und Uran wurden für die einzelnen Einlagerungsbereiche abgeleitet. Begrenzungen durch Löslichkeiten und Sorptionseffekte werden jedoch nur für Uran, Thorium, Plutonium und Americium auftreten (vgl. Kapitel 6.1). Neptunium, Radium und Strontium sind zwar in die Ableitung des Radionuklid-Quellterms einbezogen worden; die Werte sind jedoch durchweg größer als die inventarbestimmten Konzentrationen und haben deshalb keine begrenzende Wirkung.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in /ALSA 2006b/ ausführlich erläutert. Die daraus resultierenden maximal möglichen Elementkonzentrationen für Uran, Thorium, Plutonium und Americium in den Einlagerungsbereichen sowie ihre oberen und unteren Bandbreiten, sind in Tabelle 6.2-1 zusammengefasst angegeben. Beim MAW-Bereich beziehen sich die Ergebnisse auf eine Variante der Szenariengruppe „Lösungszutritt in die MAW-Kammer“, in der angenommen wird, dass der Lösungspegel ca. 85 % des fluidzugänglichen Hohlraums ausfüllt.

Einzelne dieser maximal möglichen Konzentrationen können sich durch Änderungen des geochemischen Milieus infolge eines anhaltenden Lösungsaustauschs im Porenvolumen der Einlagerungskammern erhöhen /INE 2006b/. Im Einlagerungsbereich LAW2 ist dies nach ca. 3 000 Jahren der Fall. Die Veränderungen des Milieus beeinflussen hier nur die maximal möglichen Konzentrationen von Radium und Neptunium, welche jedoch nicht begrenzend

wirken. Im Einlagerungsbereich LAW3 können Veränderungen nach ca. 30 000 Jahren ein relevantes Ausmaß erreichen. Diese betreffen die maximal möglichen Konzentrationen von Radium, Neptunium und Plutonium, wovon nur letztere begrenzend wirkt. Die Veränderung für das Plutonium ist in Tabelle 6.2-1 angegeben. Der obere Wert entspricht der maximal möglichen Elementkonzentration in dem Zeitraum, in dem das anfängliche geochemische Milieu weitgehend unverändert bleibt. Der untere Wert gibt die maximal möglichen Konzentrationen für den anschließenden Zeitbereich wieder.

Die Unsicherheitsbandbreite der maximal möglichen Elementkonzentrationen beträgt im Allgemeinen etwa eine Größenordnung nach oben und nach unten. Sie leitet sich aus den Ungewissheiten in den thermodynamischen Daten, die den geochemischen Modellrechnungen zu Grunde liegen, ab. Weitere Ungewissheiten, u.A. bezüglich der hydraulischen Eigenschaften in den Einlagerungsbereichen, wirken sich in einem gewissen Maß auf die maximal möglichen Elementkonzentrationen aus. Diese Ungewissheiten liegen jedoch innerhalb der Bandbreite der ermittelten maximalen Elementkonzentrationen.

Tab. 6.2-1: Maximal mögliche Elementkonzentrationen [mol/(kg H₂O)] in Einlagerungsbereichen nach /ALSA 2006b/

		LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4	MAW
Am	Referenzwert	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-7}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$
	obere Bandbr.	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-7}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$
	untere Bandbr.	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$7,0 \cdot 10^{-9}$
Pu	Referenzwert	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$3,0 \cdot 10^{-8}$ $8,5 \cdot 10^{-8*}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$
	obere Bandbr.	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$3,0 \cdot 10^{-7}$ $8,5 \cdot 10^{-7*}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-7}$
	untere Bandbr.	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$	$3,0 \cdot 10^{-9}$ $8,5 \cdot 10^{-9*}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$
Th	Referenzwert	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$7,7 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-7}$
	obere Bandbr.	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$
	untere Bandbr.	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$7,7 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8}$
U	Referenzwert	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
	obere Bandbr.	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
	untere Bandbr.	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$4,0 \cdot 10^{-7}$

* die zweite Konzentrationsangabe gilt nach 30 000 Jahren

Die Inventare der anderen Elemente – wie Neptunium, Radium und Strontium u.v.a. – sind derart gering, dass selbst bei vollständiger Mobilisierung unter den herrschenden Volumenverhältnissen die jeweilige maximal mögliche Elementkonzentration nicht erreicht werden. Die sich einstellenden Elementkonzentrationen sind inventarbestimmt.

In den sicherheitsanalytischen Modellrechnungen wird auf der Basis der Inventare in den Einlagerungsbereichen und dem Lösungsvolumen der Einlagerungsbereiche für das Jahr 2009 jeweils die inventarbestimmte Konzentration errechnet. Der Radionuklid-Quellterm setzt sich zusammen aus dem jeweils niedrigeren Wert von inventarbestimmter Konzentration und maximal möglicher Elementkonzentration des betreffenden Einlagerungsbereichs¹⁹. Die Ergebnisse werden in Kapitel 7.5 verwendet.

6.2.2 Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe

Die in der Schachanlage eingelagerten Abfälle und die Versatzstoffe enthalten chemische und chemotoxische Bestandteile. Im Kontakt der Abfallgebände und Versatzstoffe mit dem Schutzfluid können diese Bestandteile mobilisiert werden, sich mit der Fluidbewegung im Grubengebäude und im Deckgebirge ausbreiten und eventuell zu einer unzulässig hohen Verunreinigung des Grundwassers durch bestimmte chemische Stoffe führen.

In diesem Kapitel wird dargelegt, welche Anteile der chemischen und chemotoxischen Stoffe aus den Abfallgebänden und den Versatzstoffen in den Einlagerungsbereichen mobilisiert werden können. Der Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe beschreibt die Konzentrationen der mobilisierten wasserrechtlich relevanten Stoffe, die durch die Umsetzung der Abfallmatrices und -behälter entstehen. Sie sind entweder inventarbestimmt oder werden durch maximal mögliche Stoffkonzentrationen begrenzt. Im Quellterm sind sie definiert als Stoffkonzentrationen in Lösungen, die aus den einzelnen Einlagerungsbereichen in die angrenzenden Grubenbaue austreten.

6.2.2.1 Vorgehen und Datenbasis

Die chemischen und chemotoxischen Stoffe und deren Inventare sind in Kapitel 2.1.2 genannt. Die Ermittlung des Quellterms für chemische und chemotoxische Stoffe erfolgte für jeden der Einlagerungsbereiche separat – unter Berücksichtigung der Abfallgebände sowie des noch einzubringenden Mg-Depots und Schutzfluids.

Die Vorgehensweise und die Datenbasis sind in /BUC 2006a/ umfassend beschrieben. Es wurde angenommen, dass die chemischen und chemotoxischen Bestandteile in den Einlagerungskammern nach Einleitung des Schutzfluids sofort, d.h. ohne Verzögerung, in Lösung übergehen können. Die Berechnungen zur maximalen Mobilisierung der chemischen und chemotoxischen Stoffe erfolgten mit einem einfachen Modellansatz:

- Berechnung der inventarbestimmten Konzentrationen unter der Annahme einer vollständigen Auflösung des Stoffinventars,
- Berechnung der stoffspezifischen Konzentrationen unter Berücksichtigung der Löslichkeiten in reinem Wasser für Stoffe, die keine Chlorokomplexe bilden, sowie für Stoffe, deren charakteristische Löslichkeit aufgrund ihres Lösungsverhaltens in reinem Wasser vorgegeben ist (siehe /BUC 2006a/), und

¹⁹ Genau genommen wird die Summe der Radionuklidkonzentrationen eines Elements mit der zugehörigen maximal möglichen Elementkonzentration verglichen.

- Berechnung der stoffspezifischen Konzentrationen unter Berücksichtigung der Löslichkeiten in MgCl_2 -gesättigten Lösungen aus experimentellen Ergebnissen sowie die Ermittlung der realen Löslichkeiten aus dem Lösungsverhalten von Stoffen unter den zu erwartenden geochemischen Milieubedingungen in den Einlagerungskammern (siehe /BUC 2006a/).

Bei den Berechnungen der Konzentrationen werden die Eigenschaften des geochemischen Milieus, insbesondere die Bandbreite der pH-Werte, berücksichtigt (vgl. Kapitel 6.1). Die Wechselwirkungen zwischen den chemischen und chemotoxischen Stoffen untereinander sowie deren Sorption an anderen Feststoffen wurden dagegen nicht berücksichtigt.

Um die möglichen Entwicklungen des Systems umfassend zu berücksichtigen, wurde der wenig wahrscheinliche Fall des Eindringens von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer einbezogen (vgl. Kapitel 5.2.3).

6.2.2.2 Modellierung

Die Ermittlung der maximal möglichen Mobilisierung chemischer und chemotoxischer Stoffe erfolgte mittels eines Ausschlussverfahrens, das in /BUC 2006a/ ausführlich beschrieben ist. Über die drei o.g. Schritte wurden die maximalen Stoffkonzentrationen der wasserrechtlich relevanten Stoffe schrittweise eingegrenzt:

Zunächst wurden die inventarbestimmten Lösungskonzentrationen der Stoffe des Inventars in dem jeweiligen Einlagerungsbereich ermittelt. Obwohl sich das Gesamtinventar in den Einlagerungsbereichen aus chemisch komplex reagierenden Stoffsystemen zusammensetzt, wo sowohl leicht lösliche als auch schwer lösliche Verbindungen entstehen können, wurde die vollständige Auflösung der Stoffe, unabhängig von ihrer realen Löslichkeit, unterstellt. Dadurch wurden maximale Stoffkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen ermittelt. Diese maximalen Stoffkonzentrationen wurden anhand der folgenden Kriterien geprüft und ggf. durch realistischere Konzentrationen substituiert.

Als erstes Kriterium wurden die Löslichkeiten von Stoffen in reinem Wasser betrachtet, die unter den chemischen Bedingungen in den Einlagerungsbereichen keine Chlorokomplexe und deren Hydrolyseprodukte bilden können, sowie auch von Stoffen, deren charakteristische Löslichkeit aufgrund ihres Lösungsverhaltens in reinem Wasser vorgegeben ist. Die für diese Stoffe ermittelten Löslichkeiten in reinem Wasser können auf MgCl_2 -reiche Lösung übertragen werden, da die so ermittelten Löslichkeiten höher sind als die potenziellen Löslichkeiten in hochsalinen Lösungen, wie z.B. dem Schutzfluid.

Als zweites Kriterium wurden die Löslichkeiten in MgCl_2 -reichen Lösungen für die Stoffe bestimmt, die mit Schutzfluid reagieren oder deren Konzentrationen aus Eluattests für typische Abfallzusammensetzungen bzw. aus Auslaug- und Korrosionsexperimenten an zementierten Gebinden bekannt sind.

Da die Chemotoxizität von Uran deutlich die Radiotoxizität übersteigt, wurde die Löslichkeit von Uran ebenfalls einbezogen. Die hier berücksichtigten Löslichkeiten von Uran entsprechen der oberen Bandbreite des Radionuklid-Quellterms (vgl. Kapitel 6.2.1).

Bei der Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen wurde die Ungewissheit bezüglich des Inventars mit einheitlich +50 % berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.1.2). Hierzu wurden die mit den Referenzwerten der Inventare (Tabellen 2.1-3 und 2.1-4) ermittelten Konzentrationen der wasserrechtlich relevanten Stoffe nicht mit 100 %, sondern mit 67 % der Prüfwerte für Grundwasser bzw. Grenzkonzentrationen für Trinkwasser verglichen.

6.2.2.3 *Ergebnisse der Modellrechnungen*

Die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in /BUC 2006a/ ausführlich erläutert. Der daraus resultierende Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe in den einzelnen Einlagerungsbereichen ist in Tabelle 6.2-2 aufgeführt.

Bei der Ableitung dieses Quellterms wurden alle stofflichen Anteile der Abfälle, der Abfallbehälter, der verwendeten Fixierungsmittel sowie des noch einzubringenden Mg-Depots und Schutzfluid in den Einlagerungsbereichen berücksichtigt.

Die Stoffe und die die jeweilige Löslichkeit begrenzenden Verbindungen in reinem Wasser sind in /BUC 2006a/ aufgeführt. Hier wurden Konzentrationsbegrenzungen für solche Stoffe wie z.B. Kobalt, Sulfat, Nitrat und Cyanid ermittelt.

Die Stoffe und die löslichkeitsbegrenzenden Verbindungen in $MgCl_2$ -reichen Lösungen unter den spezifischen Milieubedingungen sowie die für diese Ableitung herangezogenen Experimente sind in /BUC 2006a/ aufgeführt. Hier wurden Konzentrationsbegrenzungen für solche Stoffe wie Selen, Bor, Chlor und Ammonium ermittelt. Die Konzentrationen einiger weiterer Stoffe, wie z.B. Barium, Magnesium und Phosphat, werden bei der Reaktion mit Schutzfluid durch die Bildung schwer löslicher Verbindungen begrenzt.

Das einfache Berechnungsmodell führt zum Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe. Die maximalen Stoffkonzentrationen sind entweder inventarbestimmt oder werden durch Löslichkeiten begrenzt. Die berechneten Stoffkonzentrationen sind zumeist deutlich überschätzt.

Der Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe ist Basis für die Berechnung der potenziellen Konzentrationen dieser wasserrechtlich relevanten Stoffe im oberflächennahen Grundwasser, siehe Kapitel 7.4. Für die Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen wird ein Übertritt der Stoffe in das oberflächennahe Grundwasser am Standort Asse angenommen.

Tab. 6.2-2: Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe in Einlagerungsbereichen (maximale Stoffkonzentrationen bezogen auf Wasseranteil des Schutzfluids) nach /BUC 2006a/, gerundet

Stoff	MAW	LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4
[mg/kg H ₂ O]						
Anorganische Stoffe						
Ag	2,42	0,912	0,567	14,4	12,2	14,4
Al	308	310	262	341	287	375
As	11,3	3,12	4,57	31,4	9,66	17,0
B	129	537	179	690	628	1 780
Ba	4,52	4,52	4,52	8,40	4,52	6,04
Be	0,0023	0,064	0,0252	0,153	0,0252	0,0034
Bi	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15	8,15
BrO ₃	1,16	1,27	1,47	1,71	1,26	3,22
Ca	1 730	1 320	1 300	1 340	1 350	1 400
Cd	0,935	0,894	0,354	1,78	0,643	3,0
Cl	347 000	350 000	357 000	365 000	350 000	418 000
CN GESAMT	0,0	0,640	0,0	0,763	0,763	0,763
Co	59,0	49,7	13,0	59,0	59,0	59,0
Cr	148	75,1	64,2	95,3	127	131
Cr (VI)	1,07	0,216	0,101	0,254	0,805	0,810
Cs	11,7	4,85	5,82	9,59	10,3	29,8
Cu	69,7	2,07	2,07	12,0	6,80	12,8
F	550	15,8	11,9	29,6	53,8	101
Fe	210	106	88,6	113	126	142
Hg	0,0479	0,0192	0,0332	0,0650	0,0458	0,255
K	21 700	9 810	7 800	9 900	26 000	22 100
Li	100	43,0	18,3	43,2	101	129
Mg	121 000	122 000	124 000	127 000	122 000	145 000
Mn	31,3	0,625	0,628	1,40	2,77	5,48
Mo	74,2	5,85	5,31	17,7	31,6	53,3
Na	123 000	16 100	11 900	18 700	42 200	52 400
NH ₄	32,7	541	60,5	432	660	1 650
Ni	32,9	0,814	0,818	1,63	3,06	5,89
NO ₂	0,0698	149	17,0	115	127	386
NO ₃	250 000	2 020	456	8 220	19 200	45 000

Tab.6.2-2: Quellterm für chemische und chemotoxische Stoffe in Einlagerungsbereichen (maximale Stoffkonzentrationen bezogen auf Wasseranteil des Schutzfluids) nach /BUC 2006a/, gerundet (Fortsetzung)

Stoff	MAW	LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4
			[mg/kg H ₂ O]			
Pb	14,2	14,2	14,1	16,7	14,2	15,3
PO ₄	1 360	183	77,1	255	597	1 120
Rb	190	44,6	28,6	59,2	145	183
Sb	7,18	7,18	3,57	7,18	7,18	7,18
Se	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368	0,368
SiO ₂	132	132	132	132	132	132
Sn	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475	0,475
SO ₄	37 300	38 200	37 800	39 100	38 700	44 700
Te	0,195	1,36	1,80	1,80	1,31	1,80
Ti	0,191	0,297	0,297	0,297	0,297	0,297
Tl	0,156	0,0227	0,0043	0,0285	0,115	0,114
U	26,3	24,2	23,9	24,2	26,4	25,8
V	28,0	7,22	1,42	8,63	28,0	28,0
Zn	78,0	9,34	8,99	11,3	14,0	22,9
Organische Stoffe:						
ANT	0,0	102	10,2	80,1	112	286
ANT+NIT	2 400	305	32,7	300	488	1 220
AOX	0,0655	0,0655	0,0655	0,0655	0,0655	0,0655
BTEX G	5,42	19,0	2,13	59,8	19,9	85,4
DOC G	6 360	1 510	1 130	2 410	1 520	8 470
EDTA/SALZE	15,8	0,0506	0,0138	0,450	1,17	2,18
LHKW G	2,78	10,2	3,0	57,7	10,6	55,5
MINER.ÖL-KW	0,0	22,1	22,1	22,1	22,1	22,1
NIT	2 400	204	22,5	220	375	935
OCLV G	2,78	10,2	3,0	57,7	10,6	55,5
SOS G	28 200	4 520	2 920	7 210	6 050	32 300

6.3 Gasbildung

Die Gasbildung ist ein transportbeeinflussender Prozess, der in den Modellrechnungen zur Fluidbewegung und Schadstoffausbreitung berücksichtigt werden muss (Kapitel 5.3). Zum einen wird durch die Speicherung von gebildeten Gasen ein Teil der im Porenraum vorhandenen Lösung verdrängt. Die Gasbildung stellt in diesem Fall einen der Antriebsprozesse für Lösungsbewegung dar und beeinflusst die Ausbreitung von Schadstoffen über den Lösungspfad (Kapitel 7.5). Die Gasbildung selbst ist Voraussetzung für die Ausbreitung von Schadstoffen über den Gaspfad (Kapitel 7.6).

6.3.1 Datenbasis

Im Grubengebäude werden durch mehrere Prozesse Gase gebildet. Die Prozesse sind

- Korrosion von Metallen unter Bildung von Wasserstoff,
- mikrobielle Zersetzung von organischen Bestandteilen,
- radiolytische Spaltung von Molekülen der Abfallmatrices, der Versatzstoffe und der Lösung sowie
- Bildung von Helium und radioaktiven Gasen durch den radioaktiven Zerfall.

Eine thermische Gasbildung kann aufgrund des Fehlens von wärmeentwickelnden Abfällen in der Schachanlage Asse ausgeschlossen werden.

Maßgebend für die möglichen Gasmengen sind die Inventare an Gas bildenden Stoffen und die der notwendigen Reaktanden. Der Ablauf der chemischen Reaktionen ist von entscheidender Bedeutung sowohl für die Gasausbeute als auch für die Gasbildungsrate.

Für die Metallkorrosion sind die Inventare an Eisen, Aluminium und Zink wichtig und in /BUC 2004/ dokumentiert. Eine vollständige Umsetzung dieser Metalle während langer Zeiten unter den Bedingungen in der Schachanlage Asse steht außer Frage. Die spezifischen Korrosionsraten werden jedoch von den geochemischen Bedingungen und die Gasbildungsrate weiterhin von den zur Verfügung stehenden Oberflächen bestimmt. Korrosionsraten unter salinen Bedingungen wurden in Laborexperimenten und an realen Abfallgebänden untersucht /SCH 1997/, /BRA 2003/, /KAN 1999/, /ROD 1999/ und sind auf die Standortbedingungen anwendbar.

Die mikrobielle Gasbildung wird von dem Inventar an organischen Stoffen in den Abfällen und in den übrigen Grubenbauen bzw. von deren Kohlenstoffgehalt bestimmt. Die Abfälle beinhalten eine Vielzahl organischer Bestandteile, wie Zellulose, Mischabfälle, Bitumen und Plaste, die naturgemäß unterschiedliche Abbau- und Gasbildungsraten haben und daher nur pauschal erfasst werden können. Die organischen Stoffe in den übrigen Grubenbauen sind vor allem Holzbauteile.

Die Abbauraten einiger Substanzen sind experimentell bestimmt /GIL 2001/, /BRA 2003/. Die Gasbildungspotenziale für unvollständige mikrobielle Umsetzungen wurden mit Hilfe von Analogiebetrachtungen als plausibel abgeleitet. Dabei wurde zurückgegriffen auf experimentelle Untersuchungen und Messungen an Fässern mit radioaktiven Abfällen, aber auch auf Erfahrungen aus der konventionellen Deponietechnik sowie aus der Auswertung natürlicher Analoga /IST 2005b/.

Eine Besonderheit der mikrobiellen Gasbildung besteht in der variablen Zusammensetzung des gebildeten Gases, das vorwiegend aus flüchtigen Verbindungen, vor allem CO_2 und CH_4 besteht. Gasvolumina von Nebenprodukten, wie z.B. N_2 oder H_2S , sind vernachlässigbar gering. Die Volumina an CO_2 und CH_4 können je nach Intensität und Ablauf der mikrobiellen Gasbildung stark variieren, da eine Bandbreite von praktisch keiner Umsetzung bis zu einer fast vollständigen Umsetzung der organischen Bestandteile denkbar ist. Daher ist es sinnvoll, eine Referenzentwicklung unter realistischen Annahmen abzuleiten.

Die radiolytische Spaltung, Bildung von Helium und radioaktiven Gasen werden direkt vom radioaktiven Inventar bestimmt. Über das radioaktive Inventar und eine konservative Annahme zur H_2 -Bildung durch radiolytische Spaltung von Wasser mittels eines $G(\text{H}_2)$ -Wertes für saline Lösungen kann eine Obergrenze der Gasbildung abgeschätzt werden. Die Bildung von Helium und anderen radioaktiven Gasen werden aufgrund des geringen zu erwartenden Beitrags zur Gasbildung vernachlässigt.

6.3.2 Grundlagen der Modellierung

Die Korrosion von Metallen und die Degradation organischer Bestandteile finden in einem gewissen Umfang bereits seit der Einlagerung der Abfälle statt. Dadurch ist ein geringer Teil der Gas bildenden Stoffe bereits vor dem Einleiten des Schutzfluids verbraucht. Die Modellierung der Gasbildung unter realistischen Bedingungen berücksichtigt eine entsprechende Reduktion /IST 2005b/.

Die Gasbildungsraten durch Metallkorrosion und mikrobielle Degradation organischer Stoffe hängen wesentlich von den geochemischen Bedingungen, vor allem vom pH-Wert sowie vom Redoxpotenzial, und von den aktiven Oberflächen ab. Umgekehrt beeinflussen die Umsetzung von organischem Kohlenstoff zu anorganischem Kohlenstoff (CO_2) und die Korrosion die pH-Bedingungen. Die pH-Werte in den Einlagerungskammern werden nach wenigen Jahren als weitgehend stabil angenommen.

In den Einlagerungskammern befinden sich rd. 20 000 t Metalle und 6 500 t organisches Material /BUC 2004/. Außerhalb der Einlagerungskammern betragen die Gas bildenden Stoffe rund 1000 t Metalle und 750 t mikrobiell abbaubare Stoffe /GSF 2003b/. Das sich außerhalb der Einlagerungsbereiche bildende Gasvolumen ist somit deutlich geringer. Wegen des schwach sauren pH-Wertes im Tiefenaufschluss und oberhalb der 700-m-Sohle dürfte die Metallkorrosion hier schneller ablaufen als in den Einlagerungskammern, wo wegen des Mg-Depots (Brucit als Suspension und Granulat) und der Zersetzung der Zementmatrix der Abfälle neutrale bis alkalische Verhältnisse herrschen (vgl. Kapitel 6.1). Gleichwohl dominiert

aber auch zu frühen Zeiten die Gasbildung in den Einlagerungskammern gegenüber der Gasbildung außerhalb dieser /IST 2005b/.

Gemäß Referenzentwicklung wird Schutzfluid in die LAW-Einlagerungskammern eingeleitet (vgl. Kapitel 4.1); dagegen erfolgt während der Einleitung des Schutzfluids in das Baufeld in der Südflanke kein nennenswerter Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer, da ein Entweichen der im Fasskegel eingeschlossenen Grubenluft nicht möglich ist. (vgl. Kapitel 6.6).

Für die Einlagerungskammern wird die Gasbildung für separate zeitliche Phasen ermittelt, in denen von jeweils konstanten geochemischen Randbedingungen ausgegangen wird. Zur Ermittlung einer abdeckenden Bandbreite der Gasbildung wurde die Variationsbreite der erwarteten pH-Werte in den Modellrechnungen zu Grunde gelegt /IST 2005b/.

6.3.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

Die unter realistischen Annahmen langfristig zu erwartende Gasbildung und deren Verlauf in den Einlagerungskammern und im restlichen Grubengebäude wurden auf der Basis der Inventare an gasbildenden Stoffen in Modellrechnungen für anaerob-geflutete Bedingungen ermittelt. Ausnahme ist die MAW-Kammer, in der von anaerob-trockenen Bedingungen ausgegangen wird (siehe oben). Die Modellierung der radiolytischen, korrosiven und mikrobiellen Prozesse zur Gasbildung gibt einen zeitlichen Verlauf der Gasbildung in den Einlagerungskammern der SchachanlageASSE wieder /IST 2005b/. Die Bandbreite, die sich aufgrund der Variabilität der pH-Bedingungen ergibt, ist in Abbildung 6.3-1 dargestellt und in /IST 2005b/ detailliert erläutert. Die erwartete Bandbreite der gesamten durch die drei genannten Prozesse gebildeten Gasmenge liegt bei realistischen Annahmen bei etwa 9 bis 10 Millionen Kubikmeter (STP) nach 100 000 Jahren. Hinzu kommt die Gasmenge, die außerhalb der Einlagerungskammern gebildet wird, von etwa 0,5 Millionen Kubikmeter nach 100 000 Jahren.

Die Netto-Gasbildung startet mit dem Einsetzen anaerober Bedingungen durch Einbringung von Schutzfluid in die LAW-Einlagerungskammern im Jahr 2009 /PLA 2006b/. Die vorher gebildeten Gase werden aufgrund der Verbindung der Kammeratmosphäre mit dem Grubengebäude der Schachanlage mit den Abwettern in die Umgebung abgeführt.

Unter Annahme einer vollständigen Umsetzung von organischen Bestandteilen bei maximal möglicher CO₂-Bildung erhöht sich die mikrobielle Gasbildung und damit der mikrobiell gebildete Anteil am gesamten Gasvolumen deutlich (Abbildung 6.3-1). Diese Entwicklung wird allerdings als unwahrscheinlich erachtet, da eine vollständige Umsetzung der organischen Bestandteile nicht erfolgt und die maximal mögliche CO₂-Menge auch nicht annähernd gebildet wird. Diese theoretische Modellannahme einer maximal möglichen Bildung von gasförmigem CO₂ wurde getroffen, um den Einfluss der Bandbreiten der Standortbedingungen, des Modellansatzes und der Berechnungsmodi auf die Gasbildung auszuloten.

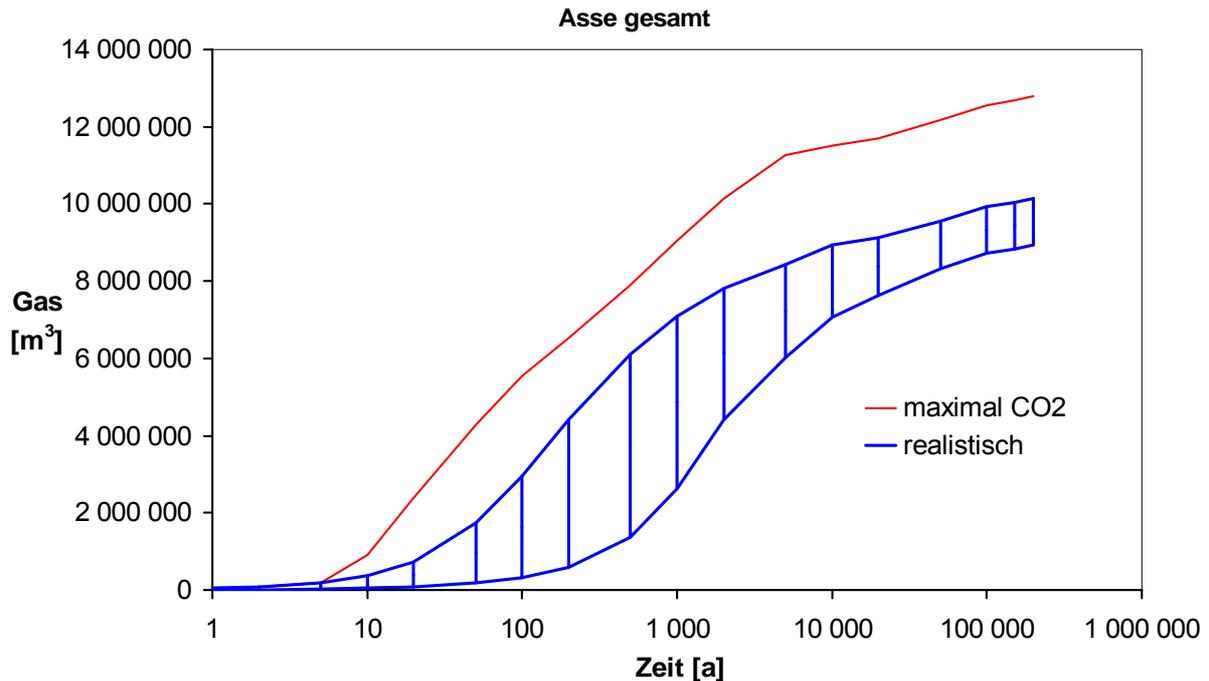


Abb. 6.3-1: Vergleich der realistischen Gasbildung und der Gasbildung unter Annahme der vollständigen Umsetzung des organischen Materials mit maximaler CO₂-Bildung (Volumenangabe für Normaldruck und Temperatur 35°C)

Unter den Bedingungen im Grubengebäude dominiert somit die Gasbildung durch Metallkorrosion den gesamten Betrachtungszeitraum (Abbildung 6.3-2). Die maximale Gasmenge, die durch Korrosion gebildet werden kann, beträgt etwa 10,5 Millionen Kubikmeter unter Standardbedingungen. Bei realistischen Annahmen ist diese Gasbildung nach 100 000 Jahren kleiner, da die Umsetzung noch nicht abgeschlossen ist. Die radiolytische Gasbildung und die mikrobielle Gasbildung – letztere bei realistischen Annahmen zur Umsetzung von organischen Bestandteilen zu gasförmigem CO₂ und CH₄ – ergeben deutlich geringere Gasvolumina.

Für die unter realistischen Annahmen erwarteten langfristigen Bedingungen in den Einlagekammern wird – wie nachfolgend begründet wird – davon ausgegangen, dass bei der Umsetzung der organischen Bestandteile ein vergleichbares Gasvolumen an CO₂ und CH₄ entstehen wird //IST 2005b/.

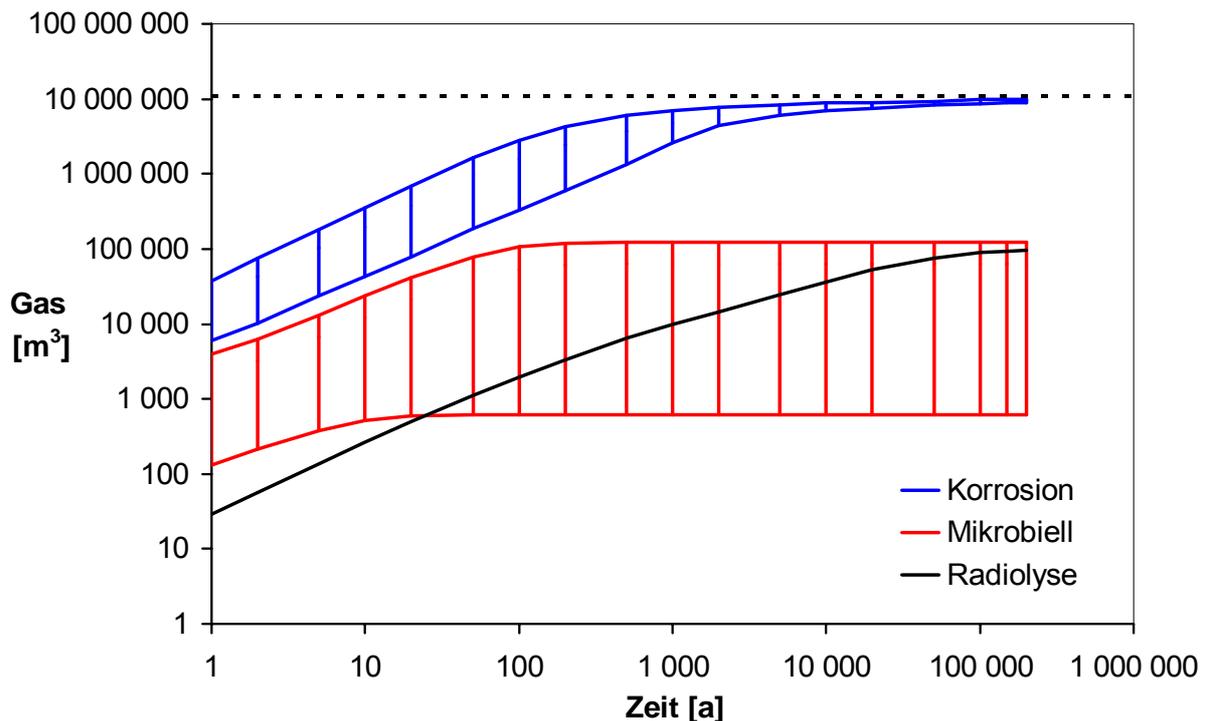


Abb. 6.3-2: Bandbreite der Gasbildung in den Einlagerungskammern der SchachanlageASSE nach Herkunft unter realistischen Bedingungen

Die mikrobielle Zersetzung bevorzugt Abbauprozesse mit hohem Energiegewinn. Deshalb wurde trotz der langfristig zu erwartenden reduzierenden Bedingungen angenommen, dass die Nitrat-, Sulfat- und Eisen(III)-Verbindungen in Abfällen und Versatzstoffen auch auf die organischen Bestandteile oxidierend wirken, wodurch CO_2 entstehen würde. Die verfügbare Menge an Oxidantien ist in den Einlagerungskammern jeweils unterschiedlich; insgesamt können jedoch maximal rd. 46 % des organischen Kohlenstoffs zu CO_2 umgesetzt werden /IST 2005b/. Entstehendes CO_2 wird quasi sofort durch den Überschuss von Mg- und Calciumen in Lösung quantitativ gepuffert und als Karbonat ausgefällt /INE 2004a/, /INE 2005a/, /INE 2006a/. Langfristig ist nach Verbrauch der Oxidantien eine Methanogenese denkbar, die noch verfügbares CO_2 oder verbleibende organische Bestandteile zu CH_4 umwandelt²⁰. Es wird allerdings - wie vorstehend schon beschrieben - als unwahrscheinlich erachtet, dass die maximal mögliche CO_2 - oder CH_4 -Menge auch nur annähernd gebildet wird. Ein geringer Teil des gebildeten CH_4 kann physikalisch gelöst sein und ist dann für die Gasphase nicht verfügbar²¹.

Die Gasbildung in der MAW-Einlagerungskammer geht in der Referenzentwicklung von trockenen Verhältnissen aus (vgl. Kapitel 6.6). Dies führt zu einer erheblichen Verzögerung

²⁰ Es erfolgt eine Abnahme des Gesamtgasvolumens durch den möglichen Verbrauch von korrosiv gebildetem Wasserstoff. Dies wurde bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

²¹ Der Übergang von CH_4 in die Lösungsphase wurde nicht quantifiziert.

bzw. Verringerung der Gasbildung im Vergleich zu den LAW-Einlagerungskammern /IST 2004/. Die Gasbildung wirkt dem Vordringen von Lösung in den MAW-Fasskegel zusätzlich entgegen. Für das alternative Szenario eines Lösungszutritts in den MAW-Fasskegel wurde die Gasbildung auf Basis der Inventare an gasbildenden Stoffen für anaerob-geflutete Bedingungen ermittelt.

Die unter den als realistisch erachteten Bedingungen zu erwartende Gesamtgasbildung wird als Referenzentwicklung im Strömungs- und Transportmodell für das Nahfeld durch entsprechende Fitfunktionen für jeden Einlagerungsbereich übernommen (vgl. Kapitel 7.5). Die mikrobielle Gasbildung unter realistischen Annahmen und das zu erwartende Verhältnis von CO₂ und CH₄ sind die Grundlage für die Referenzentwicklung der Schadstoffausbreitung über den Gaspfad (vgl. Kapitel 7.6). Zusätzlich werden auch die Auswirkungen der Gasbildung bei maximal möglicher CO₂-Bildung untersucht.

Die Gasbildung außerhalb der Einlagerungskammern kann aufgrund der geringen Menge hier vernachlässigt werden /IST 2005b/.

6.4 Konvektion im Grubengebäude

6.4.1 Zielsetzung, Vorgehen und Datenbasis

Konvektive Lösungsbewegungen treten auf, wenn sich bei ausreichend hoher Permeabilität Bereiche mit niedriger Lösungsdichte seitlich angrenzend oder unterhalb von Bereichen mit hoher Lösungsdichte befinden²². Sie können entstehen durch

- Umlösung an anstehendem Salzgestein, insbesondere Carnallitit,
- Auflösung von Kalisalzen im Salzversatz,
- Umsetzung von Zement und Mg-Depot und
- thermische Gradienten.

Konvektive Lösungsbewegung aufgrund des natürlichen thermischen Gradienten in der Salzstruktur kann ausgeschlossen werden /COL 2006b/.

Durch das Einbringen eines Schutzfluids, dessen Zusammensetzung in der Nähe des invarianten Punktes R im quinären System (genauer in der Nähe des invarianten Punktes IP19 des hexären Systems) liegt, ist die Entstehung von nennenswerten Dichteunterschieden durch Umlösungen am anstehenden Salzgestein, insbesondere am Carnallitit (vgl. /ERC 2005/), sowie durch Auflösung von Kalisalzen im Salzversatz der Halde Ronnenberg (Fremdversatz) ausgeschlossen.

²² Der Prozess des dichtebedingten Aufstiegs von Gas und der daran gekoppelten, durch Verdrängen von Lösung verursachten Bewegung von Lösung nach unten wird hier nicht als konvektive Lösungsbewegung bezeichnet. Dieser Prozess wird unter der Bezeichnung „Verdrängen von Lösung durch Gasspeicherung“ berücksichtigt.

Dichteunterschiede bilden sich jedoch durch Wechselwirkungen des Schutzfluids mit Brucit (Mg-Depot) in Verbindung mit Nachlösung von Halit sowie durch Wechselwirkung mit Zement /COL 2006b/. Je nach Mengenverhältnis sinkt die Lösungsdichte dabei um mehrere 10 kg/m^3 , d.h. um einige Prozent, ab. Solche „leichten“ Lösungen entstehen dadurch in allen Einlagerungskammern, während die Lösungsdichte in den angrenzenden Grubenbauen praktisch unverändert jener des Schutzfluids entspricht. Die Voraussetzungen für konvektive Lösungsbewegungen sind damit zwischen den Einlagerungskammern eines Einlagerungsbereichs sowie zwischen den Einlagerungsbereichen und den angrenzenden Grubenbauen gegeben²³.

Konvektive Lösungsbewegungen zwischen den Einlagerungskammern eines Einlagerungsbereichs sind bei der Analyse der zeitlichen Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern im Zusammenhang mit der Berechnung des Radionuklid-Quellterms für die Transportmodellierung (Kapitel 6.2.1) wesentlich. Das vorliegende Kapitel behandelt die Auswirkungen der konvektiven Lösungsbewegung zwischen den Einlagerungsbereichen und den angrenzenden Grubenbauen auf den Schadstofftransport aus den Einlagerungsbereichen und deren Berücksichtigung in den Modellrechnungen, die in Kapitel 7.5 diskutiert werden. Konvektive Lösungsbewegung verstärkt den Schadstofftransport in Lösung aus einem Abbau mit höherer Schadstoffkonzentration in einen angrenzenden Abbau mit niedrigerer Schadstoffkonzentration gegenüber dem Wert, der mit einem advektiv/dispersiv/diffusiven Modellansatz auf der Basis des Netto-Lösungsflusses zwischen den beiden Abbauen berechnet wird.

Eine überschlägige Analyse zeigte, dass konvektive Lösungsbewegungen (1) zwischen dem ELB LAW2 und den Abbauen auf der 725-m-Sohle, (2) zwischen dem ELB LAW3 und den Abbauen auf der 725-m-Sohle und (3) zwischen dem ELB LAW4 und dem Abbau 12 Ost des Carnallit-Baufelds auftreten können. Konvektive Lösungsbewegungen zwischen dem ELB LAW1B und der 700-m-Sohle und zwischen dem ELB LAW1A und angrenzenden Abbauen können aufgrund der relativ geringen Leitfähigkeit von Wegsamkeiten und der verhältnismäßig kleinen Dichteunterschiede ausgeschlossen werden.

Aus modelltechnischen Gründen können konvektive Lösungsbewegungen mit den für den Schadstofftransport im Grubengebäude eingesetzten Modellen nicht generell abgebildet werden. Um ihren Einfluss auf den Schadstofftransport näherungsweise zu berücksichtigen, wird für Wegsamkeiten zwischen Modellsegmenten (Grubenbereichen), zwischen denen konvektive Lösungsbewegung auftritt, der Wert der Porendiffusivität im Modell erhöht. Der erhöhte Wert der Porendiffusivität wird mit D_{pE} bezeichnet und spezifisch für die oben genannten Wegsamkeiten aus den ELB LAW2, LAW3 und LAW4 festgelegt. Mit den erhöhten Werten der Porendiffusivität werden im Modell höhere diffusive Schadstoffflüsse berechnet, als aufgrund der physikalischen Diffusion auftreten. Die Werte von D_{pE} sind derart festgelegt, dass die Erhöhung der berechneten diffusiven Schadstoffflüsse näherungsweise der Wirkung der konvektiven Lösungsbewegung auf den Schadstofftransport entspricht.

²³ Die Entstehung von nennenswerten Dichteunterschieden durch die Umsetzung von Zement außerhalb der Einlagerungsorte und eine dadurch verursachte Konvektion sind wegen der vernachlässigbar geringen Mengen auszuschließen (zu den Mengen siehe /GSF 2003b/).

Das Auftreten von konvektiven Lösungsbewegungen zwischen den oben genannten Einlagerungsbereichen und angrenzenden Grubenbauen wurde in Detailuntersuchungen mit dem Programm KAFKA unter Verwendung von speziellen Strukturmodellen für das Grubengebäude ermittelt. Die speziellen Strukturmodelle umfassen das gesamte Grubengebäude einschließlich der Schnittstelle zum Deckgebirge (vgl. Kapitel 7.5.2 und /ALSA 2006c/ sowie Kapitel 6.7), bilden aber jeweils einen Einlagerungsbereich und dessen hydraulische Verbindungen zu angrenzenden Grubenbauen in höherem Detaillierungsgrad ab. Im Übrigen entsprechen die speziellen Strukturmodelle in Bezug auf Topologie und Parameterwerte jenem für die Berechnung des Schadstofftransports im Grubengebäude, wie es in Kapitel 7.5 beschrieben ist. Die speziellen Modellrechnungen erfolgten unter Berücksichtigung von Unterschieden der Lösungsdichte und deren Einfluss auf die Lösungsbewegung, wobei allerdings Änderungen der Lösungsdichte bei der Mischung von unterschiedlichen Lösungen vereinfacht abgebildet wurden. Eine ausführliche Darlegung der Topologie und Geometrie in den Einlagerungsbereichen erfolgte in /GSF 2006k/; die Annahmen für die Situation in den Einlagerungsbereichen nach Abschluss der vorgesehenen technischen Maßnahmen werden in /GSF 2006e/ dargestellt. Die Darstellung und Parametrisierung der speziellen Strukturmodelle enthält /ALSA 2006d/.

Die Datenbasis für die speziellen Modellrechnungen zur konvektiven Lösungsbewegung im Grubengebäude umfasst damit zusätzlich zu jener der Modellrechnungen gemäß Kapitel 7.5 die Volumina und die mittlere Porosität der einzelnen Kammern des betreffenden Einlagerungsbereichs, die anfänglichen Lösungsdichten in den Kammern (nach erfolgten chemischen Wechselwirkungen), die Pufferkapazitäten der Festphasen in Bezug auf die Lösungsdichte bei Zutritt von Lösung aus anderen Grubenbauen sowie die hydraulischen Eigenschaften der Wegsamkeiten zwischen den Kammern und zwischen den Kammern und den angrenzenden Abbauen außerhalb des Einlagerungsbereichs. Bestandteil der Datenbasis sind zudem die Parameter der Gasbildung in den einzelnen Kammern des betreffenden Einlagerungsbereichs, während in den Modellrechnungen gemäß Kapitel 7.5 nur die kumulierte Gasbildung im Einlagerungsbereich Eingang fand. Letztendlich erfordern die speziellen Modellrechnungen unter Berücksichtigung von Unterschieden der Lösungsdichte auch die Anfangswerte der Lösungsdichte und die Pufferkapazitäten in den anderen, nicht in erhöhtem Detaillierungsgrad abgebildeten Einlagerungsbereichen.

Die Belastbarkeit der Datenbasis ist vergleichbar zu jener der Modellrechnungen gemäß Kapitel 7.5 – und damit gut – in Bezug auf die geometrischen Daten, die hydraulischen Daten der Wegsamkeiten zwischen den Kammern des Einlagerungsbereichs und den angrenzenden Grubenbauen außerhalb des Einlagerungsbereichs, die Daten der Gasbildung und die anfänglichen Lösungsdichten. Eine eingeschränkte Belastbarkeit weisen demgegenüber die hydraulischen Daten der Wegsamkeiten zwischen den Kammern des betreffenden Einlagerungsbereichs auf. Von eingeschränkter Belastbarkeit sind zudem die Daten der Pufferkapazitäten in den verschiedenen Kammern in Bezug auf die Lösungsdichte bei Lösungszutritt. Die Modellrechnungen zeigen jedoch, dass die letztgenannten Eingangsgrößen in einer Weise angesetzt wurden, die das Anhalten von konvektiven Lösungsbewegungen in der Tendenz überschätzt.

6.4.2 Modellierung

Sofern von einem Abbau in einen angrenzenden Abbau ein Netto-Lösungsfluss erfolgt und diesem zudem ein konvektiver Lösungsaustausch überlagert ist, kann der advective Schadstofftransport zwischen den beiden Abbauen im stationären Zustand als Summe von zwei Termen dargestellt werden. Der eine Term entspricht dem advectiven Schadstofffluss vom einen Abbau zum andern entsprechend dem Netto-Lösungsfluss, er ist proportional zur Schadstoffkonzentration im Abbau, aus dem netto Lösung abfließt. Der zweite Term ist proportional zur Differenz der Schadstoffkonzentrationen in den beiden Abbauen und zudem zur Komponente des Lösungsflusses, die dem Netto-Lösungsfluss entgegen gerichtet ist.

Die Gleichung für den advektiv/diffusiven Schadstofftransport zwischen zwei Abbauen (ohne konvektiven Lösungsaustausch) im stationären Zustand weist ebenfalls zwei Terme auf: Der advective Term ist proportional zur Schadstoffkonzentration im Abbau, aus dem Lösung abfließt, der diffusive Term ist proportional zur Differenz der Schadstoffkonzentrationen in den beiden Abbauen. Die Struktur der Gleichung ist damit dieselbe wie beim Schadstofftransport bei konvektivem Lösungsaustausch. Durch Gleichsetzen der Ausdrücke für den Schadstofftransport ergibt sich eine Beziehung zwischen der Diffusionskonstanten für eine Modellrechnung ohne explizite Simulation der Konvektion (D_{pE}) und den Lösungsflüssen bei explizit modelliertem konvektivem Lösungsaustausch.

Die mit den speziellen Modellrechnungen ermittelten Lösungsflüsse zwischen den Kammern des betrachteten Einlagerungsbereichs und den angrenzenden Grubenbauen sind jedoch zeitlich nicht konstant. Mit der oben erläuterten Beziehung zwischen der Diffusionskonstanten D_{pE} und den Lösungsflüssen (für stationäre Verhältnisse) wurde deshalb zunächst in quasi-stationärer Näherung D_{pE} ermittelt und als Funktion der Zeit aufgetragen. In einem zweiten Schritt wurde anschließend – basierend auf den Ergebnissen für die Zeitperiode, während der der konvektive Schadstofftransport wesentlich ist – ein mittlerer, in der Tendenz eher ungünstig hoher Wert gewählt. Der derart für jeden Einlagerungsbereich gesondert ermittelte Wert für D_{pE} wurde in den Modellrechnungen zum Schadstofftransport im Grubengebäude gemäß Kapitel 7.5 als zeitunabhängiger Wert ab Beginn der modellierten Zeitperiode anstelle des physikalischen Werts für die Porendiffusivität in den in Kapitel 6.4.1 genannten Wegsamkeiten angesetzt. Durch dieses Vorgehen wird der Einfluss von konvektiven Lösungsbewegungen auf den Schadstofftransport aus den ELB LAW2, LAW3 und LAW4 in der Tendenz überschätzt.

Die speziellen Modellrechnungen für die drei Einlagerungsbereiche unter Berücksichtigung von Unterschieden der Lösungsdichte sind in /ALSA 2006d/ beschrieben. Die Ableitung der Werte für D_{pE} aus den Ergebnissen dieser Modellrechnungen erfolgt in Kapitel 2.1.3 von /ALSA 2006c/.

6.4.3 Ergebnisse der Modellrechnungen und Bewertung

Die speziellen Modellrechnungen zur Lösungsbewegung in und nahe den ELB LAW2, LAW3 und LAW4 unter Berücksichtigung von Unterschieden der Lösungsdichte führen mit dem in

Kapitel 6.4.2 beschriebenen Vorgehen zu den in Tabelle 6.4-1 aufgeführten Werten für die erhöhte Porendiffusivität D_{pE} .

Tab. 6.4-1: Erhöhte Werte für die Porendiffusivität (D_{pE}) zur näherungsweisen Berücksichtigung des konvektiven Schadstofftransports aus Einlagerungsbereichen

Einlagerungsbereich	D_{pE} [m ² /s]	Erhöhung gegenüber dem physikalischen Wert (Faktor)
ELB LAW2	$1 \cdot 10^{-8}$	33
ELB LAW3	$7 \cdot 10^{-10}$	2,3
ELB LAW4	$1,3 \cdot 10^{-9}$	4,3

Die Ergebnisse für D_{pE} zeigen, dass lediglich beim Einlagerungsbereich LAW2 konvektive Lösungsbewegungen den Schadstofftransport nach dem Rückgang der Netto-Lösungsflüsse aus dem Einlagerungsbereich in wesentlichem Maße – verglichen mit dem physikalischen diffusiven Transport – beeinflussen (vgl. Kapitel 7.5). Ursache dafür ist u.a. die hohe hydraulische Leitfähigkeit der Wegsamkeiten vom Abbau 9/750 zur 725-m-Sohle. Bei den anderen Einlagerungsbereichen, wo konvektive Lösungsbewegung ausschließlich durch mäßig durchlässige Schweben und Pfeiler erfolgen kann, ist deren Einfluss auf den Schadstofftransport wesentlich geringer.

6.5 Gebirgsmechanische Modellrechnungen

Das primäre Ziel der gebirgsmechanischen Modellrechnungen ist es, die derzeitige Beanspruchungssituation im Einklang zu den Standortdaten abzubilden und die Tragfähigkeit des Grubengebäudes bis zur Schließung der Schachtanlage Asse zu analysieren (vgl. Kapitel 2.3). Die Tragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes in der Betriebsphase ist die Voraussetzung für eine zuverlässige Prognose der Entwicklung des Gesamtsystems in der Nachbetriebsphase (vgl. Kapitel 2.6).

Darüber hinaus ist die zukünftige Entwicklung der gebirgsmechanischen Beanspruchung und Konvergenz zu prognostizieren, da dies eine wesentliche Grundlage für den Nachweis der Einhaltung aller Schutzziele ist. Die Konvergenz des Grubengebäudes ist die Ursache für Senkungen an der Tagesoberfläche und deshalb der entscheidende Ausgangspunkt für die bergschadenkundliche Senkungsprognose (vgl. Kapitel 7.3). Die Konvergenzentwicklung (vgl. Kapitel 7.2) hat aber auch einen entscheidenden Einfluss auf die Ausbreitung von Lösungen und von Schadstoffen im Grubengebäude und im Deckgebirge und muss in den Modellrechnungen zur Ausbreitung von Lösungen und Schadstoffen berücksichtigt werden. Weiterhin werden durch Konvergenz die im Porenraum gespeicherten Fluide, sowohl Gas als auch Lösung, verdrängt. Daher ist die Konvergenz der entscheidende Antrieb für Lösungs- und Gasbewegung und beeinflusst die Ausbreitung von Schadstoffen über den Lösungspfad (vgl. Kapitel 7.5) und über den Gaspfad (vgl. Kapitel 7.6). Auf Grundlage der er-

mittelten bzw. prognostizierten Schädigung von Gesteinsbereichen werden deren Auflockerungsgrad und Permeabilität eingeschätzt.

6.5.1 Datenbasis

Die Datenbasis besteht – neben den Literaturdaten - aus

- Messdaten des markscheiderischen und geotechnischen Überwachungsprogramms auf der Schachtanlage Asse II sowie
- Laboruntersuchungen zur Ermittlung materialspezifischer Kennwerte.

Die Erhebung von gebirgsmechanischen Messdaten ist Bestandteil der Standortüberwachung. Die gebirgsmechanische Entwicklung im Grubengebäude und an der Oberfläche ist über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten durch ein umfangreiches Messprogramm gut belegt. Das Programm umfasst Spannungs-, Versatzdruck-, Hydrofrac-, Deformations-, Extensometer-, Konvergenz- und Inklinometermessungen sowie Nivellements der Tagesoberfläche und Schachtteufen. Hinzu kommen mikroseismische Messungen. Diese Daten dienen zur Kalibrierung des gebirgsmechanischen Modells.

Durch Laboruntersuchungen wurde das Festigkeits- und Kriechverhalten der anstehenden Gesteine und der eingebrachten Versatzmaterialien untersucht. Entsprechend der aktuellen gebirgsmechanischen Situation wurden für die Schachtanlage vor allem die Auswirkungen hoher gebirgsmechanischer Belastungen auf die Salzgesteine bewertet, die mit Dilatanz-, Entfestigungs- und Brucheffekten verbunden sind. Unter Berücksichtigung dieser Effekte wurden für Steinsalz und Carnallit Resttragfähigkeiten nachgewiesen /IfG 2006a/. Für die Prognose des Tragverhaltens im Abbausystem ist der Nachweis eines Restfestigkeitsplateaus im trockenen und feuchten Salzgestein bei den bis zum Ende der Betriebsphase noch zu erwartenden Verformungen entscheidend.

In Laborversuchen wurde der Einfluss einer Befeuchtung mit Schutzfluid auf die Tragfähigkeit sowie das Verformungsverhalten von intaktem und entfestigtem Steinsalz und Carnallit untersucht und Stoffgesetze abgeleitet. Nach der Befeuchtung von intaktem und entfestigtem Steinsalz mit Schutzfluid ergab sich bei konstanter Belastung eine Erhöhung der Kriechrate. Das Niveau der Resttragfähigkeiten blieb erhalten. Für die numerische Beschreibung des Materialverhaltens wurde ein visko-elasto-plastisches Stoffmodell abgeleitet, das eine vom Manteldruck und der plastischen Deformation abhängige Entfestigung nach Überschreiten der Festigkeitsgrenze bei gleichzeitiger Verknüpfung mit dem Kriechverhalten berücksichtigt. Das Stoffgesetz verknüpft die Verformungsmechanismen Kriechen, Entfestigung und Dilatanz miteinander und kann somit auch den Kriechbruch beschreiben /MIN 2001a/. Das Stoffgesetz ist im Programm FLAC verfügbar und verifiziert /MIN 2001b/. Bei den numerischen Berechnungen erfolgte die Parametrisierung auf der Grundlage der Ergebnisse der Laboruntersuchungen und der in-situ-Messungen /IfG 2006a/.

Das für die Abbildung des Verformungsverhaltens von Carnallit verwendete Stoffgesetz basiert ebenfalls auf dem oben dargestellten Ansatz zur Simulation einer vom Manteldruck und der plastischen Deformation abhängigen Entfestigung nach Überschreitung der Festig-

keitsgrenze bei Verknüpfung mit dem Kriechverhalten. Bei den numerischen Berechnungen wurde gleichfalls eine materialspezifische Parametrisierung verwendet, die aus Laborversuchen abgeleitet wurde. Ein wesentlicher Materialunterschied des Carnallits im Vergleich zum Steinsalz ist ein deutlicher ausgeprägtes Entfestigungs- und Dilatanzverhalten schon ab Deformationen von 1 bis 3 % /IfG 2006a/. Das ist darauf zurückzuführen, dass Carnallit keine kristallographischen Gleitebenen aufweist und sich daher die inelastische Verformung hauptsächlich aus rupturer Deformation ergibt. Hieraus resultiert eine höhere Sprödbrechempfindlichkeit, wobei die Restfestigkeit bei befeuchtetem Material noch geringer ist als bei trockenem Material.

Zur Beschreibung des gebirgsmechanischen Verhaltens von kompaktierbarem Salzversatz nach der Einleitung des Schutzfluids wurde aufgrund von Laborversuchen eine mechanische Zustandsgleichung festgelegt, die das Kompaktionsverhalten und den sich aufbauenden Versatzdruck bei der Flutung in Abhängigkeit von der aktuellen Porosität und der Restporosität des Versatzes – d.h. seiner maximalen Kompaktierbarkeit – wiedergibt. In dem gefluteten Versatzkörper tritt ein Festigkeitsverlust im Korngefüge ein, der zu einer Sackung und zu einer Vergrößerung des Firstspalts führen kann. Der stabilisierende Versatzdruck gegen die Hohlraumkonvergenz kann sich erst aufbauen, wenn mit fortschreitenden Kriechprozessen und Deckgebirgsverschiebungen ein Formschluss zwischen Abbaukontur und Versatzkörper stattgefunden hat und eine weitere Kompaktion eintritt. Im Rechenmodell wird die bis zu einem Formschluss notwendige integrale Hohlraumkonvergenz – auf die gesamte Sohle bezogen – mit 10 % angesetzt /IfG 2006a/. Zur Modellierung wird im Rechenprogramm FLAC der Stoffansatz *double yield* verwendet. Die Festigkeitsparameter gelten für die gegenwärtig beobachtete, durchschnittliche Deformationsrate im Baufeld in der Südflanke von etwa 3 ‰ pro Jahr (vgl. Kapitel 2.3).

Für die gebirgsmechanische Modellierung des angrenzenden Deckgebirges wurden die verschiedenen Formationen entsprechend den gesteinsphysikalischen Eigenschaften und der tektonischen Entwicklung zu Homogenbereichen zusammengefasst /IfG 2006a/. Die gesteinspezifischen Parameter wurden durch Laboruntersuchungen an Prüfkörpern aus Bohrungen und Aufschlüssen im Gelände sowie aus Literaturdaten ermittelt. Die Daten wurden dahingehend ausgewertet, welche gebirgsmechanischen Reaktionen im Deckgebirge durch bergbaubedingte Gebirgsspannungsverlagerungen und Verformungsprozesse zu erwarten sind. Weiterhin wurden, ausgehend von einer Analyse der Bruchrichtungen in Bohrkernen und der Umrechnung von Gesteins- in Gebirgsfestigkeiten, die Anisotropierichtungen für das Rechenmodell festgelegt.

Die gebirgsmechanischen Parameter der Gesteine in der Südflanke und dem vorgelagerten Deckgebirge unterscheiden sich zum Teil deutlich. Kompetente Gesteinsschichten, wie z.B. Kalksteine und Sandsteine, haben auf die Aufwölbung des Asse-Sattels bruchhaft reagiert (vgl. Kapitel 2.3). Dieses stark beanspruchte Deckgebirge hat bei bergbaubedingten Belastungen nur geringe Steifigkeiten und infolge des hohen Durchtrennungsgrades auch geringe Verbands- bzw. Gebirgsfestigkeiten. Daher weisen die Gesteinsverbände wesentlich geringere Festigkeiten auf als vor der Beanspruchung. Dies wurde durch eine plausible Abminderung der Kohäsion und des Reibungswinkels der Gesteinsformationen in Abhängigkeit vom Durchtrennungsgrad abgebildet. Um eine möglichst gute Übereinstimmung der Re-

chenergebnisse mit den in-situ-Messwerten zu erzielen, basieren diese Parametrisierungen auf Sensitivitätsstudien /IfG 2006a/. Die Deckgebirgsschichten des Buntsandsteins und Muschelkalks wurden mit einem bilinearen, transversalisotropen, elasto-plastischen Stoffansatz modelliert. Mit Hilfe von Laboruntersuchungen wurden die gesteinsphysikalischen Kennwerte ermittelt /IfG 2006a/.

6.5.2 Modellierung

Für die gebirgsmechanische Modellierung wurde zuerst ein großräumiges 2D-Vertikalmodell entwickelt, um die Wechselwirkungen zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge abzubilden. Um die Auswirkungen dieser komplexen Interaktionen auf das Tragsystem – bei gleichzeitiger Modellierung der Pfeiler und der Schweben sowie des Deckgebirges – effektiv und detailliert erfassen zu können, wurde ein 3D-Submodell entwickelt, das einen Ausschnitt des gebirgsmechanischen Systems entlang der Ebene des 2D-Vertikalmodells abbildet. Für spezifische Untersuchungen von besonders belasteten Tragelementen wurden weitere detailliertere 3D-Modelle verwendet. Anhand der Ergebnisse aus den 3D-Modellen wurden die Parametrisierungen des 2D-Vertikalmodells überprüft bzw. verifiziert.

Die gebirgsmechanischen Modellrechnungen wurden mit dem Programm FLAC der Firma ITASCA durchgeführt.

Zunächst wurde die durch die Überwachungsmessungen dokumentierte, gebirgsmechanische Entwicklung im Grubengebäude bis zur Gegenwart modelltechnisch nachvollzogen (vgl. Kapitel 2.3). Auf der Grundlage wurden die gebirgsmechanischen Modelle bzw. die Anfangsbedingungen für die Prognosen der Konvergenzentwicklung kalibriert und validiert /IfG 2006a/, /IfG 2006b/.

2D-Vertikalmodell

Aufgrund der etwa symmetrischen Anordnung der Hohlräume im Streichen der Struktur wird das großräumige 2D-Vertikalmodell Grubengebäude/Deckgebirge quer durch das Grubengebäude angeordnet. Bei Vorgabe eines ebenen Deformationszustandes wurden senkrecht zur Modellebene keine Verschiebungen zugelassen. Die entsprechenden Spannungen ergeben sich aus dem Stoffverhalten über eine verhinderte Querdehnung. Das Modell ist zulässig, da die geologischen Schichten und die Abbaue quer zur Modellebene eine wesentlich größere Erstreckung als in der Modellebene besitzen. Die Abmessungen des 2D-Modells (6 300 m x 2 400 m) wurden auf Grundlage von Voruntersuchungen so gewählt, dass ein plausibler Anfangsspannungszustand berechnet werden konnte. Geothermische Gradienten werden berücksichtigt.

Bei der Abbildung der Deckgebirgsschichten wurden der Untere und Mittlere Buntsandstein sowie der gesamte Muschelkalk zu jeweils einer Schicht mit mittleren stoffphysikalischen Parametern zusammengefasst. Dies ist sinnvoll, da die Klufkörperreaktionen die geringen Steifigkeits- und Festigkeitsunterschiede erfahrungsgemäß überlagern. Für die Modellierung wurde das Deckgebirge mit einem elasto-plastischen Stoffverhalten und diskreten Störungsflächen abgebildet.

Auf Grund geringer gesteinsmechanischer Unterschiede der Salze bzw. geringer Schichtmächtigkeiten von Tonen und Anhydriten unterscheidet das 2D-Modell im Salzsattel nur zwischen Steinsalz und Carnallit. In den abbaunahen Bereichen wird der oben beschriebene visko-elasto-plastische Stoffansatz und außerhalb des Hohlraumeinflusses ein Ansatz für sekundäres Salzkriechen verwendet.

Zur Berechnung des Grundspannungszustandes wurde die Entwicklung der Salzstruktur modelltechnisch nachvollzogen. Bei dieser Sattelstruktur ist voranzusetzen, dass sich der ursprüngliche homogene Grundspannungsaufbau nach der Ablagerung entsprechend der Wichte und Mächtigkeit der Gesteinsschichten verändert hat. Mit Ausgleichsrechnungen, bei denen infolge des Salzkriechens der Grundspannungszustand im unmittelbaren Deckgebirge verändert wurde, konnte die in-situ vorhandene Mobilität, insbesondere in den angelegten tektonischen Elementen, simuliert werden. Beim Erreichen des Grundspannungszustandes lagen die Spannungsdifferenzen im Salzsattel bei 0 bis 2,5 MPa, während im Buntsandstein an der Südflanke 5 bis 12,5 MPa und im biegesteifen Muschelkalk bis zu 15 MPa ausgewiesen wurden //IfG 2006a/.

Die zeitliche und räumliche Auffahrung der verschiedenen Baufelder wurde durch Entfernen der entsprechenden Elemente im Modellnetz realisiert. Die Geometrie der Abbaue und die Bergbauhistorie wurden dem Risswerk entnommen. Da die Abbaupfeiler im Vertikalmodell nicht abgebildet werden, wurde ihre Stützwirkung als Spannungsrandbedingung auf den Schweben simuliert. Daraus ergibt sich nur in horizontaler Richtung ein Tragwiderstand ohne einen Lastabtrag der vertikalen Spannungskomponenten aus dem Deckgebirge. Die Entwicklung der Abbaue wurde bis zur Versatzeinbringung mit freier Konvergenz berechnet.

3D-Detailmodelle

Das 3D-Submodell der Südflanke dient zur Untersuchung der Pfeilertragwirkung im Teufenbereich von der 574-m- bis zur 511-m-Sohle während der Schutzfluideinleitung bis zum Ende der Betriebsphase. Der Teufenbereich entspricht dem aktuellen und wohl auch zukünftigen Beanspruchungsschwerpunkt der Steinsalz-Barriere (vgl. Kapitel 2.3).

Das 3D-Submodell umfasst einen scheibenförmigen Ausschnitt aus dem gebirgsmechanischen System entlang der Schnittebene des 2D-Vertikalmodells (Modellscheibe). Entsprechend der Zielsetzung war es ausreichend, das Deckgebirge zu einem Stoffbereich zusammenzufassen. Die Deckgebirgsreaktionen wurden aus dem 2D-Vertikalmodell abgeleitet und als Randbedingung für dieses 3D-Modell vorgegeben.

Bei der Modellierung der Abbaue wurden die volle Kammerbreite und in der Modelltiefe jeweils die halbe Kammerlänge und halbe Pfeilerbreite abgebildet. Damit betragen die Abmessungen in der Modelltiefe 36 m. Die Modellhöhe reicht von der Mitte der Schweben zwischen der 595-m-Sohle und der 574-m-Sohle bis in eine Teufe von 400 m. Die querschlägige Gesamtlänge des Modells beträgt 380 m, wobei der nördliche Modellrand nahe der Nordflanke des Salzsattels liegt. Dadurch können auch weiträumige Spannungsumlagerungen berechnet werden.

Der modellierte Zeitraum reicht von der Auffahrung der Grubenräume bis zum Ende der Betriebsphase. Dabei findet zunächst eine bruchlose Deformation des Deckgebirges und der Tragelemente im Steinsalz statt, während später Brucherscheinungen und Entfestigungen auftreten /IfG 2006a/. Auf Grundlage der Standortdaten und der in den Abbauen der Südflanke überwiegend vorhandenen Firstspalte von einigen Dezimetern Mächtigkeit wurde in den Modellrechnungen für den Versatz lediglich das Eigengewicht berücksichtigt.

Das 3D-Modell des Carnallitbaufeldes dient gleichfalls zur Analyse des gegenwärtigen gebirgsmechanischen Zustandes sowie zur Prognose bis zum Ende der Betriebsphase. Das Modell bildet näherungsweise einen Pfeiler und 2 halbe Kammern in streichender Richtung ab und erreicht damit ebenfalls Abmessungen von 36 m. Die Modellscheibe liegt in der Schnittebene des 2D-Vertikalmodells. In querschlägiger Richtung (Breite 6 300 m) wird das südliche und nördliche Deckgebirge sowie in vertikaler Richtung (Höhe etwa 2 400 m) die Tagesoberfläche mit erfasst. Die Abmessungen gestatten, identisch zum 2D-Vertikalmodell, eine Simulation der weitreichenden gebirgsmechanischen Wechselwirkungen zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge.

Für die Tragfähigkeitsbewertung des Carnallitbaufeldes in /IfG 2005c/ wurde nur der Modellausschnitt des Carnallitbaufeldes einer gebirgsmechanischen Bewertung unterzogen.

Mit dem Modell wurden insbesondere die bisherige Entwicklung, einschließlich der Wechselwirkungen mit den erhöhten Deckgebirgsverschiebungsraten an der Südflanke der Struktur, und die Pfeilertragwirkung nachvollzogen. Der Versatz in den Abbauen wurde mit dem Stoffansatz double yield nachgebildet.

6.5.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

Die Modellierung der gebirgsmechanischen Entwicklung bis zur Gegenwart ist die Grundlage für die Tragfähigkeitsanalyse /IfG 2006a/ und für die gebirgsmechanische Langzeitprognose /IfG 2006b/. Mit den Modellrechnungen wurden jedoch zunächst die Ursachen und Wechselwirkungen der bisherigen Entwicklung (vgl. Kapitel 2.3) nachvollzogen.

Nach der Berechnung des Grundspannungszustandes im 2D-Vertikalmodell wurden die Abbaugeschichte und die Versatzeinbringung modelliert. Für die berechneten Verschiebungen der Südflanke bzw. des Sattelkerns in nördliche Richtung ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den seit 1981 dokumentierten markscheiderischen Messungen. Der Verschiebungsanteil aus südlicher Richtung beträgt etwa 80 % der Gesamtstauchung. Die Verschiebungsbeschleunigung in den 80er Jahren ist nicht allein mit dem Versagen der Schweben in der Südflanke sondern mit Festigkeitsüberschreitungen sowie den daraus folgenden Deformationen im Deckgebirge zu begründen. In den Bruch- und Scherzonen wurden Flüssigkeitsdrücke mechanisch wirksam und bewirkten eine Verringerung der Eigentragfähigkeit des Deckgebirges. Dies führte wiederum zu einer zusätzlichen Beanspruchung der Tragelemente in der Südflanke. Die für die Schweben berechneten Scherdeformationen stimmen mit dem visuellen Befund ihres Aufblätterns und Durchbrechens in der Südflanke überein. Starke Scherbeanspruchungen werden auch für die Schweben des Baufeldes im Sattelkern und für den Firstbereich des Carnallitbaufeldes ausgewiesen (Abbildung 6.5-1).

Daraus sind keine hohen Strömungswiderstände für die stark beanspruchten Schweben abzuleiten. Die Pfeiler zwischen den einzelnen Baufeldern sind weniger stark beansprucht. Die Verhältnisse im frühzeitig verfüllten und konsolidierten Carnallitbaufeld in der Nordflanke waren für die Entwicklungen in der Südflanke nur von untergeordneter Bedeutung.

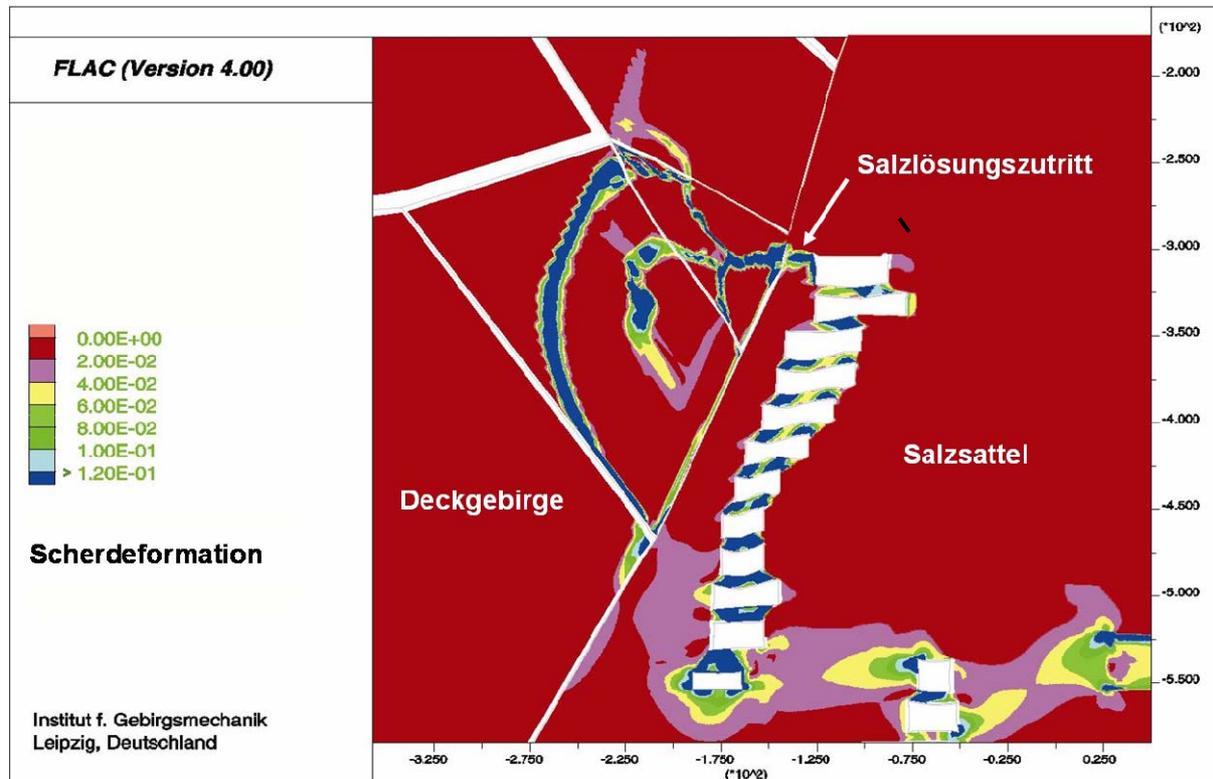


Abb. 6.5-1: Scherdeformationen in der Südflanke des Asse Sattels im Jahr 2004

Die modelltechnische Darstellung der Situation im Jahr 2004 zeigt, dass sich aufgrund der erhöhten Scherdeformationen im Deckgebirge eine Gleitfläche mit Gewölbewirkung über dem Abbaufeld in der Südflanke ausgebildet hat (Abbildung 6.5-1). Die Gebirgsbereiche mit erhöhten Scherdeformationen schließen im Firstbereich der 511-m-Sohle an das Grubengebäude an, woraus ein Integritätsverlust der Steinsalz-Barriere in diesem Gebirgsbereich abgeleitet werden kann (vgl. Kapitel 2.2). Hier befindet sich auch der primäre Zutrittsbereich von Deckgebirgslösungen zum Grubengebäude (vgl. Kapitel 2.6).

Im südlichen Deckgebirge treten bis zu einer Entfernung von etwa 100 m vom Abbausystem Bruchprozesse auf, so dass hier nur geringe Festigkeitsreserven vorhanden sind. Dies spiegelt sich auch in der Gebirgsspannungsverteilung wieder. Die gegenwärtige Situation ist das Ergebnis andauernder Umlagerungen der Gebirgsspannungen vom Tragsystem im Grubengebäude auf das Deckgebirge in der südlichen Sattelflanke.

Die mit den 3D-Modellen berechneten Spannungs- und Deformationszustände, Entfestigungsbereiche und Bruchbilder im Grubengebäude stimmen gut mit der markscheiderisch dokumentierten Situation überein /IfG 2006a/. Insbesondere die beobachtete Entwicklung der Schwebenbrüche in der Südflanke konnte modelltechnisch nachvollzogen werden. Mit

der Schutzfluideinleitung ist im entfestigten Tragsystem der Südflanke mit Feuchtekriechen, verstärkten Bruchprozessen, Versatzwiderstandsabfall und erhöhten Deckgebirgsverschiebungsraten zu rechnen. Die Modellrechnungen zeigen, dass eine signifikante Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten, die mit verstärkten dynamischen Reaktionen verbunden sein kann, nur mit einem pneumatischen Stützdruck während der Schutzfluideinleitung oberhalb der 700-m-Sohle zu verhindern ist.

Aus der Bewertung der Ergebnisse mit dem 3D-Modell des Carnallititbaufeldes lässt sich ein Entfestigungszustand im gesamten Baufeld ableiten, der keine erheblichen Spannungsakkumulationen in der Phase der Schutzfluideinleitung mehr zulässt. Die größtenteils von Rissen durchzogenen Pfeiler sind vollständig im Versatz eingebettet und können sich nicht sprödebruchartig in die Kammern hinein bewegen. Im Rahmen der Schutzfluideinleitung in das Carnallititbaufeld sind jedoch, vergleichbar zum Baufeld in der Südflanke, ein erhöhtes Feuchtekriechen, verbunden mit Aktivierungen der Hohlraumkonvergenzen im anstehenden Gestein zu erwarten. Die Stützwirkungsverluste im Versatz werden aufgrund der im Vergleich zum Fremdversatz in der Südflanke geringeren Porosität des Altversatzes sowie des Nachversatzens im oberen Bereich der Abbaue geringer sein.

Die prognostizierte gebirgsmechanische Situation kurz nach dem Einleiten des Schutzfluids mit Beaufschlagung des pneumatischen Drucks ist in der Abbildung 6.5-2 dargestellt. Die Schädigung der bereits deformierten Gebirgs- und Grubenbereiche (vgl. Abbildung 6.5-1) wird zwar weiter fortschreiten, jedoch ohne dass die Resttragfähigkeit verloren geht /IfG 2006a/. Die Scherdeformation der entfestigten Schweben im Grubengebäude zeigt, dass diese nur noch geringe Strömungswiderstände aufweisen werden, und dass hoch durchlässige Wegsamkeiten über aufgelockerte Gesteinsbereiche zwischen den Baufeldern noch auf lokale Bereiche beschränkt sein werden.

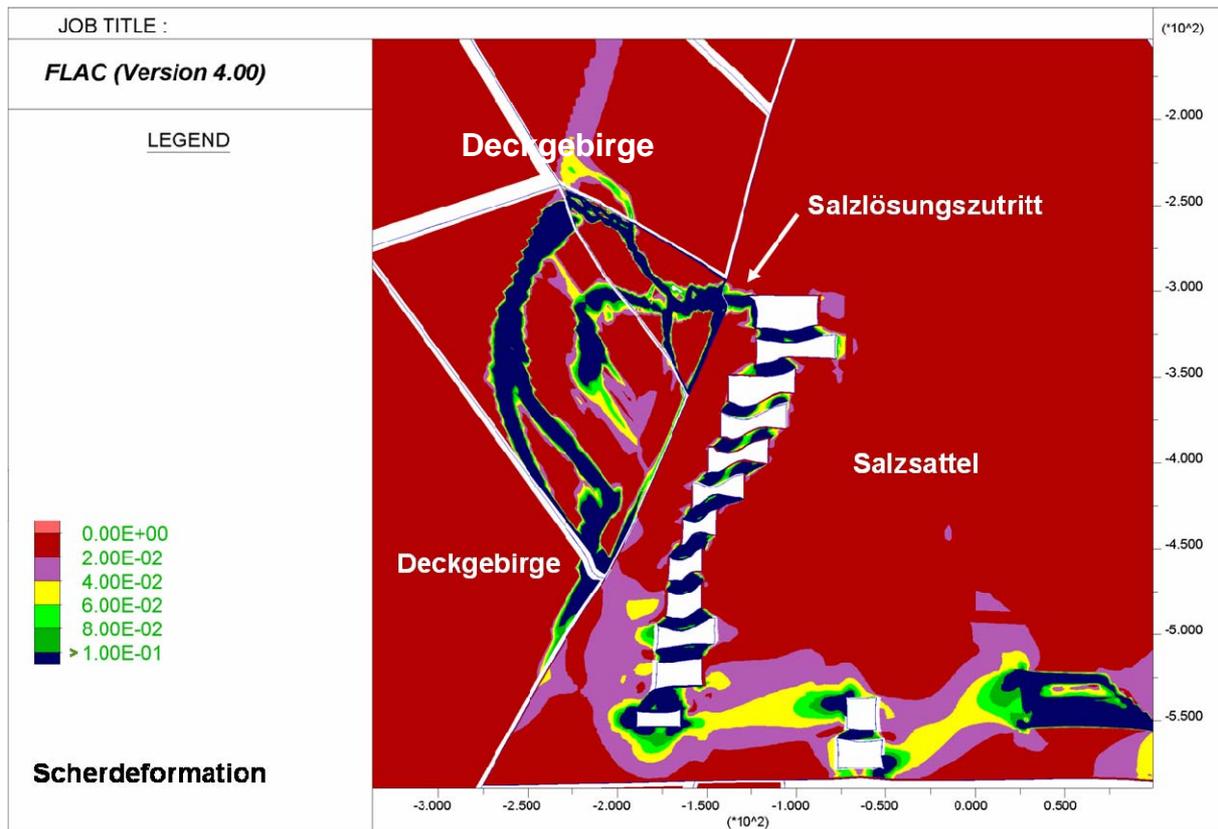


Abb. 6.5-2: Scherdeformationen in der Südflanke kurz nach dem Einleiten des Schutzfluids mit Beaufschlagung eines pneumatischen Drucks
(Zur Beachtung: etwas geänderte Skalierungen im Vergleich zu Abbildung 6.5-1)

Die Ausdehnung der Deckgebirgsbereiche mit erhöhten Scherdeformationen wird sich nicht signifikant verändern. In der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere im Teufenbereich der 511-m-Sohle ist durch die erhöhten Scherdeformationen ein weiterer Integritätsverlust zu verzeichnen. Im Teufenbereich von der 679- bis zur 750-m-Sohle bewirkt die zunehmende Deformation keine vergleichbare hydraulisch wirksame Schädigung der Steinsalz-Barriere /IfG 2006a/.

Die Modellrechnungen in der Betriebsphase wurden für die Nachbetriebsphase fortgeführt. Die Ergebnisse der Konvergenzprognose für die Nachbetriebsphase sind im Kapitel 7.2 dargestellt.

6.6 Detailrechnungen zu Fluidbewegungen im Grubengebäude

Spezielle Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss im Grubengebäude, d.h. zum Lösungs- und Gasfluss und deren Wechselwirkungen, wurden für den Einlagerungsbereich MAW (ELB MAW) und dessen Nahbereich durchgeführt. In der Szenariengruppe des Referenzszenarios wird unterstellt, dass weder in der Betriebs- noch in der Nachbetriebsphase ein Lösungszutritt in den Fassegel des ELB MAW erfolgt (Kapitel 5.2.2). Ein nennenswerter Lösungszutritt

in den MAW-Fasskegel ist charakterisierender FEP der alternativen Szenariengruppe LsgMAW, deren Auswirkungen in Kapitel 7.5.6 dargestellt werden. Mit den nachfolgend dargelegten speziellen Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss im Bereich des ELB MAW wird gezeigt, dass ein Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel nur unter wenig wahrscheinlichen Verhältnissen erfolgen kann, und dass deshalb diese Wahl der Szenariengruppen angemessen ist.

6.6.1 Konzeptuelle Modelle und Datenbasis

Das Verfüllkonzept sieht vor, dass der bestehende unverfüllte Hohlraum in der MAW-Kammer 8a/511 vollständig mit Sorelbeton verfüllt wird, so dass dieser den Fasskegel seitlich und nach oben vollständig umgibt, siehe auch die Ausführungen in Kapitel 4.2.4. Anschließend wird in die Kontur an den Stößen und in der Firste Sorelmörtel injiziert. Dadurch entsteht um die Abfälle eine Sorelbetonglocke (vgl. Abbildung 4.2-1). Zudem werden die Beschickungsbohrungen, die Beschickungskammer und deren Zugangsstrecke auf der 490-m-Sohle sowie das Rolloch und die Bohrungen, die nördlich der MAW-Kammer direkt von der 490-m-Sohle in den Abbau 8a/532 führen, ebenfalls mit Sorelbeton verfüllt.

Der Abbau 8a/532 direkt unterhalb der MAW-Kammer und der angrenzende Abbau 8b/532 bilden den Nahbereich des ELB MAW. Sie sind mit Salzversatz verfüllt und über Strecken mit dem Abbau 8/532 verbunden, der zum hydraulischen System der Kammerreihen des Baufeldes in der Südflanke gehört. Die beiden Abbaue des Nahbereichs sind im First- und im Sohlenniveau mit Durchhieben hydraulisch wirksam miteinander verbunden. Die Schewebe des Abbaus 8a/532 zur MAW-Kammer ist gebirgsmechanisch beansprucht und deshalb als hydraulisch durchlässig anzunehmen. Der Nahbereich MAW wird gegen die westlich und östlich angrenzenden Abbaue 7b/532 und 9a/532 mit Strömungsbarrieren abgetrennt. Eine Strömungsbarriere wird auch in den Durchhieb im Firstbereich zwischen Abbau 8b/532 und Abbau 8/532 eingebaut. Die Pfeiler zwischen den Abbauen 8a/532 und 8b/532 einerseits und 8/532 andererseits sind im Kern nur gering aufgelockert und deshalb in querschlägiger Richtung wenig durchlässig. Hydraulisch gut durchlässige Verbindungen vom Nahbereich MAW zum Baufeld in der Südflanke bestehen damit nur entlang der mit Salzversatz verfüllten Durchhiebe im Sohlenniveau.

Ein Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel kann unter den beschriebenen Verhältnissen nur durch die Schewebe aus dem Abbau 8a/532 oder eventuell entlang der Auflockerungszone des verschlossenen Durchhiebs zur MAW-Kammer auf der 511-m-Sohle und dann durch die Sohle unter der Sorelbetonglocke hindurch stattfinden. Die anfänglich im MAW-Fasskegel und in den Abbauen des MAW-Nahbereichs vorhandene Grubenluft wird beim Einleiten von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke eingeschlossen. Mit dem steigenden Lösungsdruck im Baufeld in der Südflanke dringt zunehmend Lösung in den MAW-Nahbereich ein und komprimiert die eingeschlossene Grubenluft. Der ansteigende Druck der Grubenluft wirkt dem Eindringen von Lösung entgegen.

Durch oder um die Sorelbetonglocke kann die Grubenluft nicht aus dem MAW-Fasskegel und dem MAW-Nahbereich entweichen. Dies wird durch den hohen Gaseindringdruck und die geringe Permeabilität von Sorelbeton verhindert /IBE 2004/. Mögliche Wegsamkeiten

bestehen jedoch eventuell durch die Schwebelücke des Abbaus 8a/532 und dann entlang der Auflockerungszone des verschlossenen Durchhiebs auf der 511-m-Sohle sowie im Firstbereich der beiden Abbaue des MAW-Nahbereichs durch deren Pfeiler in den Abbau 8/532, insbesondere entlang der Auflockerungszone des mit einer Strömungsbarriere versehenen Durchhiebs im Firstniveau zwischen den Abbauen 8b/532 und 8/532.

In den MAW-Fasskegel kann Lösung nur eindringen, wenn der Lösungspegel über die Untergrenze der Sorelbetonglocke ansteigt. Dies ist nur möglich, solange der Fluiddruck in der Grube noch zunimmt und die im Fasskegel unter der Sorelbetonglocke gefangene Luft weiter komprimiert wird. Der Fluiddruck in der Grube wächst in der Nachbetriebsphase relativ rasch an, das Druckmaximum ist bereits nach etwa 90 Jahren²⁴ erreicht (vgl. Kapitel 7.5.4). Lösung kann damit nur in den MAW-Fasskegel eindringen, wenn der Lösungspegel deutlich vor 90 Jahren über die Firste des Abbaus 8a/532 ansteigt, die Sohle des MAW-Fasskegels erreicht und dann – mit dem immer noch zunehmenden Lösungsdruck und unter weiterer Kompression der im Fasskegel eingeschlossenen Luft – weiter ansteigen kann.

Aufgabe der speziellen Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss im Bereich des ELB MAW ist es, diese Prozesse ausreichend realitätsnah abzubilden, die steuernden Parameter zu identifizieren und die Verhältnisse einzugrenzen, bei denen ein Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel erfolgen kann. Die potenziell maßgebenden Parameter sind:

- Kontur- und fluidzugängliches Volumen des MAW-Fasskegels und der beiden Abbaue des MAW-Nahbereichs, in den letzteren insbesondere im Firstbereich,
- Abmessungen und Ansatzhöhen der verschiedenen Durchhiebe,
- Permeabilität, Porosität, Zweiphasen-Parameter²⁵ und anfängliche Lösungssättigung
 - des MAW-Fasskegels und des Versatzes in den beiden Abbauen,
 - der Schwebelücke des Abbaus 8a/532 zum MAW-Fasskegel,
 - der mit Salzversatz verfüllten Durchhiebe im Sohlenbereich zwischen den Abbauen 8a/532 bzw. 8b/532 und 8/532,
 - der mit Salzversatz verfüllten Durchhiebe zwischen 8a/532 und 8b/532,
 - der eventuellen Wegsamkeiten im Firstbereich durch die Pfeiler zwischen 8a/532 bzw. 8b/532 und 8/532, insbesondere in der Auflockerungszone des mit einer Strömungsbarriere versehenen Durchhiebs von 8b/532 nach 8/532,
 - der eventuellen Wegsamkeit in der Schwebelücke zwischen 8a/532 und der MAW-Kammer und entlang der Auflockerungszone des verschlossenen Durchhiebs auf der 511-m-Sohle,

²⁴ 90 Jahre gemäß Modellrechnung mit KAFKA, 150 Jahre gemäß Modellrechnung mit LOPOS. Der zeitliche Bezugspunkt ($t=0$) ist der Beginn der Schutzfluideinleitung auf der 725-m-Sohle

²⁵ relative Permeabilität für die flüssige Phase und die Gasphase sowie Kapillardruck, jeweils in Abhängigkeit von der Lösungssättigung

- jene der Gasbildung im MAW-Fasskegel unter den anfänglichen, „trockenen“ Verhältnissen und bei Lösungszutritt in den Fasskegel,
- der Verlauf des Lösungsdrucks im Baufeld in der Südflanke.

Da die Modellrechnungen nur die kurze Zeitperiode von rund 100 Jahren abdecken müssen, können die Auswirkungen der Konvergenz, die zudem auf den MAW-Fasskegel unter der Sorelbetonglocke nicht einwirkt, vernachlässigt werden.

Eine gute Datenlage besteht in Bezug auf die Kontur- und die fluidzugänglichen Volumina, die Abmessungen und die Ansatzhöhen der verschiedenen Durchhiebe, die Porosität, Permeabilität und anfängliche Lösungssättigung des Salzversatzes sowie die Gasbildung. Die Zweiphasenparameter von Salzversatz lassen sich aus international verwendeten Parametrisierungen mit ausreichend geringer Bandbreite eingrenzen. Lediglich grobe Schätzwerte sind jedoch für die wirksamen Permeabilitäten, Porositäten, Zweiphasenparameter und anfängliche Lösungssättigung der unterstellten Wegsamkeiten durch Schweben, Pfeiler und Auflockerungszonen verfügbar. Die Modellrechnungen zur Bedeutung dieser Parameter zeigen aber, dass das Ansteigen des Lösungspegels im MAW-Nahbereich weniger von einer Behinderung des Entweichens von Luft entlang der unterstellten Wegsamkeiten abhängt. Von primärem Einfluss ist vielmehr der Strömungswiderstand des Salzversatzes in den Durchhieben zum Baufeld in der Südflanke und jener in den beiden Abbauen des MAW-Nahbereichs, die dem Lösungszutritt in den MAW-Nahbereich entgegenwirken. Damit beeinträchtigt die begrenzte Datenlage zu den unterstellten Wegsamkeiten durch Schweben, Pfeiler und Auflockerungszonen die Aussagekraft der Modellergebnisse in einer Weise, die durch Parametervariationen und eine entsprechend zurückhaltende Interpretation der Modellergebnisse überwunden werden kann. Die zeitliche Entwicklung des Lösungsdrucks im Baufeld in der Südflanke ist aus den Modellrechnungen zur Lösungs- und Gasbewegung in der Schachtanlage gut bekannt (vgl. Kapitel 7.5.4).

6.6.2 Numerisches Modell

Die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Prozesse wurden mit einem numerischen, dreidimensionalen Finite-Volumen-Modell und dem anerkannten Rechenprogramm TOUGH2 simuliert /PRU 1999/. Das Modell umfasst den MAW-Fasskegel, die beiden Abbau des Nahbereiches, die Schweben des Abbaus 8a/532, das Baufeld in der Südflanke oberhalb 532 m Teufe und die oben genannten Durchhiebe, Wegsamkeiten und Auflockerungszonen. Das Modell ist in Abbildung 6.6-1 dargestellt. Das Baufeld in der Südflanke wirkt als Randbedingung und wurde deshalb vereinfacht als homogener, gut durchlässiger Modellbereich abgebildet. Der Anstieg des Lösungspegels im Baufeld in der Südflanke und die zeitliche Entwicklung des Lösungsdrucks wurden gestützt auf den Zeitplan für das Umsetzen der Schließungsmaßnahmen und die Ergebnisse der Modellrechnungen für die Lösungs- und Gasbewegung in der Schachtanlage (vgl. Kapitel 4.2 und 7.5.4) durch je eine fiktive Quelle von Lösung an der Modellbasis und von Gas an der Modellobergrenze – jeweils mit angepasster „Schüttungsrate“ – vorgegeben /COL 2006e/.

Das Modell besteht aus insgesamt 18 194 Quaderelementen, deren Tiefenerstreckung in den Abbauen 8a/532 und 8b/532 sowie der Schweben des Abbaus 8a/532 höchstens 2 m, in allen andern Modellbereichen (außer dem Baufeld in der Südflanke) höchstens 1 m beträgt. Der MAW-Fasskegel wurde als homogener Modellbereich mit den Eigenschaften von Salzversatz abgebildet. Damit dürften Kapillareffekte im MAW-Fasskegel überschätzt werden, da die Zwickelhohlräume zwischen den Fässern in Wirklichkeit unverfüllt bleiben.

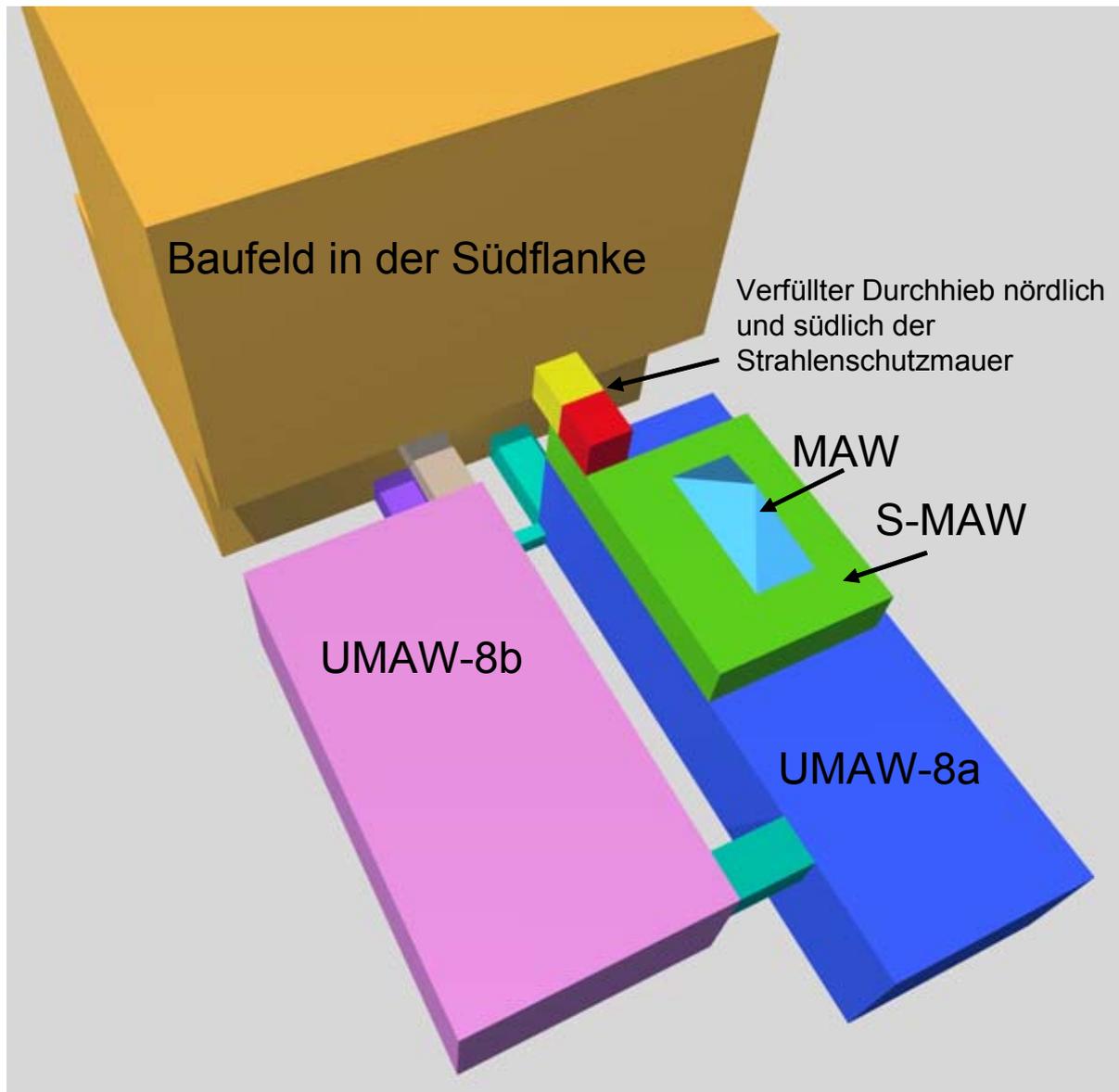


Abb. 6.6-1: 3D-Modell des Bereichs um den ELB-MAW für die speziellen Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss mit dem Programm TOUGH2

Die Modellrechnungen mit dem Programm TOUGH2 beruhen auf dem Modellansatz der gekoppelten erweiterten Gleichungen von Darcy für die Lösungs- und Gasbewegung mit ausschließlich sättigungsabhängigen relativen Permeabilitäten für beide Phasen. Berücksichtigt wurden

- die Abhängigkeiten der relativen Permeabilitäten für Lösung und für Gas sowie des Kapillardrucks von der Lösungssättigung mit international gebräuchlichen Parametrisierungen,
- die Dichte und Viskosität des Schutzfluids,
- die Kompressibilität von Lösung und Gas,
- die Löslichkeit von Gas (Luft) in Lösung.

Aufgrund ihres geringen Einflusses wurden folgende Effekte vereinfachend vernachlässigt:

- die Kompressibilität der Festphasen (Salzgestein, Versatzstoffe),
- Konvergenzprozesse,
- Inhomogenitäten und Anisotropien der hydraulischen Parameter.

Die Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss im Bereich des ELB MAW sind in /COL 2006e/ im Detail beschrieben.

6.6.3 Ergebnisse und Bewertung

Die Modellrechnungen zum Zweiphasenfluss im Bereich des ELB MAW /COL 2006e/ wurden zum einen für verschiedene zeitliche Entwicklungen des Lösungsdrucks im Baufeld in der Südflanke durchgeführt, wobei die zeitlichen Entwicklungen jeweils mit dem Programm KAFKA ermittelt wurden (vgl. Kapitel 7.5.3 und /ALSA 2005a/, /ALSA 2006c/). Zum anderen wurden mit Sensitivitätsrechnungen die Einflüsse der Permeabilitäten der unterstellten Wegsamkeiten durch Pfeiler und Auflockerungszonen, der Viskosität und Dichte des Schutzfluids, der Gasbildung im MAW-Fasskegel sowie der Abhängigkeit des Kapillardrucks von der Sättigung in Salzversatz und der Schweben untersucht.

In keinem der Rechenfälle steigt die Lösungssättigung im MAW-Fasskegel auf hohe Werte an. In den 1 m mächtigen Modellelementen der untersten Ebene des MAW-Fasskegels erreicht die Lösungssättigung zur Zeit des maximalen Lösungsdrucks im Baufeld in der Südflanke durch Kapillarwirkung rund 20 %. Der Lösungspegel, d.h. die Obergrenze der Zone mit hoher Lösungssättigung, steigt allerdings bis in den oberen Bereich der Schweben des Abbaus 8a/532 zur MAW-Kammer. Die zeitliche Entwicklung der Lösungssättigung entlang einer vertikalen Linie durch den MAW-Fasskegel, die Schweben und den oberen Bereich des Abbaus 8a/532 für einen repräsentativen Fall ist in Abbildung 6.6-2 gezeigt.

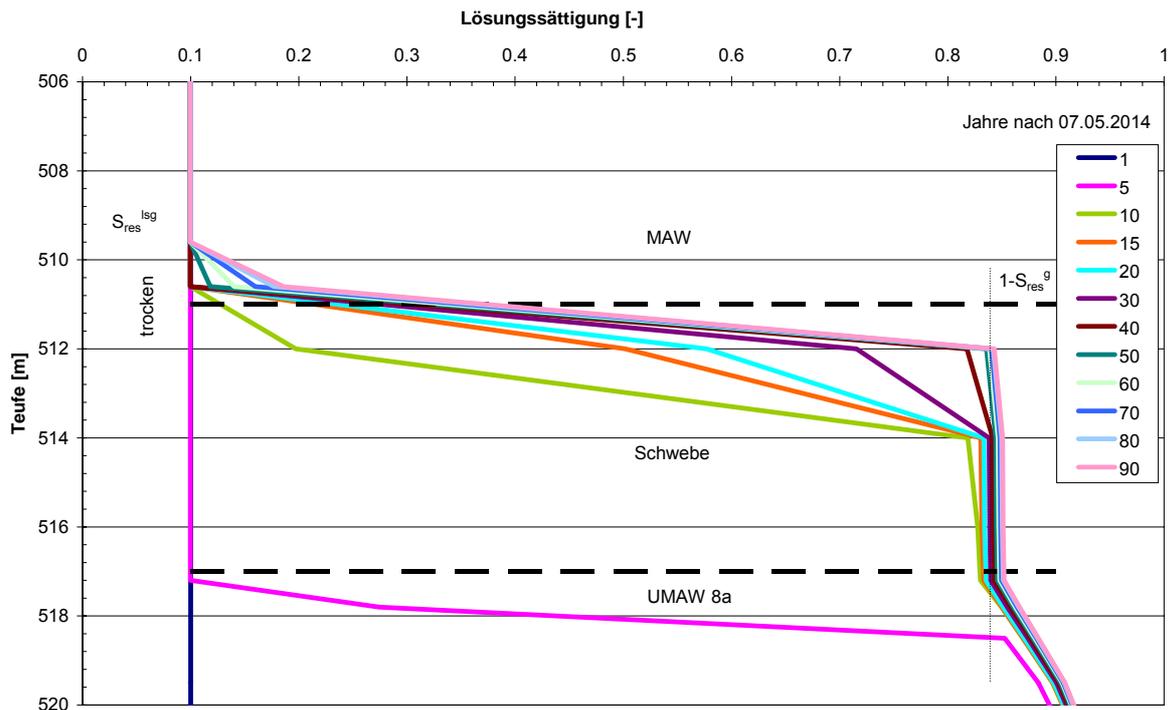


Abb. 6.6-2: Sättigungsprofile längs einer vertikalen Linie durch den MAW-Fasskegel, die Schwebel und den Firstbereich des Abbaus 8a/532 zu verschiedenen Zeiten

Die Ergebnisse der Modellrechnungen erlauben folgende Schlussfolgerungen und Wertungen:

Das hier beschriebene und angewendete Zweiphasen-Detailmodell MAW bildet die Prozesse und geometrischen Verhältnisse in der Umgebung der MAW-Kammer hinreichend genau ab, um den Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel zu simulieren. Verbleibende Unsicherheiten fanden durch Variation der Parameter Berücksichtigung.

Der Lösungszutritt in den Nahbereich des ELB MAW erfolgt durch „gravitativ“ angetriebene, natürliche Fluidbewegung aus dem Abbau 8/532 des Baufelds in der Südflanke. Die hochviskose Lösung dringt jedoch nur langsam in die beiden Abbaue des Nahbereichs ein und vermag die darin anfänglich vorhandene Grubenluft nicht schnell zu verdrängen. Ein Teil der Grubenluft bleibt eingeschlossen und wird zunehmend im Porenraum des MAW-Fasskegels, im Firstbereich der Abbaue 8a/532 und 8b/532 sowie in der dazwischen liegenden Schwebel komprimiert.

Bei dem an die Betriebsphase anschließenden Druckanstieg in der Grube wird die im Nahbereich verbleibende Grubenluft weiter komprimiert. In den Modellrechnungen entweicht dabei laufend etwas Grubenluft entlang der unterstellten Wegsamkeiten von der Firste des Nahbereichs zum Baufeld in der Südflanke. Dadurch vermag die in den Abbau 8a/532 eingetretene Lösung auch in die Schwebel zu gelangen und diese zu durchdringen. Dabei spielen die Permeabilitäten der unterstellten Wegsamkeiten nur eine untergeordnete Rolle. Der anschließende geringe, im Modell ermittelte kapillare Aufstieg von Lösung in den MAW-

Fasskegel ist eine Folge des Kapillardrucks, der für den Fasskegel angesetzt wurde. Dieser wird im Modell wahrscheinlich überschätzt, so dass der berechnete kapillare Lösungsaufstieg in den Fasskegel eher unwahrscheinlich ist. Als Referenzentwicklung kann deshalb angenommen werden, dass die Abfälle im MAW-Fasskegel trocken bleiben.

Die wesentlichen Prozesse, die diese Entwicklung beeinflussen (können), sind

- der Druckanstieg in der Nachbetriebsphase,
- in geringerem Maße die hydraulische Wegsamkeit von der Firste des Abbaus 8a/532 durch dessen Schweben und dann entlang des Durchhiebs zwischen MAW-Kammer und Abbau 8/511 (einschließlich Auflockerungszone),
- möglicherweise die anfängliche Lösungssättigung in dieser Wegsamkeit,
- ggf. auch ein verzögertes Einleiten von Schutzfluid auf der 532-m- und 511-m-Sohle.

Alle anderen Prozesse bzw. Parameter sind wenig sensitiv. Obwohl in keinem der durchgeführten Rechenfälle der Lösungspegel, d.h. die Obergrenze hoher Lösungssättigung, bis in den MAW-Fasskegel ansteigt, kann aufgrund der Ungewissheiten ein Lösungszutritt in den MAW-Fasskegel nicht vollständig ausgeschlossen werden. Er wird daher als alternatives Szenario mit einer geringen bis mäßigen Eintrittswahrscheinlichkeit beim Nachweis der Langzeitsicherheit berücksichtigt (vgl. Kapitel 5.2.3).

6.7 Übertrittsstelle zum Deckgebirge

6.7.1 Zielsetzung und Vorgehen

Die Modellrechnungen zur Lösungsbewegung und zum daran gekoppelten Schadstofftransport in Lösung für das Gesamtsystem Asse wurden getrennt für das Grubengebäude und das Deckgebirge durchgeführt. Die Wechselwirkungen der beiden Teilsysteme erfolgen über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke der Salzstruktur (vgl. Kapitel 2.2 und 2.6) und betreffen in Bezug auf die hydraulischen Prozesse und den Schadstofftransport in Lösung:

- die Wirkung vom Deckgebirge auf das Grubengebäude:
 - hydraulische Randbedingung am hydraulischen Kontakt (Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere): hydraulischer Druck und hydraulischer Widerstand gegen das Auspressen von Grubenlösung
- die Wirkung vom Grubengebäude auf das Deckgebirge:
 - Einpressen von relativ schwerer Grubenlösung, dadurch Änderung des hydraulischen Drucks und der Lösungsdichte im Deckgebirge
 - Einpressen von Druckluft (Betriebsphase) und Gas (Nachbetriebsphase), dadurch Änderung des hydraulischen Drucks und der Sättigungsverhältnisse
 - Einleiten von Schadstoffen in Lösung

Eine ausführliche Diskussion der Wechselwirkungen zwischen den beiden Teilsystemen enthalten /COL 2006a/ und /COL 2006b/.

In den Modellrechnungen wurden die hydraulischen Wechselwirkungen iterativ durch wechselseitige Übernahme von Modellergebnissen für das eine Teilsystem als Randbedingung von Modellrechnungen für das andere Teilsystem berücksichtigt. Das vorliegende Kapitel beschreibt das Vorgehen und die Quantifizierung der hydraulischen Schnittstelle.

Die Modellrechnungen zur Lösungsbewegung im Deckgebirge (Kapitel 6.8 und /COL 2006d/) beruhen für die Nachbetriebsphase auf einer als Randbedingung vorgegebenen Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude als Funktion der Zeit. Diese wird vorgängig mit einer Modellrechnung zur Lösungsbewegung im Grubengebäude ermittelt, welche ihrerseits auf einer angenäherten Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle abstützt. Aus den Modellrechnungen zur Lösungsbewegung im Deckgebirge wird dann eine aktualisierte Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle ermittelt, welche erneut als Eingangsgröße für eine Modellrechnung zur Lösungsbewegung und zum daran gekoppelten Schadstofftransport im Grubengebäude verwendet wird (Kapitel 7.5 und /ALSA 2006c/, /USA 2006/). Der Iterationsprozess wird so lange fortgeführt, bis keine weitere Aktualisierung der hydraulischen Schnittstellenparametrisierung notwendig ist.

Das Auspressen von Druckluft in das Deckgebirge während der Betriebsphase beeinflusst die hydraulischen Verhältnisse im Deckgebirge nur kurzzeitig und ist ohne nennenswerten Einfluss auf das spätere Auspressen von Grubenlösung. Das Auspressen von Gas aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge während der Nachbetriebsphase beeinflusst den Lösungsfluss durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere und die Ausbreitung von Grubenlösung im Deckgebirge nur begrenzt. Die Wechselwirkung zwischen dem Lösungsfluss und dem Gasfluss an der Schnittstelle wird vernachlässigt, die Parametrisierung der Schnittstelle erfolgt unabhängig von Beginn und Rate des Gasaustritts in das Deckgebirge. Die Rechtfertigung für diese Vereinfachung in Bezug auf das Auspressen von Grubenlösung wird pauschal, gemeinsam mit dem Einfluss anderer Näherungen überprüft. Chemische Wechselwirkungen zwischen der ausgepressten Grubenlösung und der Deckgebirgslösung, deren Einfluss auf die Dichte der Mischlösung und – durch Ausfällungen – auf Porosität und Permeabilität des Deckgebirges am Ort der chemischen Wechselwirkungen werden in den Modellrechnungen zur Lösungsbewegung im Deckgebirge und dadurch auch bei der Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle vernachlässigt.

Das Auspressen von Schadstoffen in das Deckgebirge hat auf die Lösungsbewegung im Deckgebirge keine Auswirkungen. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Deckgebirge werden in Form der so genannten „Transferfunktionen“ parametrisiert und mit den Ergebnissen der Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Grubengebäude zu Ergebnissen für das Gesamtsystem verarbeitet. Dies ist Gegenstand von Kapitel 6.8 und 7.5.

6.7.2 Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle

Die hydraulische Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge bestimmt die Beziehung zwischen dem Lösungsdruck an der Schnittstelle (Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere) und der Auspressrate von Grubenlösung in das Deckgebirge, wobei sich die Beziehung mit der Zeit ändert. Die zeitliche Änderung ist eine Folge der zunehmend größeren Menge an relativ schwerer und hoch viskoser Grubenlösung im Deckgebirge. Zu jeder Zeit t besteht zwischen Lösungsdruck und Auspressrate eine lineare Beziehung. Diese beschreibt, wie sich der Lösungsdruck an der Schnittstelle bei einer hypothetischen Änderung der Auspressrate ändern würde²⁶. Der Lösungsdruck bei einem hypothetischen kurzzeitigen Absinken der Auspressrate auf 0 wird mit $p_0(t)$ bezeichnet. Die Modellrechnungen zur Lösungsbewegung im Deckgebirge ergeben – jeweils als Funktion der Zeit – den Lösungsdruck an der Schnittstelle und die Auspressrate, nicht jedoch den Wert von $p_0(t)$. Dieser wurde näherungsweise aus den Modellergebnissen abgeleitet (siehe unten).

Eine geeignete Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle, d.h. der Beziehung zwischen Lösungsdruck an der Schnittstelle und Auspressrate, zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich bei einer (begrenzten) Änderung der Auspressrate aus dem Grubengebäude nicht oder nur in vernachlässigbarer Weise ändert. Die nachfolgend beschriebene und angewendete Parametrisierung beruht auf den Modellergebnissen zur Lösungsbewegung im Deckgebirge und auf folgenden Näherungen:

- Für die Parametrisierung der Schnittstelle und bei gegebener hydrogeologischer Modellvorstellung lässt sich die Verteilung der Grubenlösung im Deckgebirge für jeden Zeitpunkt in ausreichend guter Näherung durch die bis dahin kumuliert ausgepresste Menge Grubenlösung V beschreiben. Anstelle einer Parametrisierung als Funktion der Zeit t kann eine Parametrisierung als Funktion der bis dahin kumuliert ausgepressten Menge Grubenlösung V verwendet werden. Dadurch steigt die Robustheit der Parametrisierung gegenüber Änderungen der Auspressrate erheblich.
- Die zeitliche Variabilität von $p_0(t)$ bzw. $p_0(V)$ wird vernachlässigt und p_0 als zeitlich konstant angesetzt. Als Wert von p_0 wurde näherungsweise der im Modell berechnete Lösungsdruck an der Schnittstelle nach langen Zeiten gewählt. Der Fehler dieser Näherung wird auf weniger als 0,5 MPa geschätzt.

Mit diesen Näherungen lässt sich die hydraulische Schnittstelle wie folgt parametrisieren:

$$Q(p,V) = \frac{1}{R(V)} \cdot (p - p_0) \quad \text{bzw.} \quad p(Q,V) = p_0 + R(V) \cdot Q$$

mit Q Auspressrate
 p Lösungsdruck an der Schnittstelle
 p_0 Parameter (vgl. Text)

²⁶ in quasi-stationärer Näherung, d.h. nach Druckausgleich der dynamisch überhöhten Lösungsdrücke (hydraulische Diffusion). Dieser Druckausgleich erfolgt im Deckgebirge Asse sehr rasch /COL 2006d/.

- $R(V)$ hydraulischer Widerstand des Deckgebirges gegen das Auspressen von Lösung aus der Grube
 V bis dahin kumuliert ausgepresste Menge Grubenlösung

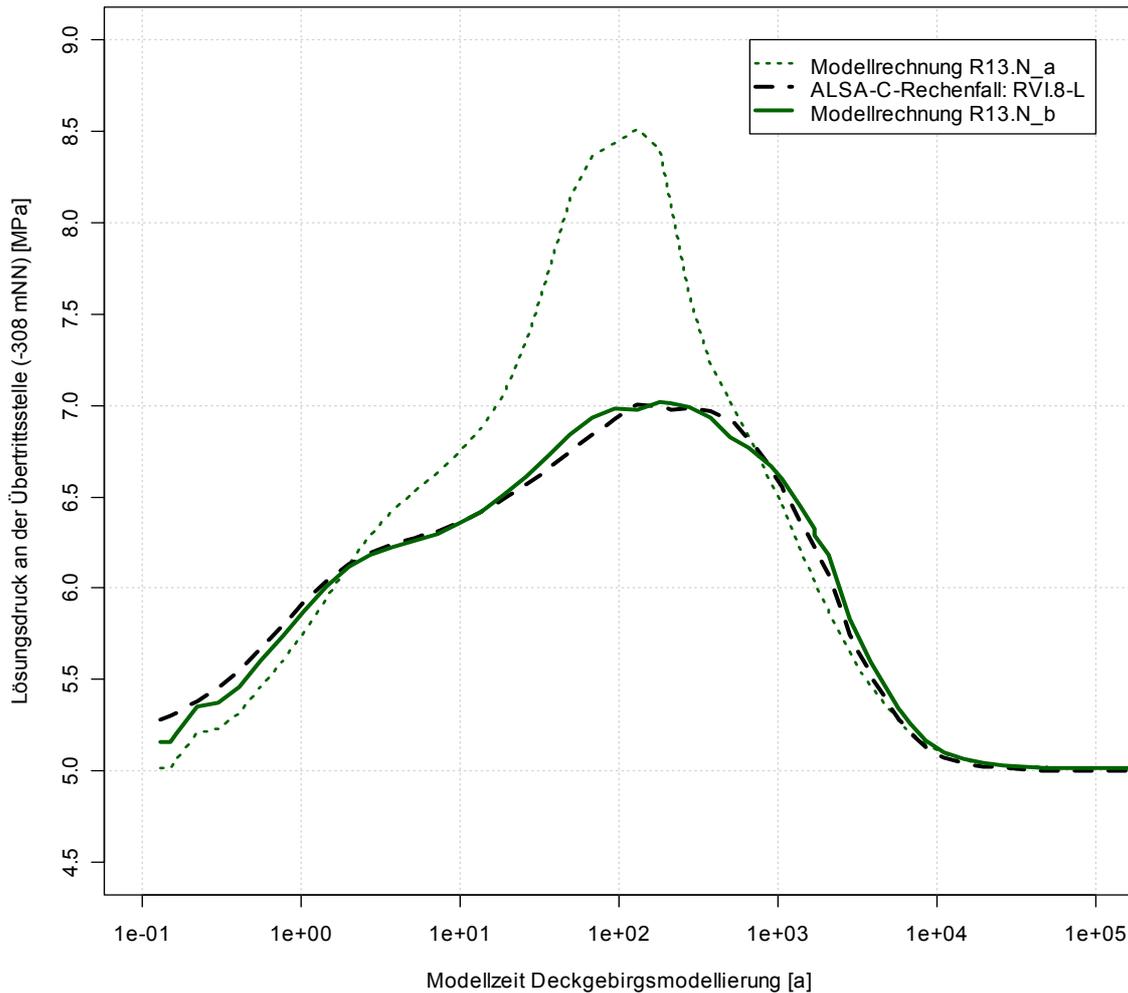
Die Parametrisierung umfasst die Angabe des Wertes von p_0 und der Funktion $R(V)$.

6.7.3 Ergebnisse der Parametrisierung und Bewertung

Auf eine Wiedergabe der Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle für die verschiedenen hydrogeologischen Modellvorstellungen wird hier verzichtet. Die Herleitung und die Ergebnisse sind Gegenstand von Kapitel 2.2.1 in /ALSA 2006c/.

Stattdessen soll nachfolgend an einem Beispiel die Güte der hydraulischen Schnittstellenparametrisierung dargelegt werden. Abbildung 6.7-1 zeigt den zeitlichen Verlauf des berechneten Lösungsdrucks an der Schnittstelle in der Nachbetriebsphase einerseits gemäß zwei Rechenläufen der Modellrechnung für den Deckgebirgs-Rechenfall R13 und andererseits gemäß Grubengebäude-Rechenfall RVI.8-L. Der Grubengebäude-Rechenfall beruht auf der Schnittstellen-Parametrisierung, die aus dem Deckgebirgs-Rechenlauf R13.N_a abgeleitet wurde, und lieferte die Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude für den Deckgebirgs-Rechenlauf R13.N_b.

Der Unterschied zwischen den beiden letzten Kurven der Iteration ist sehr klein. Dies erlaubte den Abbruch der Iteration angesichts des relativ geringen Einflusses, den der Lösungsdruck an der Schnittstelle auf die Prozesse in der Grube bei beschränkten Veränderungen ausübt /ALSA 2005a/. Die Schnittstellen-Parametrisierung für die mit dem Deckgebirgs-Rechenfall R13 beschriebene hydrogeologische Modellvorstellung wurde aus den Ergebnissen des Rechenlaufs R13.N_b abgeleitet. Die Abbildung 6.7-1 zeigt an einem Beispiel, dass das gewählte Vorgehen zur Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge geeignet und robust ist.



L:\asse_dms\IV\R13\R13.N_postprocessing.RWed Oct 18 15:18:13 2006

Abb. 6.7-1: Zeitlicher Verlauf des Lösungsdrucks an der Schnittsstelle Grubengebäude – Deckgebirge gemäß zwei Rechenläufen für den Deckgebirgs-Rechenfall R13 und den – im Iterationsprozess dazwischen liegenden – Grubengebäude-Rechenfall RVI.8-L

Das hier erläuterte Vorgehen wurde neben dem Deckgebirgs-Rechenfall R13 auch für die Deckgebirgs-Rechenfälle R12 und R14 durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Iterationen sind

- für die Deckgebirgs-Rechenfälle R12 und R13 in /ALSA 2006c/ und
- für den Deckgebirgs-Rechenfall R14 in /USA 2006/

umfassend beschrieben. Die Deckgebirgs-Rechenfälle werden in Kapitel 6.8 charakterisiert.

6.8 Hydrogeologische Modellrechnungen (Deckgebirge)

6.8.1 Konzeptuelles Modell und Datenbasis

Konzeptuelles Modell

Die hydrogeologischen Modellrechnungen für das Deckgebirge haben zum Ziel (1) die Ausbreitung von Grubenlösung und darin enthaltener Schadstoffe, welche in der Nachbetriebsphase aus dem Grubengebäude ausgepresst werden, im Deckgebirge abzubilden und aus den Ergebnissen Aussagen zu den möglichen Schadstoffkonzentrationen in oberflächennahen Grund- und Oberflächenwässern abzuleiten, (2) den hydraulischen Widerstand und dessen zeitliche Entwicklung zu ermitteln, den das Deckgebirge dem Auspressen von Lösung aus der Grube entgegenstellt (vgl. Kapitel 6.7) und (3) den aus hydraulischer Sicht maximal möglichen pneumatischen Stützdruck zu bestimmen, der während des Einleitens von Schutzfluid in das Baufeld in der Südflanke im Grubengebäude aufgebracht werden kann, ohne dass anhaltend Druckluft durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Deckgebirge entweicht.

Den Modellrechnungen zu Grunde liegt die Existenz von hydraulischen Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge in der Südflanke der Salzstruktur zwischen 500 m und 574 m Teufe (Übertrittsstelle). Die Existenz von weiteren hydraulischen Wegsamkeiten – auch solchen entlang der verschlossenen Tagesschächte – wird hier ausgeschlossen (vgl. Kapitel 2.2). Die Modellrechnungen konzentrieren sich deshalb auf das Deckgebirge in der Südflanke und das verstürzte Deckgebirge über der Salzstruktur.

Das Deckgebirge in der Südflanke ist eine steilstehende Abfolge von hydrogeologischen Einheiten unterschiedlicher Permeabilität, die von (meist) steilstehenden Störungszonen durchzogen sind. Der Salzgehalt des Deckgebirgswassers nimmt mit der Teufe zu. In Teufen, die für die Ausbreitung von Grubenlösung von Bedeutung sind, herrschen an NaCl gesättigte Verhältnisse. Im Vergleich mit gesättigter NaCl-Lösung (Dichte ca. 1200 kg/m^3 , dynamische Viskosität $1,9 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) weist Grubenlösung sowohl eine höhere Dichte (ca. 1300 kg/m^3) als auch eine höhere dynamische Viskosität (ca. $8 \text{ mPa}\cdot\text{s}$) auf. Das hydrogeologische Modell wurde deshalb zeitabhängig, dreidimensional und mit variabler Dichte und variabler Viskosität konzipiert. Eine ausführliche Beschreibung des Modellkonzeptes, der Umsetzung in ein Rechenmodell und dessen Anwendung enthält /COL 2006d/.

Die Modellausdehnung wurde im Hinblick auf die Zielsetzung der Modellrechnungen und unter Berücksichtigung der verfügbaren Daten sorgfältig festgelegt. Dabei war abzuwägen zwischen der Wahl eines Randes in relativ geringem Abstand vom interessierenden Gebirgsbereich, wodurch die mehr oder weniger gut bekannten Randbedingungen einen gewissen Einfluss auf die relevanten Modellergebnisse haben können und diesbezüglich überprüft werden müssen, und einem Modellrand in größerem Abstand, wodurch das Modell Gebirgsbereiche mit relativ schlechter Datenbasis einschließt, deren Einfluss ebenfalls überprüft werden muss. Beide Vorgehensweisen beinhalten Ungewissheiten, allerdings in unterschiedlicher Weise. Die Modellausdehnung wurde in Abwägung dieser Umstände restriktiv gewählt: Das Modell erstreckt sich in Längsrichtung der Salzstruktur über ca. 4 km von der Kulminati-

on der Grundwasseroberfläche im Muschelkalk zwischen Asseburg und Bismarck-Turm (westlich von Wittmar) bis zur Anhöhe südlich der Kl. Vahlberger Buchen östlich der Ammerbeek, wo ebenfalls eine Kulmination des Grundwasserspiegels im Muschelkalk vermutet wird. Quer zur Salzstruktur beträgt die Modellausdehnung rund 0,8 km. Westlich der Diagonalstörung Groß Vahlberg bildet die Basis des gering durchlässigen Unteren Buntsandstein der Nordflanke die Modellgrenze. Östlich der Diagonalstörung folgt der Modellrand der Nordgrenze des verstürzten Deckgebirges, er ist dort abschnittsweise als durchlässig angesetzt. Den Modell-Südrand bildet die Basis des mächtigen und gering durchlässigen Unteren Keuper. Die Modell-Basis verläuft von Norden nach Süden zunächst entlang der Grenze der Salzstruktur (einschließlich Röt *so1Na*), dann in der Tiefe -700 mNN durch das Röt und den Unteren Muschelkalk, anschließend entlang der Basis, dem Salzspiegel und der Hangendgrenze des Muschelkalksalzes (*mmNa*) und schließlich in der Tiefe -500 mNN durch den Oberen Muschelkalk. Das Modell ist in Abbildung 6.8-1 dargestellt.

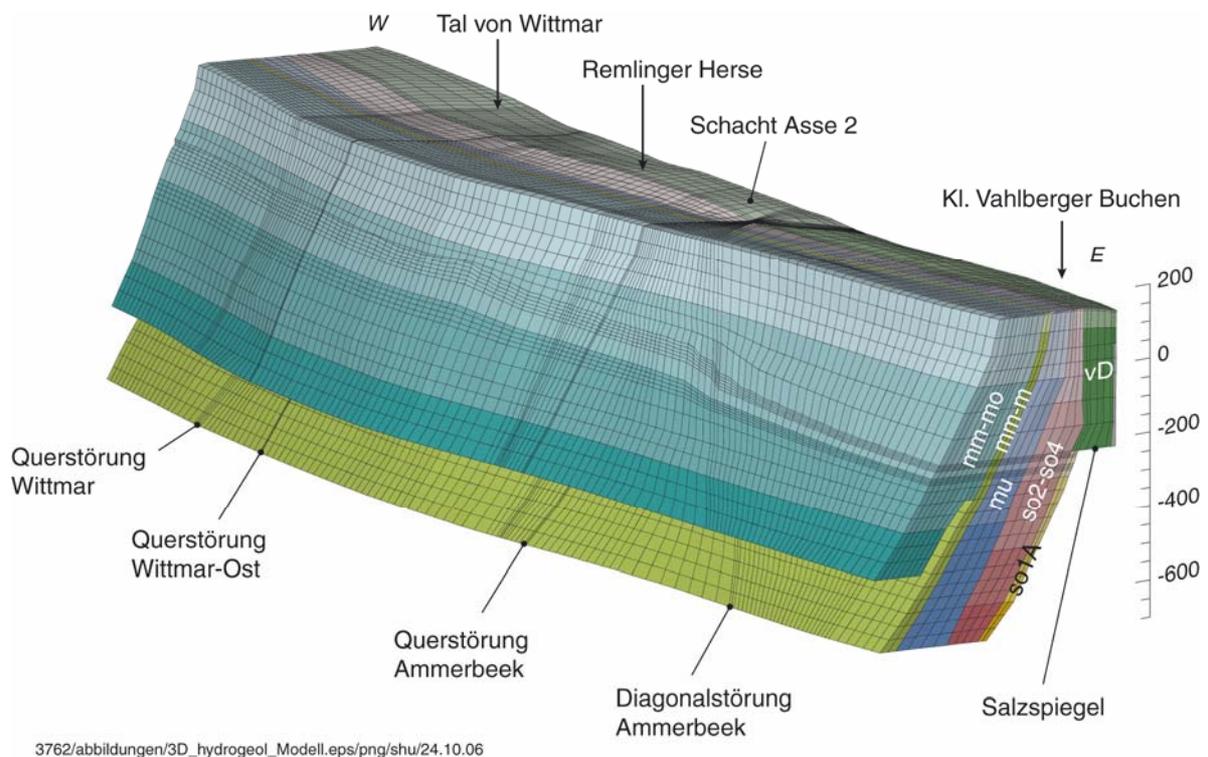


Abb. 6.8-1: 3D-Ansicht des hydrogeologischen Modells für das Deckgebirge (dargestellt ist das Modell mit grober Diskretisierung)

Die hydrogeologischen Einheiten und die dominanten Störungszonen (von West nach Ost: Querstörung Wittmar, Querstörung Wittmar-Ost, Querstörung Ammerbeek und Diagonalstörung Ammerbeek) werden als dreidimensionale Strukturen mit bereichsweise konstanter Permeabilität und Porosität abgebildet. Die Permeabilität wird – außer in der Verkarstungszone des Rötanhydrit *so1A* nahe des Salzspiegels – als isotrop angesetzt. Sie nimmt in allen hydrogeologischen Einheiten stufenweise mit zunehmender Tiefe ab, die Tiefenbereiche sind in Abbildung 6.8-1 ersichtlich. Die angesetzten Permeabilitätswerte schließen den hydraulischen Einfluss von nicht explizit modellierten Störungszonen ein. Die hydrogeologischen

Einheiten sind von Norden nach Süden: verstürztes Deckgebirge (vD), Rötanhydrit (*so1A*), Röttaquitard (*so2-so4*), Unterer Muschelkalk (*mu*), mergelige Schichten des Mittleren Muschelkalk (*mm-m*) und Oberer Muschelkalk (*mo*) (vgl. Kapitel 2.5). Sie sind im Modell durchwegs durchgehend, d.h. sie weisen keine „Fenster“ auf und sind an Störungszonen nicht versetzt²⁷. Die geringmächtigen Einheiten *so1A* und *mm-m* sind mit einer konstanten Mächtigkeit, die übrigen Einheiten auf der Basis von Tiefenlinienplänen im Modell abgebildet, wobei diese Tiefenlinienpläne die Geometrie dieser Einheiten vereinfacht wiedergeben. Der Rötanhydrit *so1A* wird als geogen beeinflusst und deshalb als mäßig durchlässig modelliert. Zusätzlich wird im Modell angenommen, dass die Anhydritmittel des Zechstein (*am*) eine hydraulische Wegsamkeit zwischen dem Rötanhydrit *so1A* oberhalb der Übertrittsstelle und dem verstürzten Deckgebirge bilden.

Die in Bohrungen nachgewiesenen Subrosionsgerinne zwischen Zechstein-Salzspiegel und Hutgestein werden im Modell – wegen fehlender Kenntnisse zum genauen Verlauf – als geringmächtige Struktur an der Basis des verstürzten Deckgebirges abgebildet, welche eine hohe Permeabilität aufweist und den Salzspiegel von dessen Nordrand bis zum Südrand flächig überlagert. Im Modell besteht ein durchgehender hydraulischer Kontakt zwischen Rötanhydrit *so1A* und der Modelleinheit „Subrosionsgerinne“. Die Ostgrenze der Subrosionsgerinne wurde rund 85 m östlich der Bohrung H17 angesetzt /COL 2006d/.

Der Röttaquitard *so2-so4* wirkt als dominanter Grundwassergeringleiter zwischen der Salzstruktur, dem verstürzten Deckgebirge und dem Rötanhydrit *so1A* einerseits und dem Grundwasserleiter Muschelkalk andererseits. Im Muschelkalk trennt das Muschelkalk-Salz (*mmNa*) unterhalb des *mmNa*-Salzspiegels den Unteren Muschelkalk hydraulisch vom Oberen Muschelkalk.

Die Dichte und die Viskosität der Lösung im Deckgebirge, welche sich örtlich und zeitlich ändern können, werden als Funktionen eines fiktiven Lösungsinhaltsstoffes angesetzt, dessen Konzentration mit c bezeichnet wird und der sich wie ein inerter Tracer durch Advektion, Dispersion und Diffusion ausbreitet. Die Dispersion des dichtebestimmenden fiktiven Lösungsinhaltsstoffes entspricht dabei dem dispersiven Mischen von Lösungen unterschiedlicher Dichte und Viskosität, die Diffusion des fiktiven Lösungsinhaltsstoffes dem diffusiven Austausch von realen dichtebeeinflussenden Ionen, z.B. Na^+ , Cl^- und Mg^{2+} , zwischen Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung. Im Modell entspricht eine Lösung mit $c = 1 \text{ mol/m}^3$ in Bezug auf Dichte und Viskosität einer gesättigten NaCl-Lösung, eine solche mit $c = 1,5 \text{ mol/m}^3$ unverdünnter Grubenlösung. Die Werte wurden derart gewählt, dass die Beziehung zwischen der Lösungsdichte und c linear angesetzt werden kann, wodurch die Mischung von Lösungen im Modell sowohl massen- als auch volumenerhaltend ist. Dichteänderungen als Folge von Mineralausfällungen bei der Mischung von Grubenlösung und gesättigter Deckgebirgslösung wie auch die Auswirkungen von solchen Ausfällungen auf die lokale Permeabilität und Porosität werden im Modell vernachlässigt. Die Parametrisierung der dynamischen Viskosität als Funktion der Konzentration c des dichtebestimmenden Lösungsinhaltsstoffes entspricht im Bereich zwischen Süßwasser und gesättigter Deckgebirgslösung einer in der Literatur angeführten Parametrisierung für die Mischung von Süßwasser

²⁷ Der hydrogeologische Einfluss von Fenstern und Versätzen kann bei Bedarf durch lokale Änderungen von Permeabilität und Porosität berücksichtigt werden.

und gesättigter NaCl-Lösung. Für $c > 1 \text{ mol/m}^3$ stützt sie sich auf Modellrechnungen zur Viskosität von Mischungen von Deckgebirgs- und R-Lösung ab. Die modelltechnischen Einzelheiten sind in /COL 2006d/ beschrieben.

Die Ausbreitung von gelösten Schadstoffen im Deckgebirge wird mit dem gleichen dreidimensionalen Modell durch die Simulation der Ausbreitung eines inerten Tracers (Bezeichnung der Konzentration: c_T) modelliert. Berücksichtigt werden dadurch Advektion, Dispersion längs und quer zur Ausbreitungsrichtung sowie Diffusion, nicht jedoch Sorption und radioaktiver Zerfall. Der Einfluss des letztgenannten Prozesses wird mit Hilfe von „Transferfunktionen“ (Erläuterung s.u.) in die Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung über den Lösungspfad einbezogen (Kapitel 7.5).

Eine der Zielsetzungen der Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung ist die Berechnung von Schadstoffkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser oder Oberflächenwasser in den Exfiltrationsgebieten. Im Modellgebiet sind dies (1) der Taleinschnitt der Ammerbeek und in der Verlängerung entlang der Diagonalstörung Groß Vahlberg im verstützten Deckgebirge (vD-Amm), (2) der Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk (m-Amm) und (3) der Taleinschnitt des Rothebachs und östlich davon bis zur Querstörung Wittmar-Ost im Muschelkalk (m-Witt). Die Exfiltration in diese Gebiete schließt auch den Schadstoffübertritt in die quartären Talfüllungen und den Schadstofftransport mit dem Grundwasserfluss in diesen Talfüllungen aus dem Modellgebiet in die Remlinger Mulde – aus dem Exfiltrationsgebiet vD-Amm möglicherweise auch nach Norden in die Schöppenstedter Mulde – mit ein. Mit dem hydrogeologischen Modell berechnet werden Tracerkonzentrationen c_T im oberflächennahen Wasser für normierte, zeitlich begrenzte Übertritte an der Übertrittsstelle in das Deckgebirge. Aus Übertrittsraten von Schadstoffen aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge, die mit den Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Grubengebäude ermittelt werden, lassen sich daraus oberflächennahe Schadstoffkonzentrationen als Folge der Freisetzung aus dem Grubengebäude ermitteln.

Mit dem hydrogeologischen Modell berechnet werden im Einzelnen:

- (i) die oberflächennahen Tracerkonzentrationen für eine Tracerkonzentration in der an der Übertrittsstelle in das Deckgebirge eingepressten Lösung von $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$ ab 2 000 Jahre²⁸ nach Beginn der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude. Das zeitliche Minimum des Verhältnisses zwischen der Konzentration $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$ beim Übertritt in das Deckgebirge und der oberflächennahen Konzentration wird als Verdünnungsfaktor bezeichnet und für jedes Exfiltrationsgebiet ermittelt. Der ungünstigste Wert der drei Exfiltrationsgebiete²⁹ wurde in /ALSA-C 2005a/ für die Umrechnung von Radionuklidkonzentrationen beim Austritt aus der Grube in oberflächennahe Konzentrationen verwendet. Mit diesem Verfahren bleiben die Transportverzögerung im Deckgebirge und die daraus resultierende Abnahme von Radionuklidkonzentrationen durch radioaktiven Zerfall unberücksichtigt.
- (ii) die oberflächennahen Tracerkonzentrationen für eine Tracerkonzentration in der an der Übertrittsstelle in das Deckgebirge eingepressten Lösung von $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$ während

²⁸ Dies entspricht ungefähr der Transportverzögerung im Grubengebäude.

²⁹ ermittelt mit den damaligen hydrogeologischen Modellrechnungen der Phase II (Rechenfall R8)

vorgegebenen Zeitintervallen. Dabei sind die Zeitintervalle derart gewählt, dass sie zusammen die Zeitachse ab Beginn des möglichen Schadstoffaustritts aus dem Grubengebäude abdecken. Das Verhältnis zwischen der oberflächennahen Tracerkonzentration und der Konzentration $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$ wird als Transferfunktion für das entsprechende Zeitintervall des Tracerübertritts in das Deckgebirge und das betrachtete Exfiltrationsgebiet bezeichnet. Mit den Ergebnissen für die Schadstoffkonzentrationen beim Übertritt aus der Grube in das Deckgebirge, die mit den Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Grubengebäude ermittelt werden, und den Transferfunktionen lassen sich die oberflächennahen Schadstoffkonzentrationen und deren zeitliche Entwicklung – für Radionuklide unter Einbezug des radioaktiven Zerfalls – näherungsweise ermitteln³⁰. Das Verfahren und die Berechnung der Transferfunktionen sind ausführlich in /TRA 2006/ beschrieben. Die Modellrechnungen in /ALSA 2006c/ beruhen auf diesem Verfahren, sie sind Gegenstand von Kapitel 7.5.

Aus den Radionuklidkonzentrationen in oberflächennahem Wasser werden mit Hilfe der Dosiskonversionsfaktoren die Strahlenexposition von postulierten betroffenen Personen berechnet /GSF 2006i/. Dies setzt voraus, dass das radionuklidhaltige oberflächennahe Wasser einen ausreichend niedrigen Salzgehalt aufweist, um in dem Ausmaß am Biosphärenkreislauf teilzunehmen, der bei der Berechnung der Dosiskonversionsfaktoren in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zu § 47 StrlSchV unterstellt wird. Um dieser Voraussetzung gerecht zu werden, beziehen sich hier die oberflächennahen Tracerkonzentrationen und damit die Verdünnungsfaktoren und Transferfunktionen auf ein „biosphärenverträgliches“ oberflächennahes Grundwasser oder Oberflächenwasser mit einem NaCl-Gehalt von 1 g/l. Dies ist mehr, als nach der Trinkwasserverordnung zulässig ist, und führt zu höheren maßgebenden Schadstoffkonzentrationen als bei einer Verdünnung auf den NaCl-Gehalt gemäß Trinkwasserverordnung.

Mit dem Bezug auf ein oberflächennahes Wasser mit dem biosphärenverträglichen NaCl-Gehalt von 1 g/l lassen sich die oberflächennahen Tracerkonzentrationen unabhängig vom oberflächennahen Grundwasserfluss ermitteln. Da die potenzielle Strahlenexposition, welche in Anlehnung an die AVV berechnet wird, von räumlich gemittelten Schadstoffkonzentrationen und nicht von punktuellen Werten abhängt, werden auch die oberflächennahen Tracerkonzentrationen räumlich gemittelt berechnet. Damit zusätzlich die Ergebnisse unabhängig von den berechneten oberflächennahen hydraulischen Verhältnissen im Exfiltrationsgebiet sind, welche ihrerseits aufgrund der Modellkonzeption nur beschränkt belastet werden können, wird die oberflächennahe Tracerkonzentration aus dem Tracerfluss und dem NaCl-Fluss ermittelt, die in der Tiefe +80 mNN nach oben in den Gebirgsbereich unterhalb des betrachteten Exfiltrationsgebiets erfolgen. Schadstoffe, die aus der Tiefe über eine gedachte horizontale Fläche bei +80 mNN transportiert werden, gelten damit hier, im Langzeitnachweis, als exfiltriert und als „in die Biosphäre freigesetzt“. Zur Kontrolle werden zusätzlich punktuelle Werte für Tracerkonzentrationen in oberflächennahem Wasser mit einem NaCl-Gehalt von 1 g/l aus Tracerkonzentrationen c_T und NaCl-Gehalten (umgerechnet aus der Konzentration c) berechnet, die mit dem Modell für ausgewählte oberflächennahe Punkte

³⁰ Die Verwendung von Transferfunktionen für die Berechnung der Schadstoffausbreitung im Deckgebirge entspricht dem Green'schen Verfahren zur Lösung von linearen partiellen Differentialgleichungen. Die Transferfunktionen entsprechen dabei den Green'schen Funktionen.

ermittelten wurden. Das Vorgehen für die Berechnung der Tracerkonzentrationen in oberflächennahem Wasser mit dem biosphärenverträglichen NaCl-Gehalt von 1 g/l ist in /COL 2006d/ und /TRA 2006/ beschrieben.

Die hydraulischen Randbedingungen werden an den seitlichen Modellrändern und an der Modellbasis bereichsweise als Wasser- bzw. Lösungsflüsse vorgegeben, wobei für den größten Teil der gewählten Ränder eine Fluss-0-Randbedingung gilt. Die Fluss-0-Randbedingungen begründen sich entweder durch eine begrenzende absolut undurchlässige geologische Einheit (Zechstein- oder Muschelkalk-Salz), durch begrenzende geringdurchlässige Einheiten (Keuper, Unterer Buntsandstein) oder durch die Einschätzung, dass der Wasserfluss über den Rand gering ist (unterirdische Grundwasserscheiden, schichtquerende Ränder durch Aquitarde, Modellbasis im Rötanhydrit so1A und Muschelkalk). Die einzige Ausnahme bildet der Bereich „Subrosionsgerinne“ des Modell-Westrandes, wo gestützt auf gemessene Werte der hydraulische Druck vorgegeben wird. Die Modelloberfläche entspricht der Grundwasseroberfläche, dort wird die Randbedingung als Druck (Atmosphärendruck) vorgegeben. Dadurch wirkt die Grundwasseroberfläche als Randbedingung und stellt eine Eingabegröße für die Modellrechnungen dar. Kontrollgröße ist somit die Grundwasserneubildung, welche vom Modell berechnet wird und anhand von unabhängigen Daten zu überprüfen ist. Die Festlegung der Modellrandbedingungen und insbesondere die Wahl der seitlichen Modellränder ohne Fluss-0-Randbedingung und die dort anzusetzenden Grundwasserflüsse sind ausführlich in /COL 2006d/ beschrieben.

Einen besonderen Randbereich bildet die Übertrittsstelle. Für die Modellierung des hydrogeologischen Zustandes im Deckgebirge vor dem Einsetzen des Lösungszutritts in das Grubengebäude ist die Übertrittsstelle ein Fluss-0-Rand. Für die Modellierung des heutigen Zustandes bildet die Übertrittsstelle einen Modellrand mit dem vorgegebenen Lösungsdruck von 1 bar, dem heutigen Atmosphärendruck im Grubengebäude³¹. Für die Simulation der Nachbetriebsphase und damit für die Berechnung der Schadstoffausbreitung im Deckgebirge ist die Übertrittsstelle wiederum ein Rand mit vorgegebenem (zeitlich veränderlichem) Fluss: Als Randbedingung wird die Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude als Funktion der Zeit vorgegeben, welche mit Modellrechnungen zum Fluid- und Schadstofftransport im Grubengebäude ermittelt wurde. Die Abstimmung zwischen den Modellrechnungen für das Grubengebäude und den hydrogeologischen Modellrechnungen für das Deckgebirge sind Gegenstand von Kapitel 6.7.

Die Randbedingungen für den dichtebestimmenden Lösungsinhaltsstoff sind zum einen durch die Salzlager im Modellgebiet, das Zechstein- bzw. das Rötensalz der Salzstruktur und das Muschelkalksalz $mmNa$, und zum anderen – in der Nachbetriebsphase – durch den Übertritt von Grubenlösung mit $c = 1,5 \text{ mol/m}^3$ in das Deckgebirge gegeben³². An den übrigen Modellrändern wurden die üblichen Randbedingungen gewählt /COL 2006d/.

³¹ Dies entspricht der plausiblen Annahme, dass der Fließweg durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere keinen oder keinen relevanten Druckabfall bewirkt (vgl. /COL 2006a/).

³² Bei den Modellrechnungen für die Nachbetriebsphase wurde modelltechnisch sichergestellt, dass die Modellränder, welche durch Salzgestein gebildet werden und wo deshalb die Randbedingung $c = 1 \text{ mol/m}^3$ gilt, bei Anwesenheit von hohen Anteilen Grubenlösung ($c > 1 \text{ mol/m}^3$) nicht als unrealistische Senken für den dichtebestimmenden Lösungsinhaltsstoff wirken.

In Bezug auf die Randbedingungen für den Tracer ist nur jene an der Übertrittsstelle in der Nachbetriebsphase von Interesse. Je nach der Zielsetzung für die Ausbreitungsrechnung wurde als Tracerkonzentration in der zutretenden Grubenlösung der Wert $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$, entweder zeitlich unbegrenzt ab 2 000 Jahre (Zielsetzung: Verdünnungsfaktor) oder für eine begrenzte vorgegebene Zeitperiode (Zielsetzung: Transferfunktion), und sonst $c_T = 0$ angesetzt.

Daten

Für die Eingangsdaten, welche für die oben beschriebenen hydrogeologischen Modellrechnungen notwendig sind, besteht eine befriedigende bis gute Datenlage in Bezug auf die Permeabilitäten und die fluidzugänglichen Porositäten. Die Datenlage ist in /COL 2006c/ dargestellt. Eine Einschränkung ist für die Störungzonen anzubringen, für die nur wenig standortspezifische Daten (Tiefbohrung R6) vorliegen und deren Permeabilitäten deshalb unter Zuhilfenahme eines Analogieschlusses angesetzt wurden. Die Permeabilitäten des Scherdeformationsbereichs S3/D9 im Röttaquitard, des Rötanhydrit *so1A* oberhalb der Übertrittsstelle und der Anhydritmittel *am* wurden am heutigen Lösungszutritt in die Grube kalibriert. Dazu mussten Annahmen zum prozentualen Anteil des Lösungszutritts entlang der entsprechenden Zutrittspfade getroffen werden. Diese Annahmen charakterisieren die verschiedenen durchgeführten Rechenfälle (siehe unten und Kapitel 6.8.3).

Bei kürzeren Transportdistanzen wird die Transportzeit weniger von der fluidzugänglichen Porosität, dafür wesentlich von der Fließporosität bzw. dem Porenvolumen, in dem sich Deckgebirgslösung advektiv bewegt, mitbestimmt. Kürzere Transportdistanzen sind in diesem Zusammenhang solche mit Transportzeiten von wenigen 1 000 Jahren und treffen am Standort Asse auf die Transportpfade von der Übertrittsstelle in die Exfiltrationsgebiete vD-Amm und m-Amm, nicht jedoch auf jene in das Exfiltrationsgebiet m-Witt zu. Zu den Fließporositäten liegen für den Standort Asse keine standortspezifischen Daten vor. Sie wurden in der Tendenz ungünstig niedrig auf der Basis der fluidzugänglichen Porositäten abgeschätzt /COL 2006c/.

Zur Grundwasseroberfläche liegen gesicherte Daten für die in Geländeeinschnitten liegenden Exfiltrationsgebiete und – aus Bohrungen und Quellaustritten – für einzelne Stellen dazwischen vor. Mäßige Ungewissheiten bestehen in Bezug auf die Kulmination der Grundwasseroberfläche im Muschelkalk in den lokalen Infiltrationsgebieten Remlinger Herse und Auf dem Klaare – Kl. Vahlberger Buchen.

Zu den hydraulischen Randbedingungen an den seitlichen Modellrändern liegt nur für eine Stelle ein im Feld gemessener Wert vor, der bereits oben erwähnte hydraulische Druck in den Subrosionsgerinnen in einer Bohrung nahe des Modell-Westrandes. Die übrigen Randbedingungen lassen sich jedoch ausreichend genau abschätzen und haben zudem auf die relevanten Modellergebnisse nur einen beschränkten und überprüfbaren Einfluss.

Die Randbedingungen für den dichtebestimmenden Lösungsinhaltsstoff c sind – mit der nachfolgend aufgeführten Ausnahme – gut abgesichert. Die Ausnahme betrifft den Salzspiegel des Muschelkalksalzes *mmNa*. Dessen Tiefe und Verlauf von West nach Ost sind nur

ungenau bekannt. Sie beeinflussen die Versalzung des Muschelkalkwassers und dadurch die Grundwasserbewegung im Muschelkalk (vgl. Diskussion in /COL 2006d/).

Rechenfälle

Rechenfälle werden für konkrete hydrogeologische Modellvorstellungen durchgeführt, welche durch einen Satz Modellparameter und Randbedingungen charakterisiert sind. Die in /COL 2006d/ durchgeführten und beschriebenen Rechenfälle, welche dem Langzeitsicherheitsnachweis zugrunde gelegt wurden, unterscheiden sich im Wesentlichen in der Annahme bezüglich des Anteils der möglichen Zutrittspfade (vgl. auch Kapitel 2.6) am heutigen Lösungszutritt und – über die oben beschriebene Kalibrierung – in den daraus abgeleiteten Permeabilitäten des Scherdeformationsbereichs S3/D9, des Rötanhydrit *so1A* und der Anhydritmittel *am*. Sie sind nachfolgend in Kapitel 6.8.3 kurz charakterisiert. Jeder Rechenfall gliedert sich in einzelne Modellrechnungen. Deren Abfolge beschreibt konsistent die sich ändernden hydraulischen Zustände im Deckgebirge vom Zeitpunkt vor Einsetzen des Lösungszutritts in die Grube über den heutigen Zustand mit Lösungszutritt in die Grube, die Nachbetriebsphase mit Lösungsauspressung aus der Grube in das Deckgebirge bis mehr als 100 000 Jahre nach Ende der Betriebsphase. Die Auspressrate von Lösung aus der Grube in das Deckgebirge, Randbedingung für die hydrogeologische Modellrechnung zur Nachbetriebsphase, wird dabei mit einer Modellrechnung für die Fluidbewegung im Grubengebäude ermittelt, deren Parametrisierung der hydraulischen Schnittstelle zum Deckgebirge (vgl. Kapitel 6.7) der betrachteten hydrogeologischen Modellvorstellung für das Deckgebirge entspricht.

6.8.2 Numerisches Modell

Für die zeitliche und räumliche Diskretisierung und die numerische Lösung der Strömungs- und Transportgleichungen wurde das Programm NAMMU (Version 9.1) verwendet. NAMMU wurde während mehr als 10 Jahren entwickelt, schrittweise weiterentwickelt und mehrfach ausführlich verifiziert. Es wurde und wird noch in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten eingesetzt. Die räumliche Diskretisierung erfolgt durch Finite-Elemente. Die Modellrechnungen wurden mit der Formulierung der Strömungsgleichungen für die Zustandsgrößen Druck und Konzentration durchgeführt. Beide Zustandsgrößen werden innerhalb der Elemente durch lineare Basisfunktionen approximiert.

Das Elementnetz setzt sich ausnahmslos aus Hexaedern mit jeweils acht Knoten zusammen, deren Kantenlängen und Winkelmaße allerdings variieren. Es zählt knapp 500 000 Elemente und 520 000 Knoten. Die Kantenlängen betragen in den für die Hydraulik und die Schadstoffausbreitung wichtigen Modellbereichen ca. 10 m, in den übrigen Bereichen ca. 15 m bis 20 m. Das in Abbildung 6.8-1 dargestellte „grobe“ Elementnetz weist demgegenüber „nur“ etwa 100 000 Elemente mit mittlerer Kantenlänge von ca. 30 m auf.

6.8.3 Lösungsbewegung im Deckgebirge: Ergebnisse und Bewertung

Modellrechnungen wurden für folgende hydrogeologische Modellvorstellungen durchgeführt /COL 2006d/:

- R14 Rechenfall, wonach zwei Drittel der der Grube zutretenden Lösungsmenge über den Muschelkalk-Rötaquitard-Pfad zur Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere gelangen. Die Zutrittspfade führen hauptsächlich entlang hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten im Scherdeformationsbereich S3/D9 durch den Rötaquitard zur Flanke der Salzstruktur. Das dritte Drittel der zutretenden Deckgebirgslösung fließt etwa zu gleichen Teilen über die Pfade Rötanhydrit und Anhydritmittel zur Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere. Dieser Rechenfall beschreibt die wahrscheinlichen hydraulischen Verhältnisse im Deckgebirge an der Flanke der Übertrittsstelle, ausgenommen in Bezug auf den relativ hohen Anteil des Anhydritmittel-Pfades.
- R13 Rechenfall mit hydraulisch hoch wirksamem Scherdeformationsbereich S3/D9 und relativ geringdurchlässigem Rötanhydrit *so1A*. Der heutige Lösungszutritt in das Grubengebäude erfolgt zu einem sehr hohen Anteil (rund 90%) entlang des Scherdeformationsbereichs, der Rest ungefähr zu gleichen Teilen entlang des Rötanhydrit- und des Anhydritmittel-Pfades.
- R12 Rechenfall mit hydraulisch unwirksamem Scherdeformationsbereich S3/D9 und relativ gering durchlässigen geogenen Störungszonen durch den Rötaquitard. Der heutige Lösungszutritt in das Grubengebäude erfolgt hauptsächlich³³ aus dem verstürzten Deckgebirge entlang des Rötanhydrit *so1A* und streckenweise durch den Zechstein entlang der Anhydritmittel *am*, wobei der Anhydritmittelpfad ungefähr die Hälfte beiträgt.

Die Rechenfälle R13 und R12 spannen die vermuteten Verhältnisse in Bezug auf den Anteil des Muschelkalk-Rötaquitard-Pfades am heute stattfindenden Lösungszutritt in einer relativ großen Bandbreite auf. Sie stellen gleichzeitig verhältnismäßig extreme hydraulische Zustände im Deckgebirge dar.

Die Modellergebnisse für den Zustand vor Einsetzen des Lösungszutritts in die Grube und für den heutigen Zustand (mit Lösungszutritt) wurden für jeden Rechenfall mit beobachtbaren Größen verglichen. Es sind dies die Grundwasserneubildung, die Exfiltrationsraten an die Geländeoberfläche, der Abfluss in den Subrosionsgerinnen gegen Westen, die in Bohrungen gemessenen Lösungsdrücke, die Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze, die in Bohrungen beobachtete Salinität und der Salzaustrag in Exfiltrationsgebieten. Keiner der Rechenfälle konnte aufgrund der durchgeführten Vergleiche als mehr oder als weniger plausibel eingestuft werden. Die Vergleiche führten für alle Rechenfälle zur gleichen Schlussfolgerung /COL 2006d/: *In Anbetracht des komplexen hydrogeologischen Aufbaus des Deckgebirges und der notwendigerweise vereinfachten Abbildung mit dem Deckgebirgsmodell werden die beobachteten Sachverhalte im Allgemeinen befriedigend wiedergegeben. Abweichungen*

³³ Bei hydraulisch unwirksamem Scherdeformationsbereich S3/D9 und gering durchlässigen Störungszonen stammt nach den Modellrechnungen R12 nur etwa 1% des Lösungszutritts aus dem Muschelkalk-Rötaquitard-Pfad.

sind von untergeordneter Bedeutung oder führen eher zu einer Überschätzung der Ausbreitung von Schadstoffen in die Exfiltrationsgebiete. Das Deckgebirgsmodell kann für die abgebildete hydrogeologische Modellvorstellung deshalb als geeignet in Bezug auf die Zielsetzungen beurteilt werden. Erwähnenswert sind hier zwei Aspekte. Die in den Tiefbohrungen R5, R6, R7 und R8 gemessenen Lösungsdrücke zeigten z.T. auffallende Anomalien /COL 2006c/. Diese werden in den hydrogeologischen Modellrechnungen nicht abgebildet. Der zweite Aspekt betrifft die Lage der Süß-/Salzwassergrenze und den Salzaustrag unter bzw. ins Tal von Wittmar. Beide Vergleiche weisen auf eine geringere Versalzung des Muschelkalkwassers in beschränkter Tiefe im Modell als nach den Beobachtungen hin. Im Tal der Ammerbeek stimmen demgegenüber sowohl die im Modell ermittelte Tiefenlage der Süß-/Salzwassergrenze als auch die Rate des Salzaustrags mit den Beobachtungen befriedigend überein.

Die Bewegung der Deckgebirgslösung im heutigen Zustand mit Lösungszutritt in die Grube, berechnet für die wahrscheinlichen Verhältnisse im Deckgebirge (Rechenfall R14), zeigt Abbildung 6.8-2. Dargestellt sind die Filtergeschwindigkeiten in einem Schnitt quer zur Salzstruktur durch die Übertrittsstelle (Schnitt S1) und in einer Seitenansicht einer Fläche entlang des Rötanhydrit so1A (S5). Ersichtlich sind die gegen die Übertrittsstelle gerichteten Fließrichtungen im Rötakitard (so2-so4) – vor allem im Scherdeformationsbereich S3/D9 – mit Einfluss bis in den Muschelkalk und, in streichender Richtung, im Rötanhydrit so1A. Die unterirdische Grundwasserscheide unterhalb der Nordflanke der Remlinger Herse verläuft im verstützten Deckgebirge vertikal und verschiebt sich im Rötanhydrit so1A unterhalb des Salzspiegels mit zunehmender Tiefe nach Westen.

Die berechnete Verteilung des Lösungsdrucks im Deckgebirge unter den heutigen Bedingungen (Lösungszutritt) erlaubt, den maximalen pneumatischen Stützdruck zu ermitteln, der für das Einleiten des Schutzfluids in das Baufeld in der Südflanke im Grubengebäude aufgebracht werden kann, ohne dass Druckluft andauernd durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere und das Deckgebirge entweicht. Das Vorgehen für die Ermittlung dieses „Einschließdrucks“ des Deckgebirges ist in /COL 2006d/ dargestellt. Für alle durchgeführten Rechenfälle – einschließlich der vorgängig zu /COL 2006d/ analysierten Rechenfälle – beträgt der Einschließdruck mindestens 2 MPa, so dass beim vorgesehenen pneumatischen Stützdruck von maximal 1,5 MPa ein Sicherheitsabstand von 0,5 MPa besteht.

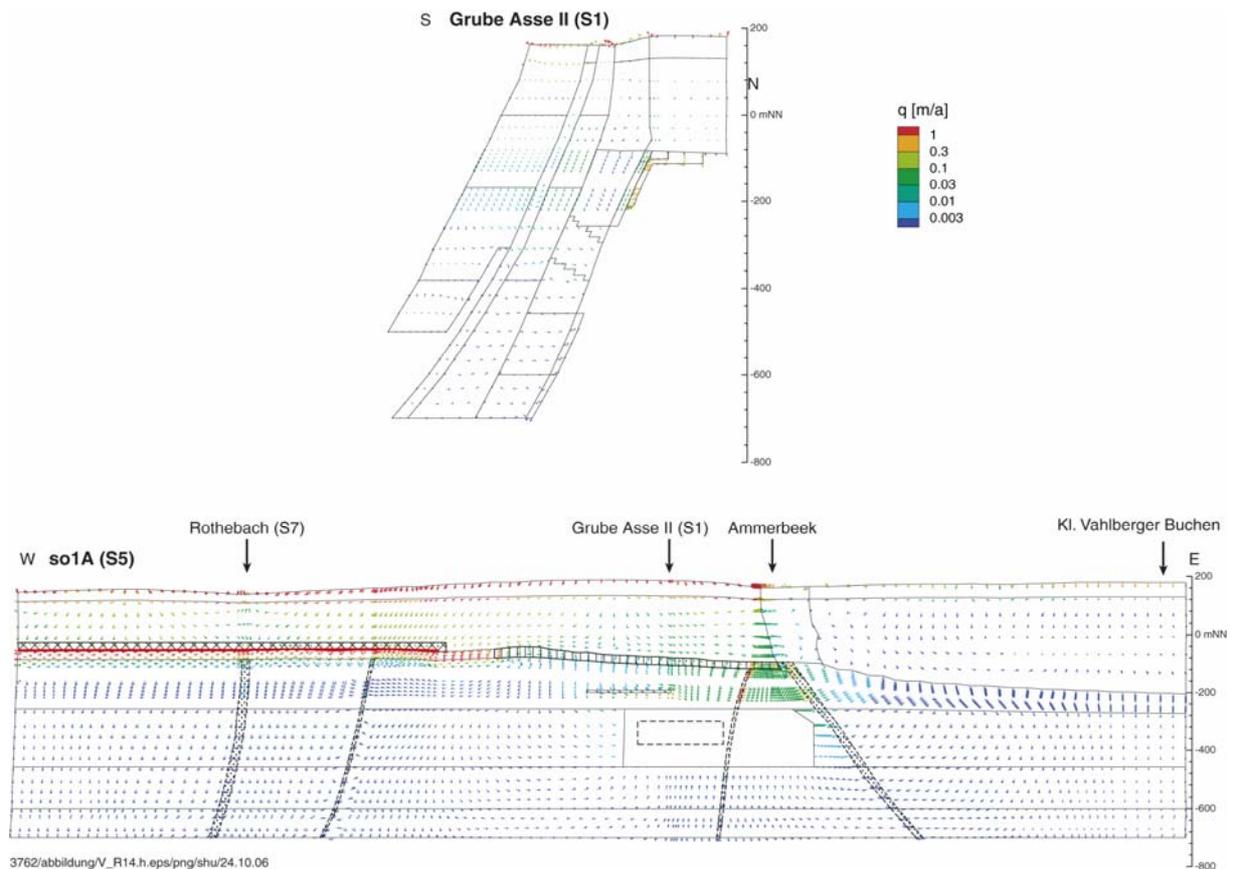
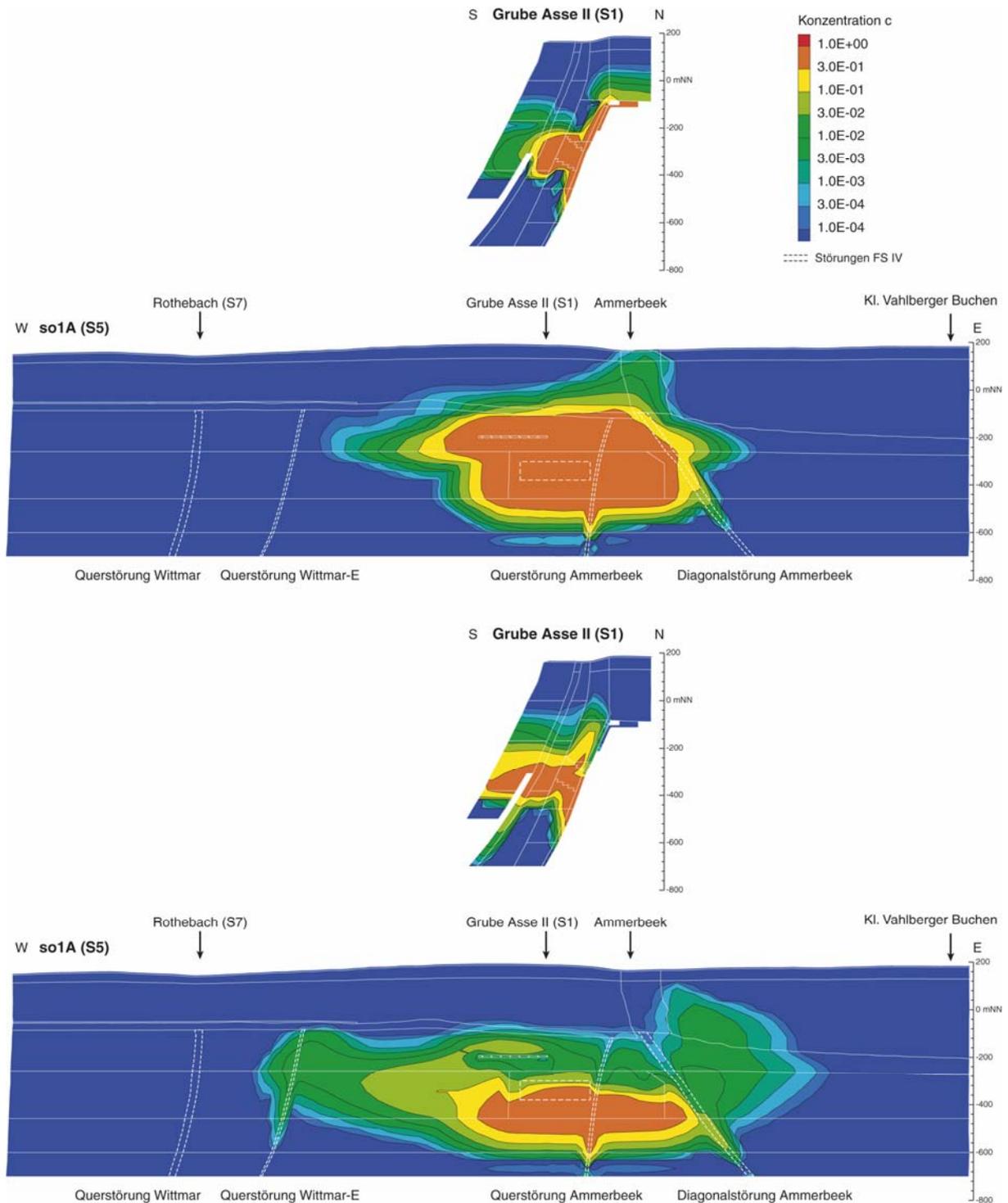


Abb. 6.8-2: Filtergeschwindigkeit der Lösungsbewegung im heutigen Zustand (Rechenfall R14)

Die Ausbreitung der in der Nachbetriebsphase aus der Grube ausgespressten Grubenlösung im Deckgebirge zeigt Abbildung 6.8-3 für die Zeitpunkte 1 100 Jahre und 9 600 Jahre nach Ende der Betriebsphase anhand der gleichen Schnitte S1 und S5. Die Konzentration c bezeichnet in dieser Abbildung den Anteil unverdünnter Grubenlösung in der Deckgebirgslösung (d.h. $c = 1$ entspricht unverdünnter Grubenlösung) und nicht die Konzentration des dichtebestimmenden Lösungsinhaltsstoffes. Die Abbildung zeigt, dass Grubenlösung bereits nach rund 1 000 Jahren in hoher Konzentration in den Muschelkalk gelangt und dort unter Dichteeinwirkung absinkt. Sie zeigt ebenfalls, dass Grubenlösung zu diesem Zeitpunkt bereits mit Anteilen im Prozentbereich im verstützten Deckgebirge vorliegt und im Tal der Ammerbeek oberflächennahe Gebirgsbereiche erreicht hat. Zum Zeitpunkt 9 600 Jahre findet oberhalb der Übertrittsstelle kein Austrag von Grubenlösung in das verstützte Deckgebirge mehr statt. Die Ausbreitung erfolgt in den Muschelkalk und im Streichen entlang des Rötanhydrit so1A.



3762/abbildungen/Ausbr_GL_R14_1100_9600.eps/png/shu/24.10.06

Abb. 6.8-3: Ausbreitung von Grubenlösung in der Nachbetriebsphase zu den Zeitpunkten 1 100 Jahre (oben) und 9 600 Jahre (unten) (Rechenfall R14, $c=1$ entspricht unverdünnter Grubenlösung)

Ein weiteres Ergebnis der hydrogeologischen Modellrechnungen für die Nachbetriebsphase ist der Lösungsdruck an der Übertrittsstelle, der sich in Abhängigkeit von der Auspressrate aufgrund des integralen hydraulischen Widerstands des Deckgebirges gegen das Auspressen von Lösung aus der Grube entwickelt. Da mit fortschreitender Zeit zunehmend

höherviskose Grubenlösung oder Mischlösung entlang der wichtigen Ausbreitungspfade die ursprüngliche Deckgebirgslösung ersetzt, nimmt der integrale hydraulische Widerstand des Deckgebirges mit der Zeit zu. Zu späten Zeiten kann er wieder abfallen, wenn Deckgebirgslösung wieder Grubenlösung in Ausbreitungspfaden verdrängt, wie dies z.B. im Rötanhydrit *so1A* oberhalb der Übertrittsstelle nach 9 600 Jahren bereits erfolgt ist (vgl. Abbildung 6.8-3). Der integrale hydraulische Widerstand des Deckgebirges wirkt auf die Konvergenz der Grubenbaue zurück. Die zeitliche Entwicklung des Lösungsdrucks an der Übertrittsstelle und das Vorgehen, mit dem der integrale hydraulische Widerstand des Deckgebirges für die Modellrechnungen zur Fluidbewegung und zur Schadstoffausbreitung im Grubengebäude parametrisiert wurde, sind in Kapitel 6.7 am Beispiel des Rechenfalls R13 dargestellt.

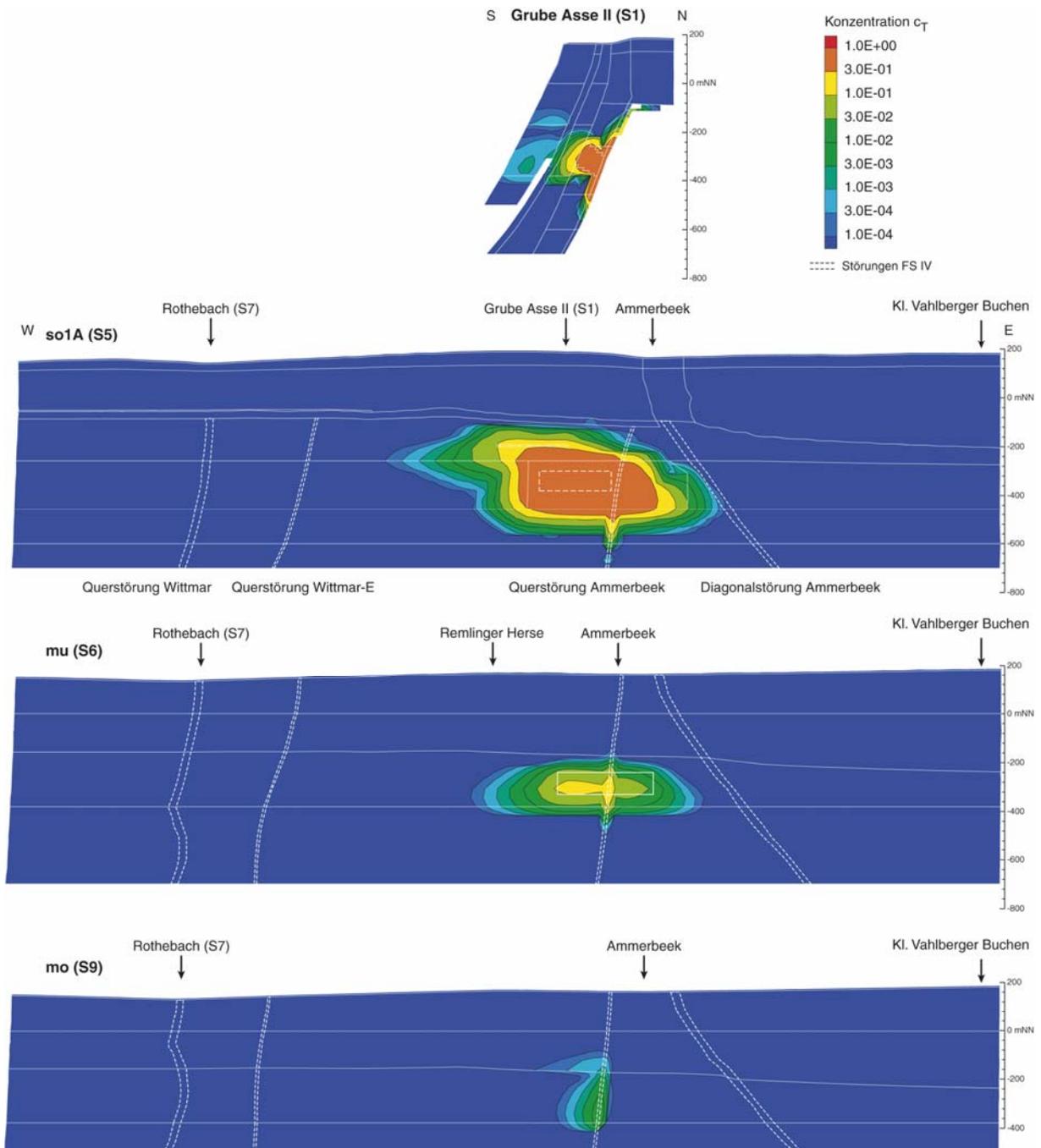
6.8.4 Schadstoffausbreitung im Deckgebirge: Ergebnisse und Bewertung

Die Schadstoffausbreitung im Deckgebirge gemäß Rechenfall R14 ist für die Zeitpunkte 3 000 Jahre und 28 000 Jahre³⁴ in den Abbildungen 6.8-4 und 6.8-5 dargestellt. Die Abbildungen zeigen die räumliche Verteilung der Tracerkonzentration c_T im Deckgebirge als Folge einer konstanten und zeitlich unbegrenzten Tracerkonzentration von $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$ ab 2 000 Jahren im Übertritt aus der Grube in das Deckgebirge. Zusätzlich zu den bereits in Kapitel 6.8.3 verwendeten Schnitten S1 (quer zur Salzstruktur durch die Übertrittsstelle) und S5 (Seitenansicht einer Fläche entlang des Rötanhydrit *so1A*) enthalten die Abbildungen die Seitenansichten S6 und S9 von zwei Flächen, die mittig im Unteren bzw. Oberen Muschelkalk verlaufen.

Die Tracerkonzentration nach 3 000 Jahren, also 1 000 Jahre nach Beginn des Tracerübertritts in das Deckgebirge, und der Vergleich mit der Ausbreitung von Grubenlösung nach rund 1 000 Jahren in Abbildung 6.8-3 zeigen, dass sich die Ausbreitung im Nahbereich der Übertrittsstelle nach 2 000 Jahren aufgrund der bereits stark abgesunkenen Auspressrate deutlich verlangsamt hat. Dies betrifft sowohl den Pfad entlang des Scherdeformationsbereichs S3/D9 in den Muschelkalk als auch – und insbesondere – den Pfad entlang des Rötanhydrit *so1A* in das verstürzte Deckgebirge. Dieser Vergleich illustriert in eindrucklicher Weise die Bedeutung der Transportverzögerung im Grubengebäude. Die räumliche Verteilung der Tracerkonzentration nach 28 000 Jahren in Abbildung 6.8-5 zeigt einerseits das Absinken des Tracers mit der relativ schweren Grubenlösung bzw. den Mischlösungen mit erhöhter Dichte in größere Tiefen, gebremst durch die mit der Tiefe abnehmenden Permeabilitäten von Rötanhydrit *so1A* und Muschelkalk und weniger gebremst in Störungszonen. Andererseits zeigt die Abbildung 6.8-5 auch das Hochschleppen von Tracer in die Taleinschnitte des Rothebachs (Exfiltrationsgebiet m-Witt) und der Ammerbeek (Exfiltrationsgebiet m-Amm) durch die lokalen Fließsysteme im Muschelkalk. Der dritte potenziell wichtige Ausbreitungspfad, jener in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm, ist weder in Abbildung 6.8-4 noch in Abbildung 6.8-5 ersichtlich. Er ist nach 3 000 Jahren noch nicht, nach 28 000 Jahren nicht mehr aktiv. Das gleiche gilt für die Ausbreitungspfade über das verstürzte Deckgebirge und

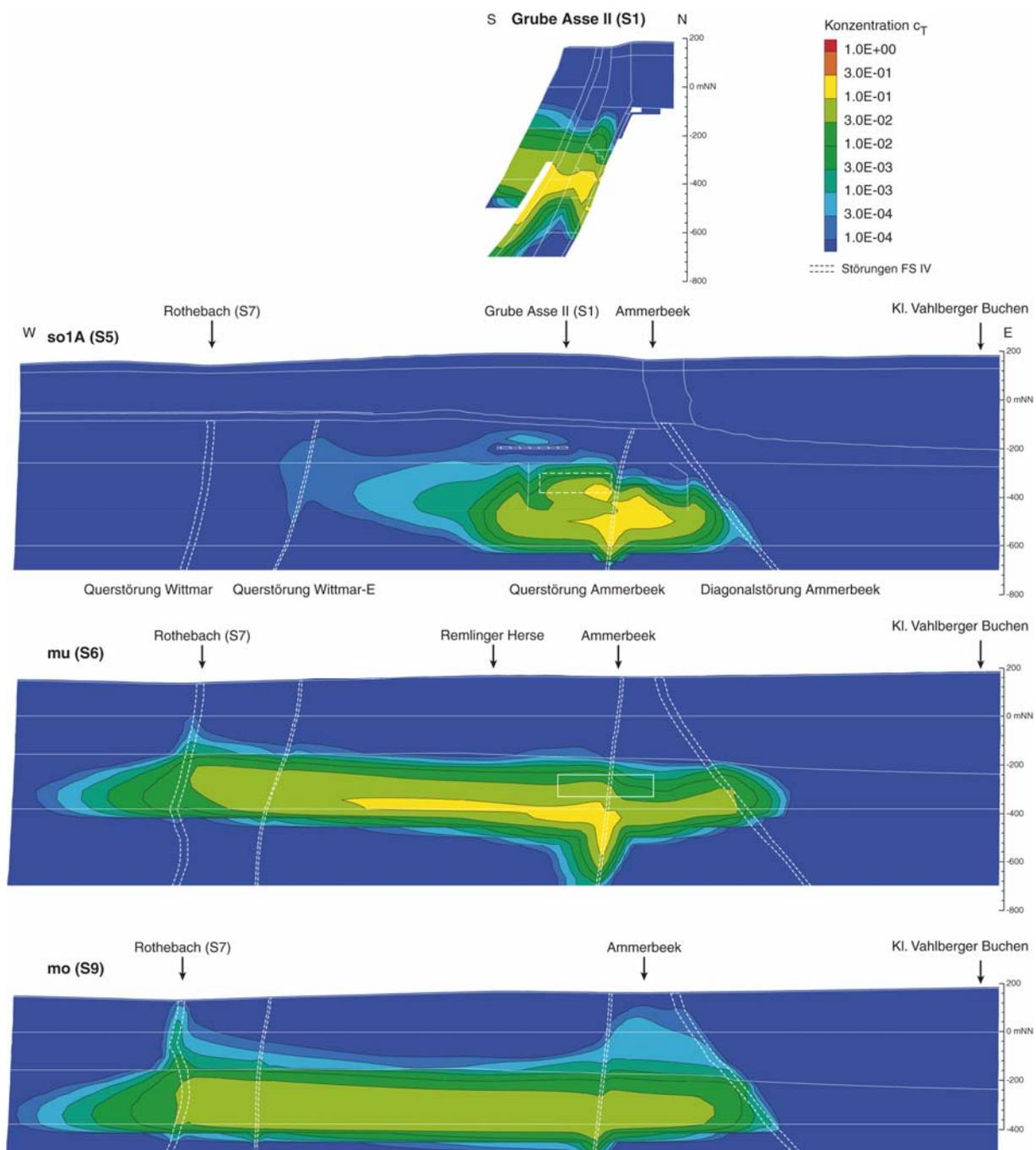
³⁴ Nach 28 000 Jahren erreicht die berechnete oberflächennahe Tracerkonzentration im Exfiltrationsgebiet m-Witt den höchsten Wert.

die durchlässigen Bereiche von dessen Nordrand in die Nordflanke der Salzstruktur. Abbildung 6.8-5 zeigt jedoch, dass über den offenen Modell-Westrand im Muschelkalk Tracer nur in geringer Konzentration nach Westen, in Richtung Groß Denkte, abfließt.



3762/abbildungen/Ausbr_Tr_R14_3000.eps/png/shu/24.10.06

Abb. 6.8-4: Ausbreitung von Tracer in der Nachbetriebsphase zum Zeitpunkt 3 000 Jahre (Rechenfall R14)



3762/abbildungen/Ausbr_Tr_R14_28000.eps/png/shu/24.10.06

Abb. 6.8-5: Ausbreitung von Tracer in der Nachbetriebsphase zum Zeitpunkt 28 000 Jahre (Rechenfall R14)

Der Verdünnungsfaktor im Deckgebirge wurde in Kapitel 6.8.1 definiert: Er ist das zeitlich niedrigste (d.h. ungünstigste) Verhältnis zwischen der konstanten Tracerkonzentration von $c_T = 1 \text{ mol/m}^3$ beim Übertritt in das Deckgebirge und der Tracerkonzentration in einem oberflächennahen Wasser mit einem NaCl-Gehalt von 1 g/l im betrachteten Exfiltrationsgebiet, wenn Tracer ab 2 000 Jahren zeitlich unbegrenzt und mit konstanter Konzentration in das Deckgebirge übertritt. Eine analoge Größe lässt sich auch für die Ausbreitungspfade definieren, die über die seitlichen Ränder aus dem Modellgebiet wegführen (vgl. /COL 2006d/). Sie

entspricht für diese Pfade einer unteren Schranke für den Verdünnungsfaktor bis in ein weiter entferntes Exfiltrationsgebiet. Der Verdünnungsfaktor charakterisiert die Ausbreitung im Deckgebirge ohne Sorption und radioaktiven Zerfall, er ist als Indikator für die potenzielle Bedeutung der verschiedenen Ausbreitungspfade zu werten. Die mit den hydrogeologischen Modellrechnungen ermittelten Werte sind für alle Rechenfälle in Tabelle 6.8-1 zusammengestellt.

Tab. 6.8-1: Verdünnungsfaktoren der verschiedenen Ausbreitungspfade für Schadstoffaustritt in das Deckgebirge ab 2 000 Jahren (Erläuterung im Text)

Exfiltrationsgebiet bzw. Pfad	R14	R13	R12
vD-Amm	> 3 700 000	> 300 000	7 300
m-Amm	22 000	28 000	14 000
m-Witt	4 200	3 700	18 000
verstürztes Deckgebirge – Nordflanke	> 1 000 000	> 700 000	> 3 000
Muschelkalk gegen Groß Denkte	> 15 000	> 15 000	> 50 000

Die Transferfunktionen beschreiben – wiederum ohne Sorption und radioaktiven Zerfall – die Schadstoffausbreitung im Deckgebirge einschließlich ihrer zeitlichen Entwicklung. Sie sind in Kapitel 6.8.1 definiert. Ihre Berechnung für die drei Rechenfälle R14, R13 und R12 enthält /TRA 2006/. Beispielhaft sind in Abbildung 6.8-6 die Transferfunktionen für die Exfiltrationsgebiete vD-Amm und m-Witt dargestellt, welche für die wahrscheinlichen Verhältnisse im Deckgebirge (Rechenfall R14) ermittelt wurden. Die Bezeichnung der Kurven (z.B. $T_{,i} = 200$) bezeichnet dabei den Beginn des Tracerübertritts in das Deckgebirge in Jahren für die betreffende Transferfunktion, im angeführten Beispiel 200 Jahre. Die Bezeichnung der nachfolgenden Kurve (Beispiel: $T_{,i} = 500$) bezeichnet sowohl den Beginn des Tracerübertritts für die betreffende Transferfunktion als auch das Ende des Tracerübertritts für die vorangehende Transferfunktion. Die Transferfunktion mit der Bezeichnung $T_{,i} = 200$ entspricht damit der Tracerkonzentration im oberflächennahen Wasser mit einem NaCl-Gehalt von 1 g/l im bezeichneten Exfiltrationsgebiet, wenn die Tracerkonzentration beim Übertritt in das Deckgebirge zwischen 200 Jahren und 500 Jahren den Wert 1 mol/m³ aufweist und sonst 0 ist³⁵. Die gestrichelte Kurve ist die Summe aller Transferfunktionen. Sie entspricht damit der relativen oberflächennahen Konzentration von Inhaltsstoffen des Schutzfluids bezogen auf deren Konzentration in unverdünnter Grubenlösung. Diese Inhaltsstoffe treten mit Beginn des Austritts von Grubenlösung mit konstanter Konzentration in das Deckgebirge über. Der Kehrwert des Maximums der gestrichelten Kurve wird als „Verdünnungsfaktor von Grubenlösung“ bezeichnet und für die wasserrechtliche Bewertung der Freisetzung von Inhaltsstoffen des Schutzfluids verwendet.

³⁵ Genau genommen ist die Transferfunktion das Verhältnis zwischen der oberflächennahen Tracerkonzentration und der Tracerkonzentration beim Übertritt während der genannten Zeitperiode. Die Transferfunktion ist deshalb dimensionslos.

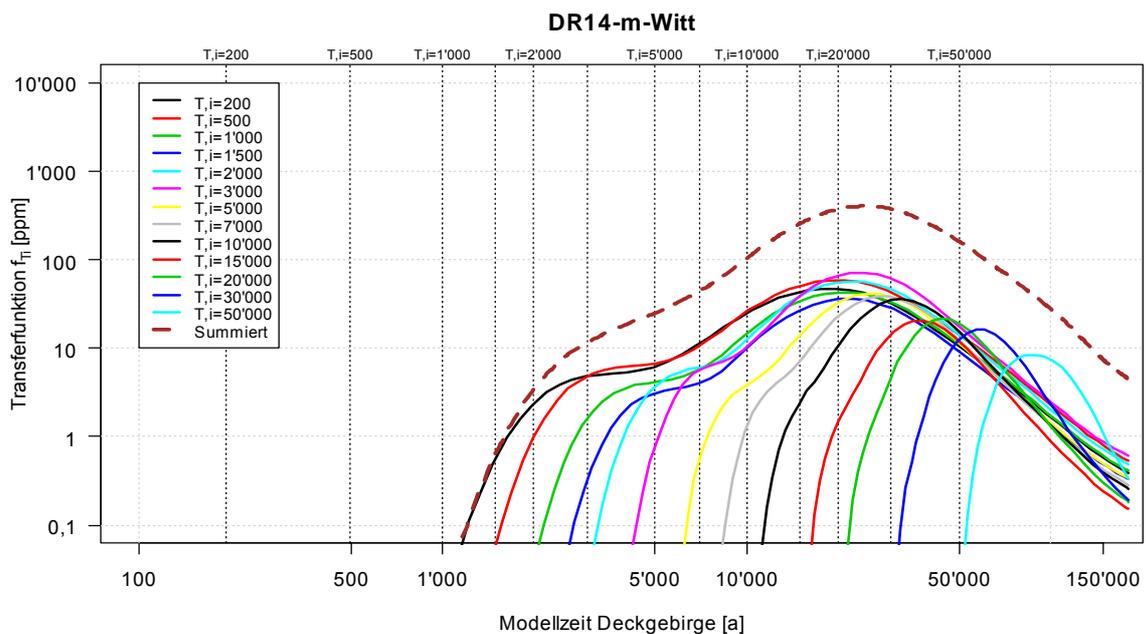
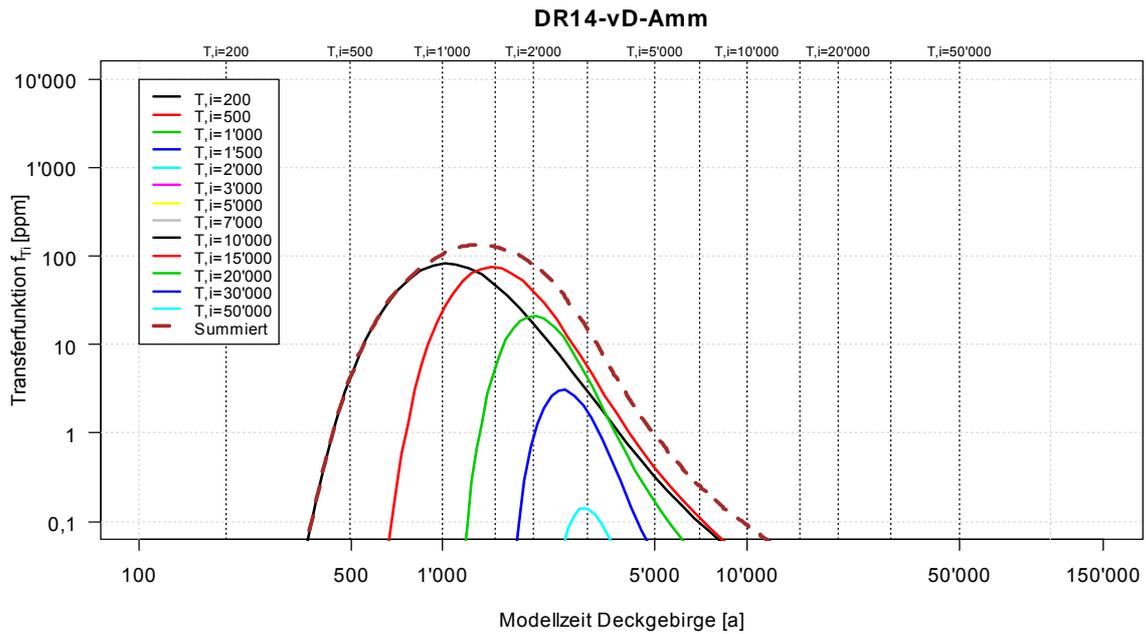


Abb. 6.8-6: Transferfunktionen für die Exfiltrationsgebiete vD-Amm (oben) und m-Witt (unten) (Rechenfall R14)

Abbildung 6.8-6 zeigt, dass im Exfiltrationsgebiet vD-Amm nur Schadstoffübertritte in das Deckgebirge zu einer nennenswerten Exfiltration führen (oberflächennahe Konzentrationen über dem millionsten Teil des Wertes beim Übertritt), die früher als 2 000 Jahre nach Ende der Betriebsphase in das Deckgebirge übertreten. Im Rechenfall R13 führen Schadstoffübertritte bis etwa 3 000 Jahre, im Rechenfall R12 solche bis etwa 7 000 Jahre zu einer nen-

nenswerten Exfiltration im Exfiltrationsgebiet vD-Amm /TRA 2006/. Dies zeigt ein weiteres Mal die Bedeutung der Transportverzögerung im Grubengebäude.

Die Transferfunktionen für das Exfiltrationsgebiet m-Witt weisen einen markant anderen Verlauf auf als jene für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm (vgl. Abbildung 6.8-6): Alle Transferfunktionen bis (einschließlich) jene für die Zeitperiode des Tracerübertritts in das Deckgebirge von 7 000 Jahren bis 10 000 Jahren ($T_i = 7000$) erreichen etwa zur gleichen Zeit ihren höchsten Wert, und die höchsten Werte sind ungefähr proportional zur Menge Grubenlösung – somit zur Tracermenge – die während der entsprechenden Zeitperiode in das Deckgebirge übertritt. Dies bedeutet, dass die maximale oberflächennahe Konzentration langlebiger Radionuklide nach rund 28 000 Jahren im Exfiltrationsgebiet m-Witt hauptsächlich von der Gesamtmenge dieser Radionuklide abhängt, die bis etwa 10 000 Jahre kumuliert aus dem Grubengebäude austritt. Der zeitliche Verlauf des Austritts aus dem Grubengebäude ist für die Exfiltration im Gebiet m-Witt von untergeordneter Bedeutung, damit auch die Transportverzögerung im Grubengebäude (so lange sie geringer als rund 10 000 Jahre ist). Die Transferfunktionen zeigen aber auch, dass Radionuklide mit relativ kurzer Halbwertszeit (bis einige 100 Jahre, d.h. einschließlich ^{241}Am) selbst bei sehr geringer Transportverzögerung im Grubengebäude und ohne Sorption im Deckgebirge im Exfiltrationsgebiet m-Witt höchstens in sehr geringen Konzentrationen freigesetzt werden.

6.9 Biosphärenmodell

Die Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen der potenziellen Radionuklidfreisetzungen aus der Schachanlage Asse auf die Bevölkerung bildet ein Biosphärenmodell. Da eine Prognose der Entwicklung der Biosphäre sowie der Lebens- und Verzehrsgewohnheiten der Menschen über große Zeiträume nicht möglich ist, wird in Langzeitsicherheitsnachweisen zur Illustration der potenziellen Gefährdung ein Modell für die Referenzentwicklung in der Biosphäre, die so genannte Referenzbiosphäre, herangezogen. Dieses Biosphärenmodell berücksichtigt die potenziellen Expositionspfade am Standort Asse für die

- Ausbreitung über den Lösungspfad durch das Grund- oder Oberflächenwasser und die Wassernutzung,
- Ausbreitung volatiler Radionuklide (Gaspfad) ab dem Übertritt in das Grund- oder Oberflächenwasser oder in die bodennahe Luft.

6.9.1 Datenbasis

Die Standortdaten zur Charakterisierung der Biosphäre stammen aus offiziellen Publikationen von Kommunal- und Landesbehörden und können daher als abgesichert gelten. Das konzeptuelle Modell für das Biosphärenmodell am Standort Asse bzw. die potenziellen Expositionspfade auf dem Lösungs- und Gaspfad orientiert sich an den Vorgaben der Anlage VII zu § 47 StrlSchV (2001), die in der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) in /BMU 1990/ und dem Entwurf für die Neufassung der AVV /BfS 2005/ konkretisiert werden. Modelle und Parameter, insbesondere die für die landwirtschaftliche Nutzung und die Beregnung

wurden den Gegebenheiten am Standort Asse angepasst. Auch für die Verzehrsgewohnheiten der Bevölkerung wurden realitätsnahe Annahmen gemäß der nationalen Verzehrstudie /FDG 1991/ zugrunde gelegt. Darüber hinaus wurden einige in der AVV verwendete Modelle und Parameter entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft ergänzt, z. B. bei der Inhalation kontaminierter Bodenpartikel. Aus den Modellansätzen der AVV, den Anpassungen an die Standortgegebenheiten und den Ergänzungen wurde ein realitätsnahes, standortspezifisches Modell für die Referenzbiosphäre entwickelt /GSF 2006i/. Die in der StrlSchV und der AVV genannten potenziellen Expositionspfade sind aufgrund der standortspezifischen Verhältnisse nicht alle für den Standort Asse relevant. Abweichungen ergeben sich speziell im Hinblick auf die Berechnung von landwirtschaftlichen Nutzflächen zur Produktion von pflanzlichen und tierischen Nahrungsmitteln (vgl. Kapitel 2.7).

Das Klima am Standort Asse ist für die Expositionspfade, die durch landwirtschaftliche Nutzung bedingt sind, aber auch für eine Ausbreitung von Radionukliden über den Gaspfad von Bedeutung. Die Klimadaten für den Standort Asse wurden Berichten des Deutschen Wetterdienstes und dem Klimaatlas der Bundesrepublik Deutschland entnommen und können daher als gesichert gelten.

Für das ggf. kontaminierte Grundwasser oder Oberflächenwasser wurde eine biosphärenverträgliche Salzkonzentration von 1 g NaCl pro Liter als Obergrenze angenommen. Diese Konzentration ist etwa doppelt so hoch wie der entsprechende Grenzwert der Trinkwasserverordnung /TWVO 2001/. Die angenommene NaCl-Konzentration entspricht einer WHO-Empfehlung für als Trinkwasser nutzbare Wässer in Entwicklungsländern. Durch eine solche hohe NaCl-Konzentration ergeben sich nachhaltige Verschlechterungen der Bodenstruktur und dadurch auch der Bodenfruchtbarkeit für die landwirtschaftliche Nutzung sowie Einschränkungen für die Verwendung als Trinkwasser /GSF 2006i/. Trotz dieser Nutzungseinschränkungen wird für die Berechnung der potenziellen Strahlenexposition ein konstanter Salzgehalt von 1 g/l im genutzten Wasser unterstellt.

6.9.2 Modellierung

Grundlage für die Modellierung der Auswirkungen einer potenziellen Radionuklidfreisetzung während der Nachbetriebsphase der Schachanlage Asse II auf den Menschen waren die Modellansätze gemäß § 47 StrlSchV (2002) und AVV /BfS 2005/, die den gegenwärtigen standortspezifischen Verhältnissen und dem Stand der Wissenschaft angepasst worden sind.

Die wichtigen Prozesse in der Biosphäre für die Berechnungen der Strahlenexposition auf dem Lösungspfad sowie für die Referenzbiosphäre des Gaspfades (Biosphärenszenario „Landwirtschaftliche Nutzfläche“, vgl. Kap. 7.6) sind in /GSF 2006i/ dargestellt. Die relevanten Prozesse für die übrigen Biosphärenszenarien des Gaspfades sind in /COL 2006i/ umfassend erläutert.

Lösungspfad

Die Bewertung der in der StrlSchV und AVV genannten potenziellen Expositionspfade im Hinblick auf ihre Relevanz für die Referenzbiosphäre hat ergeben, dass am Standort Asse nicht alle Expositionspfade von Bedeutung sind (vgl. Kapitel 2.7):

Eine potenzielle Exposition der Menschen durch Radionuklide kann sich aus der Aufnahme von Trinkwasser sowie von pflanzlichen und tierischen Nahrungsmitteln ergeben. Eine solche Exposition über die Nahrungsmittel kann u. a. durch Beregnung von Nutzpflanzen mit kontaminierten Wässern erfolgen. Am Standort beschränkt sich die Beregnung auf private Gärten. Die Beregnungsmengen wurden aus den Bodenbedingungen und dem Wasserhaushalt abgeleitet /GSF 2006i/. Die Acker- und Weideflächen werden hier nicht berechnet, so dass der Expositionspfad über Nutzpflanzen zum Menschen nur zum Teil und der über Futterpflanzen und Nutztiere nicht relevant ist. Bei den Nutztieren erfolgt die Aufnahme von Radionukliden nur über das Tränkwasser (Abbildung 6.9-1).

Im Fall des Radionuklideintrags in die Oberflächengewässer, wie z. B. Teiche oder Bäche (vgl. Kapitel 2.7), kann durch den Verzehr von Fisch aus diesen Gewässern und durch den Aufenthalt auf den Ufersedimenten eine zusätzliche Strahlenexposition auftreten. Dass die Schadstoffkonzentrationen in den Oberflächengewässern durch Zuflüsse aus anderen nicht kontaminierten Bächen und durch Niederschläge verdünnt werden, ist im Modell nicht berücksichtigt worden.

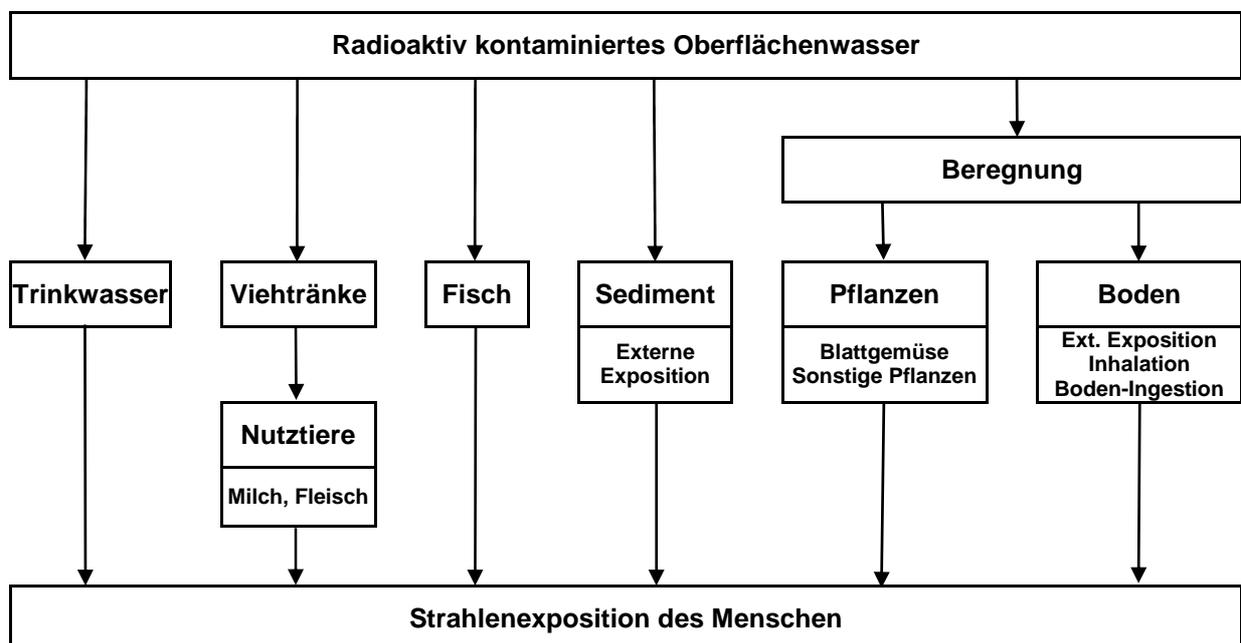


Abb. 6.9-1: Expositionspfade bei der Nutzung von kontaminiertem Oberflächenwasser am Standort Asse /GSF 2006i/

Zusätzlich zu den Expositionspfaden aus der AVV wurden zwei weitere Expositionspfade betrachtet, um eine möglichst umfassende Berechnung der potenziellen Strahlenexposition zu ermöglichen. Dies sind

- die externe Exposition durch den Aufenthalt auf Flächen, die mit kontaminiertem Wasser beregnet wurden, und
- die Inhalation von kontaminierten Bodenpartikeln.

Eine hohe Konservativität im Modellansatz und in den Parametern des Biosphärenmodells würde sich durch die in § 47 StrlSchV angegebenen mittleren Verzehrsgewohnheiten in Kombination mit den Sicherheitsfaktoren ergeben. In einer nationalen Verzehrstudie wurden mittlere Aufnahmeraten für verschiedene Lebensmittel abgeleitet, die bereits eine große Bandbreite unterschiedlicher Ernährungsgewohnheiten abdecken /FDG 1991/. Die in dieser Studie ermittelten Werte liegen um 10 % bis 45 % unter den Werten in der StrlSchV (2002). Um evtl. eintretende Expositionen nicht deutlich zu überschätzen, wurde in der Referenzbiosphäre – mit Ausnahme des Trinkwassers – auf die Anwendung der Sicherheitsfaktoren gemäß § 47 StrlSchV verzichtet /GSF 2006i/.

Die Transportzeiten von Radionukliden in der Nahrungskette bis zum Menschen werden nicht berücksichtigt.

Um den Einfluss möglicher Veränderungen der Lebensgewohnheiten des Menschen und der Standortbedingungen auf die potenzielle Strahlenexposition der Bevölkerung einschätzen zu können, wurden Sensitivitätsbetrachtungen durchgeführt. Hierfür wurden einerseits die Auswirkungen eines deutlich höheren Verzehrs von Nahrungsmitteln untersucht, der sich aus der Berücksichtigung der Sicherheitsfaktoren gemäß § 47 StrlSchV ergäbe. Andererseits wurden die möglichen Konsequenzen einer Beregnung der Acker- und Weideflächen sowie höherer oder niedrigerer Beregnungsmengen analysiert /GSF 2006i/.

Die potenzielle Strahlenexposition wird für eine erwachsene Referenzperson aus einer Bevölkerungsgruppe, die am Standort Asse lebt, berechnet (vgl. Kapitel 3.1).

Gaspfad

Bei der Degradation der Abfälle durch Metallkorrosion und mikrobielle Prozesse entstehen erhebliche Gasmengen. Von den volatilen Radionukliden ist aufgrund der Mengen und des radioaktiven Zerfalls während des Transports bis in die Biosphäre nur ^{14}C bedeutsam, die anderen volatilen Radionuklide sind vernachlässigbar /COL 2006f/. Radiokohlenstoff kann als $^{14}\text{CH}_4$ und $^{14}\text{CO}_2$ vorliegen. Kohlendioxid wird in den Einlagerungskammern quasi vollständig als Karbonatverbindung ausgefällt (vgl. Kapitel 6.1). Die Ausbreitung von ^{14}C auf dem Gaspfad erfolgt daher nur als Methan bis in die Biosphäre. Es wird angenommen, dass dieses Methan ($^{14}\text{CH}_4$) in den ungesättigten Bodenschichten vollständig mikrobiell zu Kohlendioxid ($^{14}\text{CO}_2$) oxidiert wird.

In der Referenzbiosphäre für den Gaspfad wird angenommen, dass volatile Radionuklide flächenhaft aus den Bodenschichten über eine landwirtschaftliche Nutzfläche in die Atmo-

sphäre gelangen. Das ^{14}C kann somit durch Photosynthese über Nutzpflanzen, einschließlich Weidegras, in die Nahrungskette bis zum Menschen gelangen. Die Ingestion über Pflanzen, Fleisch und Milchprodukte sind die dominierenden Beiträge der potenziellen Strahlenexposition durch ^{14}C gegenüber der Inhalation durch das Einatmen kontaminierter Luft. Die Verweilzeit von inhaliertem $^{14}\text{CO}_2$ im Körper ist um Größenordnungen geringer als die Verweilzeit von dem mit der Nahrung aufgenommenen, organisch gebundenen Radiokohlenstoff. Die Inhalation spielt deshalb in der Referenzbiosphäre keine Rolle /GSF 2006i/.

Um den Einfluss der Inhalation für ungünstige Randbedingungen einschätzen zu können, wurde ein alternatives Biosphärenszenario für den punktförmigen Eintritt von Radiokohlenstoff aus den Bodenschichten in ein Wohnhaus untersucht /COL 2006f/.

Ein dritter Expositionspfad kann sich ergeben, wenn sich gasförmig aufsteigendes $^{14}\text{CH}_4$ teilweise im oberflächennahen Grundwasser löst. In diesem Biosphärenszenario wird zwar Radiokohlenstoff von Pflanzen nur aus der Luft aufgenommen und auch die Ingestion von gelöstem $^{14}\text{CH}_4$ oder $^{14}\text{CO}_2$ – direkt über das Trinkwasser und/oder indirekt über das Tränkwasser für Vieh – führt aufgrund der kurzen Verweildauer im menschlichen bzw. tierischen Organismus nicht zu nennenswerten Dosisbeiträgen. Falls mit solchem Wasser aber ein Teich zur Fischzucht gespeist wird, ist der Expositionspfad durch den Verzehr dieses Fisches zu berücksichtigen, da der Transferfaktor Wasser – Fisch für $^{14}\text{CO}_2$ ausgesprochen hoch ist /BfS 2005/.

6.9.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

Die Modellrechnungen zur Ausbreitung von Radionukliden in der Biosphäre und die Ableitung eines standortspezifischen Biosphärenmodells dienen der Ermittlung von spezifischen Faktoren für den Übertritt von Radionukliden in die Biosphäre zur Berechnung potenzieller Strahlenexpositionen des Menschen.

Die berechneten Strahlenexpositionen wurden für jedes Radionuklid auf eine Konzentration von 1 Bq/l im oberflächennahen Grundwasser bzw. Oberflächenwasser normiert. Die Werte werden als standortspezifische Dosiskonversionsfaktoren bezeichnet /GSF 2006i/. Durch Multiplikation der Dosiskonversionsfaktoren mit den ermittelten Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser sowie durch anschließende Summation über alle Radionuklide werden die Strahlenexpositionen berechnet (vgl. Kapitel 7.5 und 7.6).

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass Ingestion für die meisten Radionuklide der wichtigste Expositionspfad ist. Insbesondere die Aufnahme von Trinkwasser und – in geringerem Ausmaß – der Verzehr von pflanzlichen Nahrungsmitteln liefern in der Regel die entscheidenden Beiträge zu den normierten Expositionen bzw. Dosiskonversionsfaktoren. Die Inhalation von resuspendierten Bodenteilchen sowie die externe Exposition spielen für die die Exposition bestimmenden Radionuklide nur eine untergeordnete Rolle. Im Fall der Nutzung von kontaminiertem Oberflächenwasser ist der Verzehr von Süßwasserfisch von Bedeutung /GSF 2006i/.

Die potenziellen Strahlenexpositionen werden zu mehr als 95 % durch die Radionuklide ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am und ^{14}C bestimmt, wobei die Relevanz der einzelnen Radionuklide von der Transportzeit im Deckgebirge abhängt. Die Radionuklide des Plutoniums sind auf allen Transportpfaden von großer Bedeutung, Americium ist nur bei einem raschen Transport durch das Deckgebirge relevant /GSF 2006i/.

Die Abschätzung der Exposition durch ^{14}C über den kombinierten Wasser-/Gaspfad zeigt eine Dominanz des Beitrags von $^{14}\text{CO}_2$, das – nach dem Übergang in die bodennahe Luft – in Nutzpflanzen assimiliert wird. Dementsprechend wird in der Referenzbiosphäre für den Gaspfad eine landwirtschaftliche Nutzfläche unterstellt, auf der das Gas flächenhaft austritt und von den Kulturpflanzen aufgenommen wird /GSF 2006i/. Die Pflanzen werden entweder direkt verzehrt oder an Tiere verfüttert und dann über Fleisch und Milch vom Menschen aufgenommen. Das alternative Biosphärenszenario „Fischteich“ unterstellt, dass ^{14}C mit dem Grundwasserstrom in einen Fischteich gelangt und eine potenzielle Strahlenexposition durch den Verzehr von Süßwasserfisch bewirkt. Für ein weiteres alternatives Biosphärenszenario wird angenommen, dass eine kanalisierte gasförmige Freisetzung von ^{14}C in den Keller eines Wohnhauses erfolgt. Allen betrachteten Szenarien liegen konservative Modellannahmen zugrunde, so dass die Ableitung der Dosiskonversionsfaktoren zur sicheren Seite hin erfolgte /COL 2006f/.

Neben der Aufnahme von Trinkwasser stellt die Beregnung landwirtschaftlicher Flächen einen wesentlichen Expositionspfad für den Wasserpfad dar, jedoch nicht am Standort Asse. Im Rahmen von Sensitivitätsbetrachtungen wurde festgestellt, dass sich bei nicht standort-spezifischen Annahmen bzgl. höherer oder geringerer Beregnung der landwirtschaftlichen Flächen deutlich abweichende Dosiskonversionsfaktoren für die Radionuklide ^{14}C , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{231}Pa , ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am und ^{243}Am ergeben würden, die im Vergleich zur Referenzbiosphäre zu einer Erhöhung der potenziellen Strahlenexpositionen um den Faktor 1,8 bzw. zu einer Verringerung um den Faktor 0,75 führen /GSF 2006i/. Gleichwohl werden auch mit den Dosiskonversionsfaktoren für die Referenzbiosphäre die evtl. eintretenden Strahlenexpositionen zur sicheren Seite hin berechnet. Das Biosphärenmodell basiert auf den konservativen Annahmen, dass

- am Standort Asse eine sich selbst versorgende Gemeinschaft lebt, die sich ausschließlich von den lokal erzeugten Produkten ernährt,
- die Gemeinschaft Gartenbau, Ackerbau und Viehzucht betreibt sowie nur lokal gewonnene Grund- und Oberflächenwasser als Trink-, Tränk- und Beregnungswässer nutzt,
- die landwirtschaftlichen Nutzflächen auch bei einer hohen NaCl-Konzentration von 1 g pro Liter intensiv und nachhaltig³⁶ genutzt werden.

Für den Lösungspfad wurden Dosiskonversionsfaktoren für die Expositionspfade über das Grundwasser (ohne Fisch) und über das Oberflächenwasser (mit Fisch) ermittelt. Bei Berücksichtigung des „Verzehrs von Süßwasserfisch“ ergibt sich eine höhere potenzielle Strahlenexposition, weshalb auch die Dosiskonversionsfaktoren für diesen Expositionspfad bei

³⁶ Für eine nachhaltige Nutzung der Böden in der Landwirtschaft ist eine solche Salzkonzentration wahrscheinlich zu hoch /GSF 2006i/.

den Modellrechnungen zur Ausbreitung von Radionukliden auf dem Lösungs- und Gaspfad zugrunde gelegt wurden (Tabelle 6.9-1) /GSF 2006i/.

Tab. 6.9-1: Dosiskonversionsfaktoren für die Exposition bei Nutzung von kontaminiertem Oberflächenwasser am Standort Asse /GSF 2006i/

Radionuklid	(mSv/a) / (Bq/m ³)	Radionuklid	(mSv/a) / (Bq/m ³)
C-14	$7,7 \cdot 10^{-6}$	Pa-231	$8,7 \cdot 10^{-4}$
Ni-63	$1,9 \cdot 10^{-7}$	U-233	$5,3 \cdot 10^{-5}$
Se-79	$3,1 \cdot 10^{-5}$	U-234	$5,0 \cdot 10^{-5}$
Sr-90	$4,2 \cdot 10^{-5}$	U-235	$6,6 \cdot 10^{-5}$
Tc-99	$1,2 \cdot 10^{-6}$	U-236	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Sn-126	$2,5 \cdot 10^{-4}$	U-238	$4,9 \cdot 10^{-5}$
I-129	$1,3 \cdot 10^{-4}$	Np-237	$1,7 \cdot 10^{-4}$
Cs-135	$8,1 \cdot 10^{-6}$	Pu-238	$2,2 \cdot 10^{-4}$
Cs-137	$5,0 \cdot 10^{-5}$	Pu-239	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Pb-210	$7,9 \cdot 10^{-4}$	Pu-240	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Ra-226	$7,1 \cdot 10^{-4}$	Pu-242	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Ra-228	$6,9 \cdot 10^{-4}$	Am-241	$2,0 \cdot 10^{-4}$
Th-230	$2,7 \cdot 10^{-4}$	Am-242m	$1,9 \cdot 10^{-4}$
Th-232	$5,3 \cdot 10^{-4}$	Am-243	$2,2 \cdot 10^{-4}$

Für den Gaspfad sind die berechneten Strahlenexpositionen für einen punktförmigen Austritt von ¹⁴C in der Gasphase aus dem Erdreich in ein Wohnhaus um fast eine Größenordnung höher als für eine flächenhafte Freisetzung in die Luftschicht über einer landwirtschaftlich genutzten Fläche /COL 2006f/. Die Wahrscheinlichkeit der Exposition gemäß Biosphärenszenario „Wohnhaus“ ist allerdings gering. Während bei diesen Expositionspfaden die berechnete Dosis proportional zur ¹⁴C-Freisetzungsrate ist, hängt sie beim dritten Expositionspfad für das Biosphärenszenario „Fischteich“ nur von der ¹⁴C-Konzentration im Gas ab /COL 2006f/. Ein Vergleich der Berechnungsergebnisse für diese Pfade ist daher nicht über die Dosiskonversionsfaktoren allein möglich, sondern nur unter Berücksichtigung der Gasvolumina und der Freisetzungsraten. Dabei stellt sich für die Verhältnisse am Standort Asse heraus, dass der Expositionspfad für das Biosphärenszenario „Fischteich“ zu den höchsten berechneten Strahlenexpositionen führt (siehe Kapitel 7.6). In diesem Szenario ist die Verdünnung des kontaminierten Wassers, z.B. durch Niederschlagswasser, die zu geringeren ¹⁴C-Konzentrationen führt, allerdings nicht berücksichtigt.

7 Konsequenzenanalyse

Für den Nachweis der Langzeitsicherheit nach der Schließung der Schachanlage Asse II werden die Konsequenzen analysiert, die sich aus der prognostizierten langzeitigen Entwicklung des Standortes Asse unter Berücksichtigung der relevanten Szenarien (vgl. Kapitel 5.2) ergeben. Diese zu erwartenden bzw. nicht auszuschließenden Konsequenzen werden mit Hilfe von Modellrechnungen auf Grundlage der Standortbedingungen und Standortdaten (vgl. Kapitel 2) sowie der vorgesehenen Schließungsmaßnahmen gemäß den veranschlagten Anforderungen (vgl. Kapitel 4.2) berücksichtigt.

Mit der Konsequenzenanalyse wird gezeigt, dass die vorgesehenen Schließungsmaßnahmen in der Schachanlage Asse II geeignet sind, die Einhaltung der gesetzlichen Schutzziele (Kapitel 3.1) mit einer ausreichenden Sicherheit im prognosefähigen Zeitraum zu gewährleisten. Des Weiteren belegt die Konsequenzenanalyse, dass die konzeptionellen Modellansätze zur vereinfachten Abbildung des Systemverhaltens und die abgeleiteten standortspezifischen Daten für relevante Ereignisse und Prozesse zu einem zuverlässigen und robusten Sicherheitsnachweis führen. Schließlich ermöglicht die Konsequenzenanalyse eine Aussage über die Notwendigkeit der Schließungsmaßnahmen. Die Bewertung erfolgt in Kapitel 8.

Neben rein standortspezifischen Eingangsgrößen, wie Abfalldaten oder geologischen Strukturdaten, werden zusätzlich Größen aus Modellrechnungen, Laboruntersuchungen und Experteneinschätzungen ermittelt, beispielsweise zum geochemischen Milieu in den Einlagerungskammern oder zu den langfristig zu erwartenden Konvergenzraten in der Grube. Mit Modellrechnungen für Teilsysteme sind solche gemeint, die sich nicht – wie die integrierten Analysen der Konsequenzen – auf das Gesamtsystem beziehen, sondern spezielle Sachverhalte, Ereignisse und Prozesse gezielt und meist in detaillierterem Maße untersuchen. Abbildung 7.0-1 zeigt die wichtigsten Wechselwirkungen der Modellrechnungen und Eingangsdaten. Die in die Konsequenzenanalyse einfließenden Modellrechnungen zu Einzelprozessen und Teilsystemen wurden in Kapitel 6 ausführlich dargestellt und bewertet.

Im Folgenden werden zunächst das allgemeine methodische Vorgehen bei der Konsequenzenanalyse für den Standort Asse, danach die speziellen Vorgehensweisen und Ergebnisse der folgenden Modellrechnungen dargestellt:

- gebirgsmechanische Langzeitprognose,
- bergschadenkundliche Senkungsvorberechnung,
- potenzielle Freisetzung grundwassergefährdender Stoffe in die Biosphäre,
- potenzielle Strahlenexpositionen in der Biosphäre über den Lösungspfad,
- potenzielle Strahlenexpositionen in der Biosphäre über den Gaspfad sowie
- Kritikalitätssicherheit.

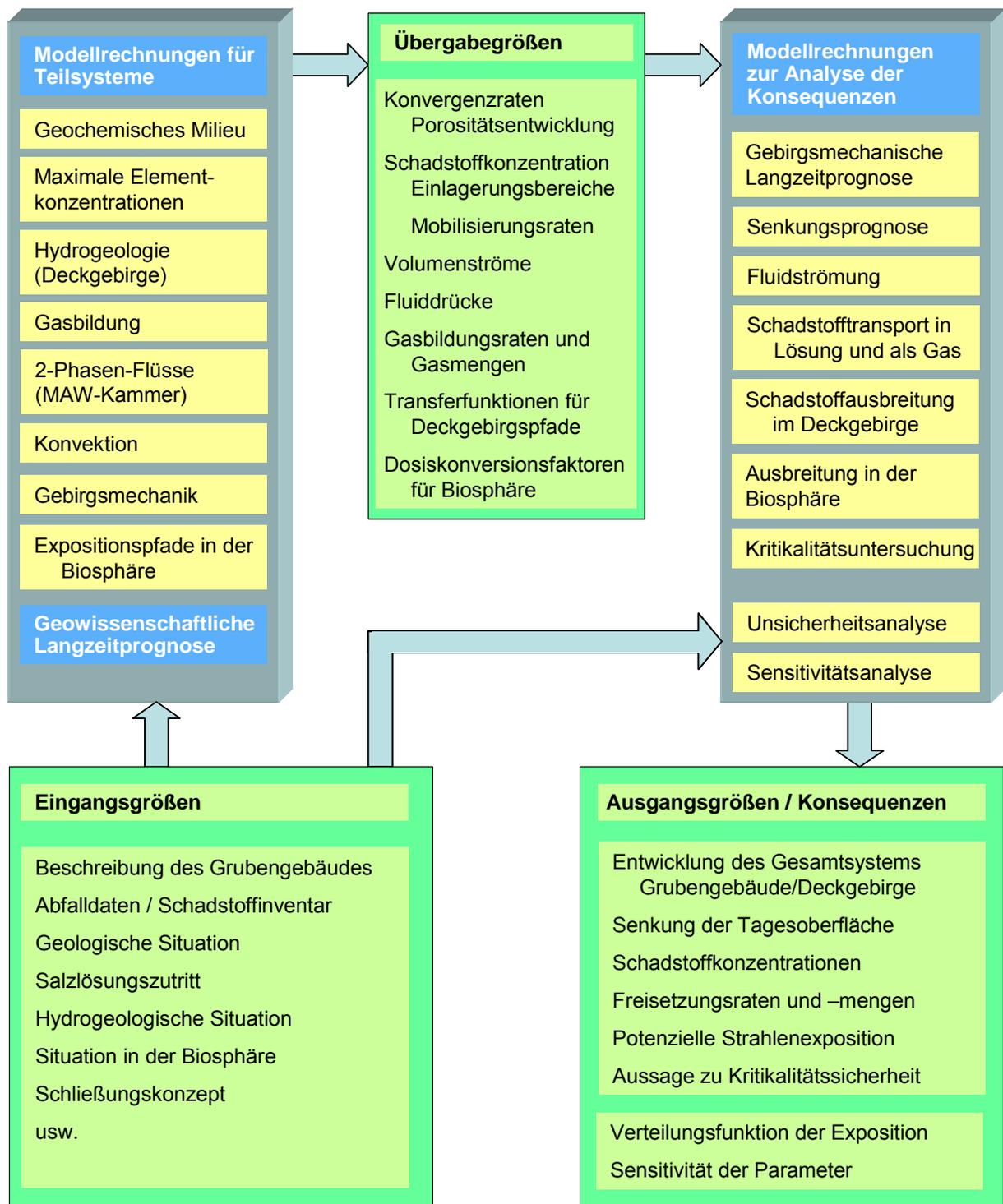


Abb. 7.0-1: Flussdiagramm für die Modellrechnungen in der Konsequenzenanalyse

7.1 Methodisches Vorgehen

Die Konsequenzenanalyse basiert auf standortbezogenen und allgemeinen Erkenntnissen und Daten, auf speziellen Modellrechnungen für Einzelprozesse und Teilsysteme sowie integrierten Systemanalysen. Die zu Grunde gelegten Daten wurden von der GSF und den Sachverständigen seit langer Zeit ermittelt und kontinuierlich aktualisiert. Sie betreffen unter Anderem:

- Die Geometrie des Grubengebäudes: Volumina, Porositäten, Permeabilitäten der Grubenbaue, Konvergenzraten.
- Geologische und hydrogeologische Daten zum Deckgebirge (Geometrie, Pegelstände, Porositäten, Dichten, Transmissivitäten).
- Das Abfallinventar (Radionuklide, chemotoxische und sonstige sicherheitsrelevante Stoffe).
- Die Mengen Gas bildender Stoffe in der Grube.
- Die Mengen von Mg-Depot.
- Die Zusammensetzung der Lösungen in der Grube und im Deckgebirge.
- Strömungsbarrieren: geometrische Anordnungen und physikalische Eigenschaften.
- Schweben und Auflockerungszonen: Permeabilitäten, Porositäten
- Das Schließungskonzept: zeitliche Abfolge der Schließung, Flutungszeitpunkte für das Schutzfluid, Druckentwicklung in der Betriebsphase.

Darüber hinaus wurden die für die Modellrechnungen benötigten zusätzlichen Eingangsdaten von den jeweiligen Sachverständigen in Absprache mit GSF ermittelt und in den jeweiligen Berichten zu den Modellrechnungen dokumentiert. Diese Daten betreffen beispielsweise

- Physikalische und chemische Konstanten,
- Modellparameter, die mit überschlägigen Rechnungen und durch Auswertung von weiteren Rechenergebnissen oder Experimenten ermittelt wurden,
- Thermodynamische Daten,
- Zweiphasenfluss-Parameter,
- Fließraten im Deckgebirge,
- Biosphäre: Verzehrgeohnheiten und Dosisfaktoren.

Die Modellrechnungen stützen sich jeweils auf einen bestimmten, zu einem bestimmten Zeitpunkt festgehaltenen Stand von Eingangsparametern ab und wurden iterativ im Verlauf der Nachweisführung entsprechend dem Kenntnisstand über den Standort, insbesondere der Grubenspezifik der Schachanlage Asse II, und über das chemische Verhalten von Actiniden in standortspezifischen Salzlösungen aktualisiert.

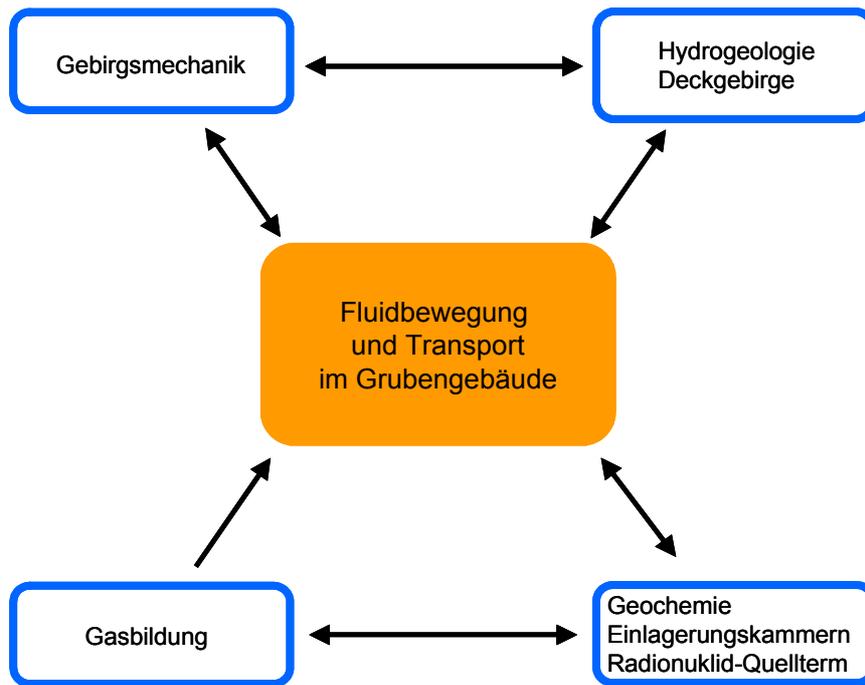


Abb. 7.1-1: Schnittstellen der Modellrechnungen

Die Untersuchungen für Einzelprozesse und Teilsysteme (Kapitel 6) bilden eine Schnittstelle zu den Modellrechnungen der Konsequenzenanalyse, siehe Abbildung 7.1-1. Aus diesen Untersuchungen werden einerseits Daten und Ergebnisse für die Konsequenzenanalyse ermittelt, andererseits liefern die Modellrechnungen zur Konsequenzenanalyse Parameter an einige der Modellrechnungen für Teilsysteme. Die folgenden Modellrechnungen für Einzelprozesse und Teilsysteme wurden durchgeführt:

- Gebirgsmechanische Rechnungen /IfG 2006a/, /IfG 2006b/ zum Nachweis der Tragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes und zur Ermittlung von Konvergenzverläufen für lange Zeiträume.
- Geochemische Rechnungen /INE 2006a/ zur Ermittlung des geochemischen Milieus und der maximal möglichen Elementkonzentrationen für alle Einlagerungskammern. Hieraus wurden Schadstoff-Quellterme für die Einlagerungsbereiche abgeleitet /ALSA 2006b/, /BUC 2006a/.
- Hydrogeologische Rechnungen für das Deckgebirge /COL 2006d/ zur Ermittlung der Ausbreitungspfade und des Transports von Schadstoffen im Deckgebirge. Hieraus wurden u.A. Transferfunktionen zur Ermittlung der potenziellen Strahlenexposition und der integrale hydraulische Widerstand des Deckgebirges gegen das Auspressen von Grubenlösung abgeleitet.
- Spezielle Modellrechnungen /COL 2006e/ zur Ermittlung der Strömungsvorgänge im Nahbereich der MAW-Kammer. Hieraus wurden Aussagen zur Möglichkeit eines Lösungszutritts zur MAW-Kammer abgeleitet.
- Untersuchungen zur Ermittlung der Gasbildungsrate und der insgesamt gebildeten Gasmengen für alle Einlagerungsbereiche /IST 2004/, /IST 2005/.

- Modellrechnungen zur Ausbreitung der Radionuklide in der Biosphäre und zur Strahlenexposition von Menschen /GSF 2006i/.

Die Konsequenzenanalyse wurde mit mehreren Rechenprogrammen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Kapiteln im Detail beschrieben.

7.2 Gebirgsmechanische Langzeitprognose

Die gebirgsmechanische Langzeitprognose beschreibt die Einflüsse gebirgsmechanischer Effekte auf die Entwicklungen des Gesamtsystems Asse während der Nachbetriebsphase /IfG 2006b/. Die Langzeitprognose setzt voraus, dass die Schließungsmaßnahmen in der vorgesehenen Weise umgesetzt wurden und die Resttragfähigkeit des Grubengebäudes bis zum Ende der Betriebsphase sichergestellt ist (vgl. Kapitel 2.3 und 6.5). Da unter diesen Voraussetzungen die Anforderungen des gleich bleibenden bzw. degressiven Verlaufs der Deckgebirgsverschiebungsraten und der Blockierung von dynamischen Reaktionen im Tragsystem erfüllt werden, ist auch die Prognose der Langzeitentwicklung des Tragsystems im Zustand der Resttragfähigkeit zuverlässig und robust /IfG 2006b/. Die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Langzeitprognose zeigen mögliche Entwicklungen des Gesamtsystems in der Nachbetriebsphase auf und liefern Daten für die Senkungsvorausberechnungen (Kapitel 7.3) und Transportmodellierungen (Kapitel 7.5).

Die gebirgsmechanische Langzeitprognose basiert im Wesentlichen auf der Datenbasis der Tragfähigkeitsanalyse in der Betriebsphase (Kapitel 6.5.1) und wurde mit dem 2D-Vertikalmodell durchgeführt (Kapitel 6.5.2). Die Langzeitprognose schließt unmittelbar an die Modellrechnungen der Tragfähigkeitsanalyse in der Betriebsphase an (Kapitel 6.5.3).

Zielsetzung der gebirgsmechanischen Langzeitprognose war die Simulation der integralen Entwicklungen des Gesamtsystems Grubengebäude/Deckgebirge sowie die Ermittlung der Konvergenz- und Porositätsentwicklung. Mit Hilfe des 2D-Vertikalmodells wurden für die Baufelder und für jede Sohle im Baufeld in der Südflanke gebirgsmechanische Parameter (konvergenzaktive Hohlraumvolumina, Konvergenzraten, Versatzporositäten) zeitabhängig ermittelt, die Eingangsparameter für die Transportrechnungen und die Senkungsprognose darstellen. Die Auswirkungen der Ungewissheiten der als signifikant identifizierten Einflussfaktoren, wie die Ausdehnung der Feuchtezone im Salinar und der hydraulische Wirkfaktor im Deckgebirge, wurden in Bandbreitenberechnungen abgeschätzt. Die Zuverlässigkeit der Langzeitprognose lässt sich aus einer Vielzahl von Fallstudien ableiten, die gezeigt haben, dass verschiedene Materialparameter, Einwirkungen und zeitliche Prozessabläufe zueinander konsistente, harmonische und prognostizierbare Entwicklungen ergeben.

Neben der Referenzentwicklung wurden auch die Auswirkungen der nicht auszuschließenden Standortentwicklungen „Bemessungserdbeben“ und „Vergletscherung“ untersucht. Die Gebirgsmechanische Langzeitprognose für den Standort Asse ist umfassend in /IfG 2006b/ beschrieben.

7.2.1 Referenzentwicklung

Aus dem Prozessverständnis und den Plausibilitätsbetrachtungen ergibt sich, dass die Stützwirkung gegen die Hohlraumkonvergenz während der Nachbetriebsphase durch den anwachsenden Fluiddruck im Porenvolumen und den ansteigenden Tragwiderstand des Salzversatzes zunehmen wird. Dadurch werden sich die Hohlraumkonvergenz verlangsamen und die Verformungsraten im Grubengebäude, im Salzsattel und im Deckgebirge verringern. Die Gebirgsspannung wird sich vom Deckgebirge und von heute tragenden Randzonen des Salzsattels zurück in das Grubengebäude verlagern.

Bei der Modellierung dieser Entwicklung stellen die maximale Einwirktiefe des Schutzfluids im Salzgestein und der Wirkfaktor für die strukturelle Integrität bzw. die Mobilität im Deckgebirge signifikante Einflussfaktoren dar, die durch Bandbreitenrechnungen abgedeckt wurden /IfG 2006b/.

Bei den Modellrechnungen wurden die Einwirkungen der Schutzfluideinleitung zum Ende der Betriebsphase mit erfasst. Eine deutliche Beschleunigung der Konvergenzraten durch das Feuchtekiechen war nur auf den Sohlen des Baufelds in der Südflanke – bei Vorgabe einer maximalen Einwirktiefe des Schutzfluides im Salz und eines maximalen Wirkfaktors der strukturellen Integrität im Deckgebirge³⁷ – festzustellen. Entsprechend dem größeren Abstand von der Südflanke wurden das Carnallit-Baufeld und das Baufeld im Zentralteil von der erhöhten Mobilität des Deckgebirges nicht mehr unmittelbar beeinflusst. Die deutlich geringeren Konvergenzerhöhungen auf der obersten und untersten Sohle sind insbesondere mit dem stabilisierenden Einfluss der Feldestränder des Baufelds in der Südflanke zu erklären. Insgesamt bewirken die hohen Konvergenzraten an der Südflanke eine raschere Porositätsabnahme des Versatzes.

Nach der Einstellung des vollen hydrostatischen Überlagerungsdruckes im Grubengebäude ergeben sich in der frühen Nachbetriebsphase mittlere Konvergenzraten von einigen Hundertstel Prozent pro Jahr, die konsistent sind mit den Verformungsraten in anderen gefluteten Bergwerken und Kavernen im Salzgestein /BER 2003/. Die Konvergenzraten für die Fälle der Feuchtigkeitseinwirkungen im Deckgebirge und Grubengebäude in der Bandbreitenberechnung liegen in der Nachbetriebsphase nahezu deckungsgleich übereinander (Abbildung 7.2-1). Hieraus ergibt sich, dass der Einfluss des unterschiedlichen Deckgebirgsverhaltens durch den hydrostatischen Innendruck überprägt wird. Eine Parameterbandbreite ergibt sich nur bei den Porositätsentwicklungen durch das unterschiedliche Konvergenzverhalten bei der Schutzfluideinleitung (Abbildung 7.2-2). Die Kurven für die obere und untere Bandbreite zeigen die Entwicklungen unter Berücksichtigung der Ungewissheiten bezüglich der Ausdehnung der Feuchtezone im Salinar und der Mobilität des Deckgebirges.

Die Entwicklungen der Konvergenzraten und Porositäten verlaufen konsistent zueinander und sind – für die Übernahme in die Transportmodellierungen - gut mit einem Kurvenfit anzunähern und durch entsprechende Funktionen numerisch zu beschreiben (Kapitel 7.5).

³⁷ Der Wirkfaktor charakterisiert den Durchtrennungsgrad im Deckgebirge und die sich daraus ergebende hydraulische Wirksamkeit der Deckgebirgslösung

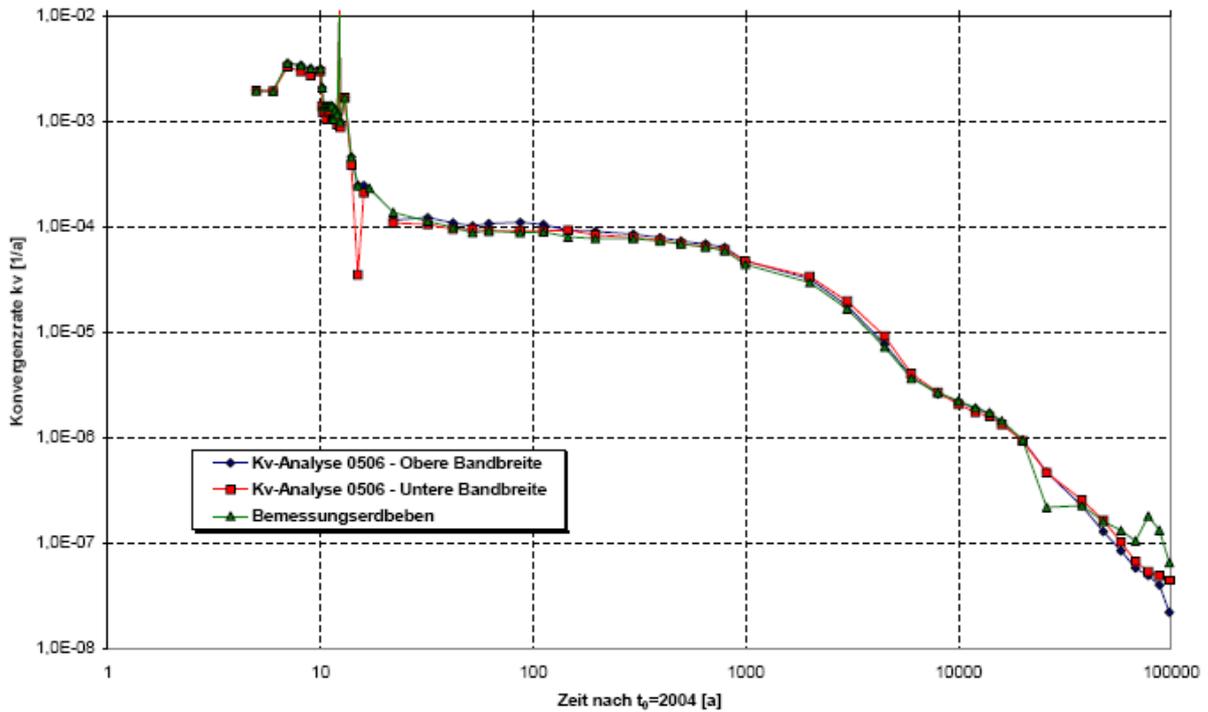


Abb. 7.2-1: Entwicklung der Konvergenzraten auf der 750-m-Sohle im Baufeld im Sattelkern (Steißfurt-Steinsalz) nach /IfG 2006b/

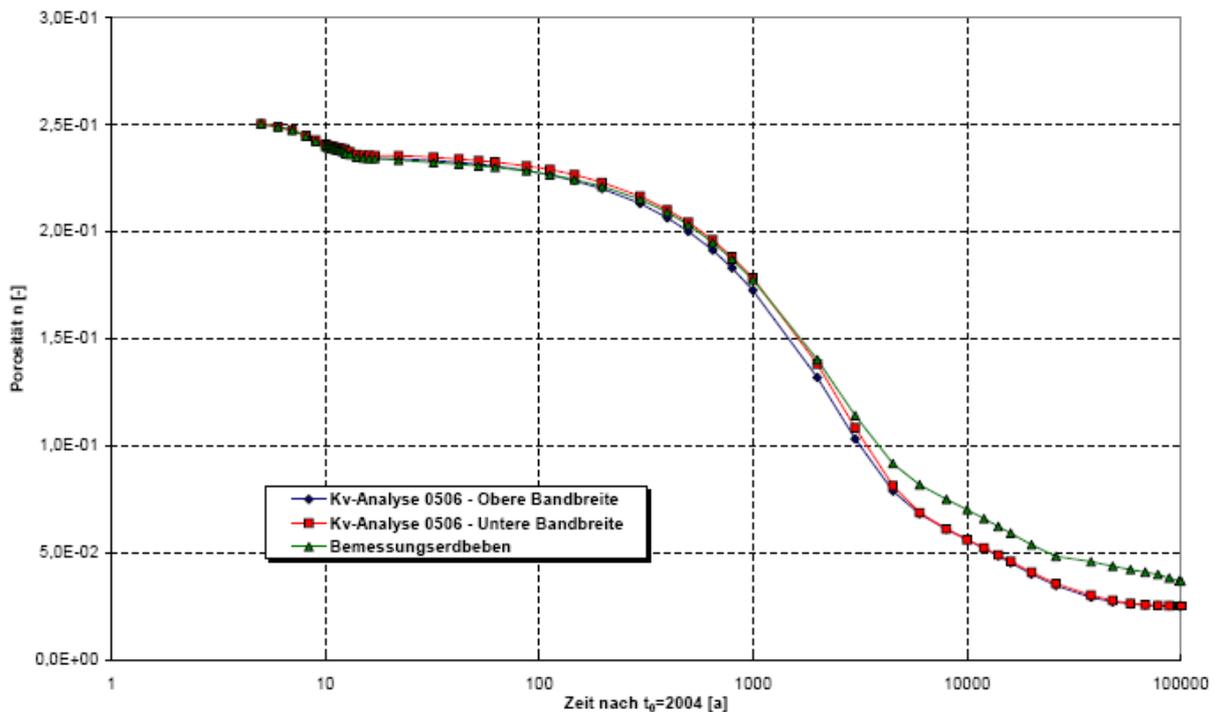


Abb. 7.2-2: Entwicklung der Porositäten auf der 750-m-Sohle im Baufeld im Sattelkern (Steißfurt-Steinsalz) nach /IfG 2006b/

Das aus der Entwicklung der Konvergenzraten abgeleitete konvergenzaktive Gesamtvolumen im Grubengebäude bestimmt einerseits das Lösungsvolumen im Grubengebäude, das für den potenziellen Schadstofftransport zur Verfügung steht, und ist andererseits für die Oberflächenabsenkung entscheidend. Trotz des hydraulischen Stützdrucks und zunehmenden Versatzwiderstands wird sich die gegenwärtige integrale Ausgangsporosität im Grubengebäude von 35 % innerhalb von 100 000 Jahren auf ca. 7 % reduzieren.

Die Verringerungsrate des Hohlraumvolumens der Gesamtgrube klingt nach Einleiten des Schutzfluids und zu Beginn der Nachbetriebsphase rasch ab und stabilisiert sich, nachdem der Fluidinnendruck in der Grube den hydrostatischen Wert überschreitet (Abbildung 7.2-3). Nach der Stabilisierung trägt die Verringerung des Hohlraumvolumens wesentlich zur Lösungsauspressrate aus dem Grubengebäude bei. Die entsprechende Entwicklungskurve entspricht in ihrem Verlauf den Konvergenzkurven (Abbildung 7.2-1). Demnach findet die konvergenzbedingte Lösungsauspressung überwiegend in den ersten 3 000 Jahren statt. Die Prognose von Auspressraten von weniger als 1 m³ pro Jahr, die in der späten Nachbetriebsphase nach etwa 50 000 Jahren zu erwarten sind, sind mit gebirgsmechanischen Modellen sowie den zugrunde liegenden Laborversuchen und Stoffgesetzen nur noch ungenau möglich. Das verfüllte Grubengebäude ist zu diesem Zeitpunkt weitgehend konsolidiert und die Gebirgsspannungsdifferenzen sind abgebaut.

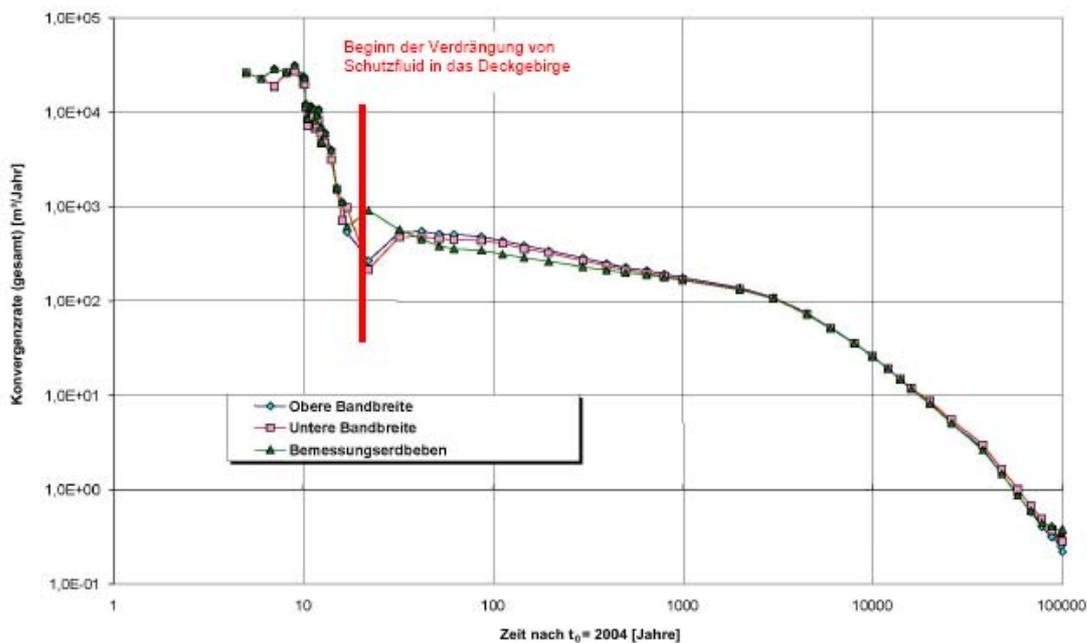


Abb. 7.2-3: Bandbreite der Konvergenzraten für das gesamte Grubengebäude; nach ca. 20 Jahren wird hierdurch auch Lösung in das Deckgebirge verdrängt. Nach /IfG 2006b/

7.2.2 *Alternative Entwicklungen*

Ergänzend zur gebirgsmechanischen Referenzentwicklung wurden aus der „Geowissenschaftlichen Langzeitprognose“ (vgl. Kapitel 5.1) zwei potenzielle Standortentwicklungen ausgewählt, die ein nicht auszuschließendes Gefährdungs- bzw. Einwirkungspotenzial für die Schachtanlage Asse aufweisen und deren gebirgsmechanische Konsequenzen auf die geflutete und geschlossene Schachtanlage untersucht wurden:

- die Auswirkungen eines Bemessungserdbebens und
- die erhöhte übertägige Auflast durch eine Standortvergletscherung.

Die Festlegung der Zeitpunkte erfolgte für das Bemessungserdbeben auf den Beginn der Nachbetriebsphase bzw. für die wenig wahrscheinliche Entwicklung einer Eiszeit mit Standortvergletscherung auf einen Zeitpunkt von etwas mehr als 100 000 Jahren. Ziel der Analyse dieser Szenarien war keine detaillierte gebirgsmechanische Bewertung von Tragelementen im Grubengebäude oder von Deckgebirgsbereichen, sondern vielmehr die Abschätzung der Größenordnung der Beeinflussung des integralen Konvergenzverhaltens, das für die Lösungsauspressung und somit für die Schadstofffreisetzung entscheidend ist.

Bewertung des Bemessungserdbebens

Das vollständig mit Lösung gefüllte und unter hydrostatischem Druck stehende Grubengebäude wird eine gebirgsmechanische Stabilisierung im Umfeld des Grubengebäudes und im Deckgebirge bewirken. Der im Grubengebäude vorhandene Stützdruck des Schutzfluides wird nicht nur in der unmittelbaren Hohlraumumgebung, sondern auch im gesamten bis dahin stark entspannten Deckgebirge zu einer signifikanten Zunahme der minimalen Hauptspannung führen. Da Deformations- und Entfestigungsvorgänge im hohen Einspannungsbereich nicht oder nur mit geringer Intensität auftreten, bleibt die Stabilität des Grubengebäudes und des Deckgebirges auch unter der Annahme eines Bemessungserdbebens der Intensität MSK VI $\frac{1}{2}$ erhalten. Die Konvergenz wird durch die dynamische Anregung auf einigen Sohlen geringfügig beeinflusst /IfG 2006b/. Die langzeitliche Entwicklung des Gesamthohlraumvolumens und die abgeleitete Auspressrate sind jedoch nahezu identisch mit den Referenzentwicklungen (Abbildung 7.2-3).

Bewertung der Vergletscherung

Bei den gebirgsmechanischen Modellrechnungen für den Lastfall „Vergletscherung“ wird zunächst die zusätzliche Auflast des Eises und in einem nächsten Schritt die Erhöhung des hydrostatischen Drucks durch das Schmelzwasser an der Gletscherbasis berücksichtigt.

Die Modellrechnungen haben ergeben, dass sich bei einer Vergletscherung des Standorts im Vergleich zur Referenzentwicklung ohne Vergletscherung eine zusätzliche Verringerung des Gesamthohlraumvolumens um 3 % nach 120 000 Jahren ergibt /IfG 2006b/. Dabei findet eine Porositätsverringerung im Grubengebäude statt, die auf den oberen Sohlen – aufgrund der höheren Anfangsporosität und der geringeren Gebirgsspannungen – stärker ausfällt als auf den unteren Sohlen. Die Konsequenz dieses Effektes ist, dass bei einer Eisüberfahung

die Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude zu späten Zeiten auf den oberen Sohlen durch Konvergenzaktivierung erkennbar zunimmt. Der Tragwiderstand des Grubengebäudes nimmt jedoch infolge der verstärkten Versatzkompaktion langfristig zu und die Konvergenz verlangsamt sich wieder.

Die Modellrechnungen ergeben für die intensivste Periode der Lösungsauspressung, die Periode unmittelbar nach der Vergletscherung, eine Lösungsauspressung von rund 40 000 m³ in 1 000 Jahren, d.h. eine mittlere Auspressrate von rund 40 m³/a. Dies entspricht der Auspressrate ungefähr 6 000 Jahre nach Beginn der Nachbetriebsphase (vgl. Abbildung 7.5-3). Zum Zeitpunkt der unterstellten Vergletscherung bestimmen die langlebigen Radionuklide ²³⁸U und ²³²Th sowie deren Zerfallsprodukte und das Radionuklid mit mittlerer Halbwertszeit ²³⁹Pu mit vergleichbaren Anteilen die Radiotoxizität in der Schachanlage (siehe Abbildung 8.3-2). Die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen während der kommenden 100 000 Jahre werden dagegen von ²³⁹Pu und den kürzerlebigen Radionukliden ²⁴⁰Pu und ²⁴¹Am dominiert. Aufgrund der mäßigen Lösungsauspressrate, die von der Vergletscherung verursacht wird, und der deutlich niedrigeren Radiotoxizität in der Schachanlage zum Zeitpunkt der Vergletscherung sind die radiologischen Auswirkungen einer Vergletscherung niedriger als jene in den kommenden 100 000 Jahren, die Gegenstand von Kapitel 7.5 sind. Die radiologischen Auswirkungen einer Vergletscherung brauchen deshalb nicht in größerem Detail untersucht zu werden.

7.3 Bergschadenkundliche Senkungsvorausberechnung

Der „Schutz der Oberfläche“ ist ein im Bergrecht definiertes Schutzziel, dessen Einhaltung während der Nachbetriebsphase eines Bergwerks nachzuweisen ist (vgl. Kapitel 3.1). Die Modellrechnungen zur Senkungsprognose sind in /SRO 2006/ ausführlich dargestellt. Im Ergebnis wird nachgewiesen, dass durch die vorgesehenen Schließungsmaßnahmen die Oberflächenabsenkung soweit begrenzt wird, dass die Einhaltung des genannten Schutzziels langfristig gewährleistet wird.

Entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik basiert das Schema des mark-scheiderischen, geometrisch-integralen Senkungsmodells auf einer Ursachen (untertägige Hohlraumkonvergenz) – Wirkung (Oberflächenabsenkung) – Verknüpfung. Dabei wird die Übertragung der untertägigen Verformungen auf die Oberfläche durch die Geschwindigkeit dieser Verformungen und das dazwischen liegende Gebirge beeinflusst. Bei langsamen untertägigen Verformungen, wie sie im Salzbergbau stattfinden, ist nur das zeitliche Konvergenzverhalten entscheidend. Dieser Zusammenhang wird durch die senkungsaktive Konvergenz beschrieben, die der Differenz zwischen dem Volumen des Hohlraumes zu einem definierten Zeitpunkt und dem ursprünglichen Hohlraumvolumen entspricht.

Die Vorgehensweise der bergschadenkundlichen Senkungsberechnungen ist wie folgt:

- Identifizierung des geeigneten markscheiderischen Berechnungsverfahrens entsprechend den Standortbedingungen,

- Ableitung der für die Berechnung benötigten standortspezifischen Kennwerte durch Anpassung an die in-situ gemessenen Senkungen, unter Berücksichtigung der aktuellen Verformungsdaten sowie der Ergebnisse der Tragfähigkeitsanalyse /IfG 2006a³⁸,
- Prognoserechnungen für Zeitschnitte der während des Zeitraums von 2005 bis 1 Mio. Jahre zu erwartenden Senkungen, unter Berücksichtigung der Standortdaten zu den Pfeilerstauchungs- und Konvergenzraten sowie der prognostizierten Konvergenzentwicklung gemäß der gebirgsmechanischen Langzeitprognose /IfG 2006b/,
- Plausibilitätsprüfung der vorausgerechneten maximalen Senkungen, sowie
- Bestimmung der maximalen Zerrungs- und Pressungswerte für die ausgewählten Zeitschnitte.

7.3.1 Konzeptuelles Modell

Bei der Modellierung der Oberflächenabsenkung für den Standort Asse wurden folgende Phänomene berücksichtigt /SRO 2006/:

- die Entwicklung der Hohlraumkonvergenz in den Baufeldern des Grubengebäudes und des aktuellen Hohlraumvolumens als Ursache für die Oberflächensenkungen,
- die Beschreibung der Verformungsübertragung durch das Gebirge zur Oberfläche unter Berücksichtigung räumlicher und zeitlicher Einflüsse,
- der Einfluss der geneigten Gebirgsstrukturen auf die räumliche Lage der Senkungsmulde im Vergleich zur Lage der konvergierenden Hohlräume,
- Bewertung der Beeinflussungen zwischen den Grubengebäuden Asse I und II auf Grundlage der Senkungsentwicklungen.

Das Bodenbewegungsmodell für den Standort Asse basiert auf dem Verfahren von Kochmanski /KOC 1959/. Aufgrund der langsamen Konvergenzprozesse in der Schachanlage Asse ist die Volumenrate der Senkungsmulde praktisch identisch mit der Konvergenzrate der untertägigen Hohlräume. Die Verzögerungseigenschaften des überlagernden Gebirges wurden daher bei den Modellrechnungen vernachlässigt. Da die Gebirgsschichten über dem Grubengebäude stark geneigt sind, ist die oberflächliche Senkungsmulde in Richtung des Einfallens verschoben.

7.3.2 Berechnungsmodell

Das Berechnungsmodell setzt sich aus drei Komponenten zusammen /SRO 2006/:

- dem geometrischen Modell der untertägigen Hohlräume,
- dem mathematisch-physikalischen Konvergenzmodell und

³⁸ Anhand der Ergebnisse der Tragfähigkeitsanalyse (vgl. Kapitel 6.5) erfolgt die Kalibrierung des Modells durch Nachvollziehung der bisherigen Verformungen.

- dem mathematisch-physikalischen Senkungsmodell.

Nach der Ableitung des geometrischen Modells, wurde mit dem mathematisch-physikalischen Konvergenzmodell die zukünftige Konvergenzentwicklung im Baufeld in der Südflanke und im Carnallititbaufeld abgebildet und anschließend mit dem mathematisch-physikalischen Senkungsmodell der Zusammenhang zwischen der Volumenkonvergenz der Abbaukammern und der Oberflächenabsenkung beschrieben.

Für jede Abbaukammer des Baufelds in der Südflanke und für das Carnallititbaufeld wurde eine Senkungsberechnung durchgeführt, wobei jeweils vorab die kammer-spezifischen Kennwerte für die Verschiebung der Senkungsmulde infolge des Schichteinfallens mit der Formel nach /KOC 1959/ bestimmt wurden. Die Gesamtsenkung wurde durch lineare Superposition der kammer-spezifischen Senkungen ermittelt.

Zur Kalibrierung des Berechnungsansatzes wurden für Skalenwerte der horizontalen Muldenausdehnung von 140 m und 150 m Senkungsberechnungen für den Zeitraum von 1986 bis 2004 durchgeführt und mit den Ergebnissen der Nivellementmessungen an der Tagesoberfläche verglichen. Dabei ergab sich für den Skalenwert von 140 m eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Senkungen. Die Abweichungen sind durch die schematische Verteilung der sohlenbezogenen Konvergenzvolumina auf die einzelnen Kammern in der Südflanke und der Bandbreite der Konvergenzabschätzungen für das Carnallititbaufeld zu erklären.

Die Prognoserechnungen beginnen im Jahr 2005 und umfassen einen Prognosezeitraum von 1 Mio. Jahren. Dabei wurden für zehn Zeitpunkte jeweils für vier Profile und in einem Rasterbereich (3 km x 3 km) mit einem Punktabstand von 50 m die Senkungen berechnet: Weiterhin wurden zwei Alternativen der Einwirktiefe des Schutzfluids im Salzgestein und die damit verbundenen Auswirkungen auf die Konvergenzentwicklung berücksichtigt.

Zukünftige Veränderungen in der Geosphäre und Biosphäre, wie z.B. Erosion, Subrosion, Kaltzeiten (vgl. Kapitel 5.1), wurden bei den Prognoserechnungen nicht berücksichtigt, aber bei der abschließenden Bewertung beachtet.

7.3.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

In Abbildung 7.3-1 sind beispielhaft die Ergebnisse der Senkungsprognose für ein SW-NE-Profil dargestellt. Analog zu den Ergebnissen der gebirgsmechanischen Langzeitprognose (Kapitel 7.2) schreitet die Oberflächenabsenkung nach Einstellung des vollen hydrostatischen Überlagerungsdruckes im Grubengebäude immer langsamer voran. Während die Senkungsrate bis zum vollständigen Einleiten des Schutzfluids in die Grube im Maximum weiterhin bei ca. 11 mm/a liegen wird, wird sich diese im Jahr 2100 auf 0,7 mm/a, nach ca. 10 000 Jahren auf 0,07 mm/a sowie nach ca. 100 000 Jahren auf 0,0009 mm/a verringert haben /SRO 2006/. Der untertägige Resthohlraum im Grubengebäude hat sich in dieser Zeitspanne auf eine Restporosität von ca. 7 % verringert (Kapitel 7.2). Kumulativ kommt es im Bereich eines SW-NE-Profiles während eines Zeitraums von 100 000 Jahren zu einer maximalen Oberflächenabsenkung von 1200 mm (Abbildung 7.3-1).

Die Ergebnisse der Prognoserechnungen für ein Punktraster am Standort Asse erlauben eine flächenhafte Auswertung der ca. 3 km messenden Senkungsmulde. In Abbildung 7.3-2 ist ein Isolinenplan der kumulativen Oberflächenabsenkung für den Prognosezeitraum vom Jahr 2005 bis 100 000 Jahre dargestellt. Der maximale Senkungswert beträgt ca. 1 260 mm. Bei einer Standardabweichung von 10 % bedeutet dies, dass mit 95% Wahrscheinlichkeit die maximale Senkung 1 470 mm nicht überschreitet.

Berücksichtigt man die bis 2005 aufgetretene Senkung von 244 mm, so lässt sich eine Gesamtsenkung seit der Auffahrung bis 100 000 Jahre von ca. 1500 mm sowie bis 1 000 000 Jahre von ca. 1600 mm angeben.

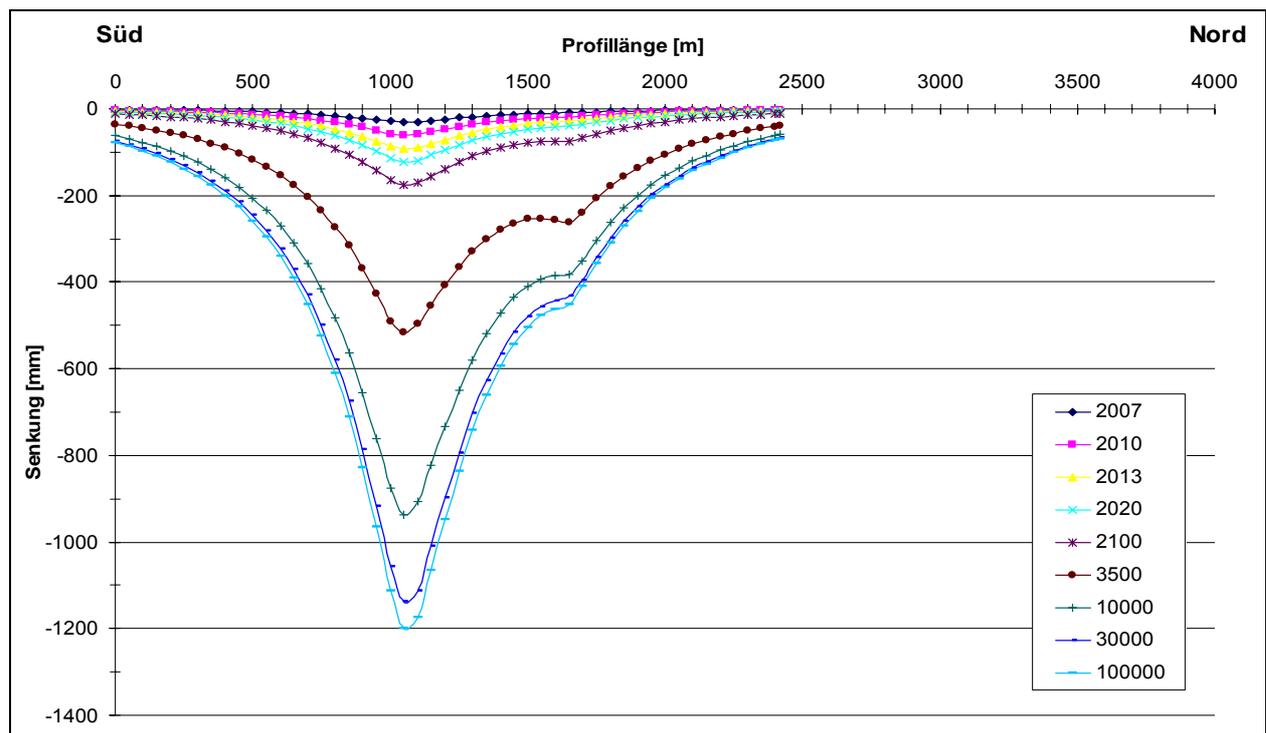


Abb. 7.3-1: Ergebnisse der Senkungsberechnungen für das SW-NE gerichtete Profil 2³⁹

Auf Grundlage der Prognoserechnungen können – basierend auf der Theorie von /KNO 1984/ – die maximalen Zerrungen und Pressungen berechnet werden, die sich aus den Oberflächenabsenkungen ergeben. Die Auswertung der entsprechenden Berechnungen ergab in dem für Bauwerke relevanten Zeitraum bis zum Jahr 3500 nur geringfügige Deformationen, die keine Gefährdung für Objekte an der Tagesoberfläche darstellen.

Die Senkungsberechnungen ergaben langfristig eine geringe Beeinflussung aus den Abbaun des Grubengebäudes der Schachanlage Asse II auf das deutlich kleinere Grubengebäude der Schachanlage Asse I sowie die darüber liegenden Gebirgsbereiche bzw. die Tagesoberfläche. Wegen der sehr geringen zeitlichen Bewegungs- und Deformationsraten sind jedoch Bruchvorgänge im Grubengebäude Asse I auszuschließen.

³⁹ Die Lage der Profillinie ist in Abbildung 7.3-2 gekennzeichnet.

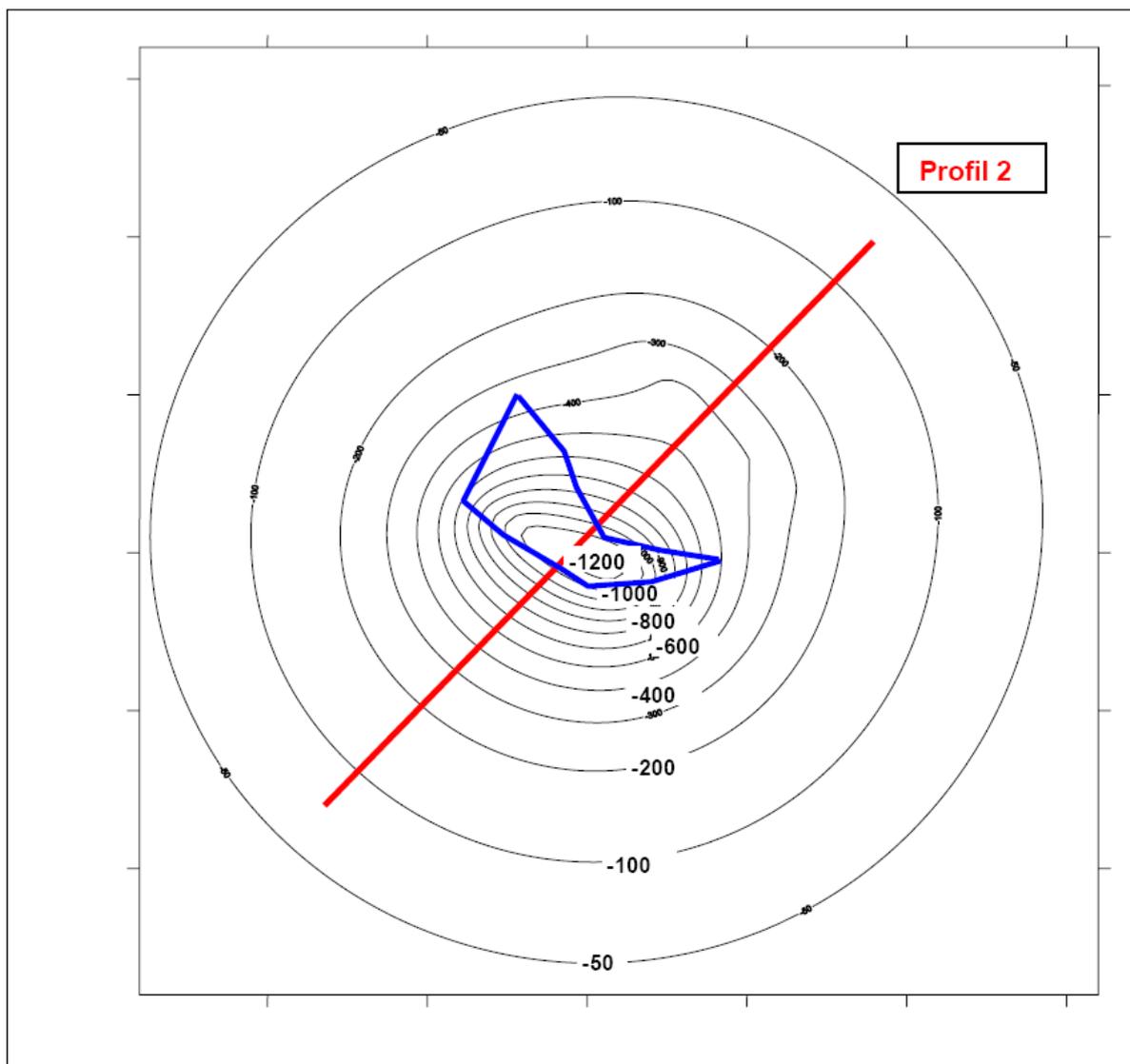


Abb. 7.3-2: Isolinienplan der Oberflächenabsenkung in mm für das Jahr 100 000 nach /SRO 2006/.
 Rot eingetragen ist die SW-NE-Profillinie 2 und blau die Position des Gruben-
 gebäudes der Schachanlage Asse II.

Schlussfolgerungen

Die bergschadenkundliche Senkungsprognose /SRO 2006/ hat ergeben, dass über einen Prognosezeitraum von 100 000 Jahren kumulative maximale Oberflächenabsenkungen von ca. 1,26 m zu erwarten sind. Nach den Beobachtungen der bisherigen Auswirkungen der Senkungen und da es sich um eine kleinräumige und sehr langsam absinkende Mulde handelt, ist auch langfristig nur von minimalen lokalen Auswirkungen auf die Grundwasser-
 verhältnisse, die Oberfläche und andere Schutzgüter auszugehen. Die oberflächlichen De-
 formationen werden keine Gefährdung für Bauwerke darstellen. Eine Schädigung des
 Sicherheitspfeilers zwischen den Schachanlagen Asse I und II kann nicht eintreten.

Die minimalen Senkungsraten zu späteren Zeiten ($< 0,1$ mm/a) liegen deutlich unterhalb natürlicher Bodenbildungsraten (ca. 0,25 - 0,50 mm/a) und Erosionsraten (ca. 1 - 2 mm/a), so dass nach einigen Hundert Jahren an der Oberfläche keine Veränderungen mehr erkennbar sein werden. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose (vgl. Kapitel 5.1) hat ergeben, dass sich während des Prognosezeitraums natürliche Entwicklungen, wie Erosion, Subrosion sowie klimatische Entwicklungen, mit Absenkungen von einigen Zehner Metern wesentlich stärker auf die Oberflächengestalt und die Grundwasserverhältnisse auswirken und somit die Auswirkungen der bergbaubedingten Absenkungen überprägen werden.

7.4 Freisetzung wasserrechtlich relevanter Stoffe in die Biosphäre

Der Schutz des Grundwassers vor unzulässig hohen Verunreinigungen ist ein im Bergrecht definiertes und im Wasserhaushaltsgesetz konkretisiertes Schutzziel, siehe Kapitel 3.1. In der Nachbetriebsphase werden mit dem Schutzfluid Schadstoffe aus dem Grubengebäude ausgepresst, die sich im Deckgebirge ausbreiten und in das oberflächennahe Grundwasser gelangen können. Die Ermittlung möglicher Verunreinigungen des Grundwassers durch wasserrechtlich relevante Stoffe erfolgt durch die Berechnung der Stoffkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen und deren Verdünnung im Gesamtsystem Asse bis zu einem angenommenen Übertritt in das oberflächennahe Grundwasser. Die Rückhaltung durch Sorptionsprozesse und Löslichkeiten wird nach dem Austritt aus den Einlagerungsbereichen nicht berücksichtigt.

Die Vorgehensweise bei der Berechnung der potenziellen Freisetzung von wasserrechtlich relevanten Stoffen ist die folgende:

- systematische Erfassung des Inventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den Abfällen, Abfallbehältern und Abfallmatrizes sowie den noch einzubringenden Versatzstoffen in den Einlagerungsbereichen,
- schrittweise Aufteilung des Stoffinventars in Stoffgruppen, Stoffuntergruppen sowie in Stoffkomponenten und Elemente (vgl. Kapitel 2.1),
- Berechnung des Quellterms für chemische und chemotoxische Stoffe (vgl. Kapitel 6.2),
- Ermittlung der Verdünnung von Stoffkonzentrationen bis in oberflächennahes Grundwasser mit biosphärenverträglicher Salzkonzentration (vgl. Kapitel 6.8 und 7.5) sowie
- Vergleich der berechneten Stoffkonzentrationen mit Grenz- und Prüfwerten der einschlägigen Gesetze und Regelwerke.

Die Modellrechnungen für die Prognose zur möglichen Verunreinigung des Grundwassers durch wasserrechtlich relevante Stoffe aus Abfällen und Versatzstoffen im Grubengebäude sind in /BUC 2006b/ ausführlich dargestellt. Es wurde nachgewiesen, dass unzulässige Verunreinigungen oder sonstige nachteilige Veränderungen des Grundwassers vermieden werden.

7.4.1 Konzeptuelle Modelle

Das Inventar an chemischen und an chemotoxischen Stoffen im Grubengebäude, die eine Gefährdung des Grundwassers hervorrufen können, wurde systematisch erfasst, siehe /BUC 2004/ und Kapitel 2.1.2. In diese Erfassung wurden neben den Abfällen, Abfallbehältern und Abfallmatrizes auch die noch einzubringenden Versatzstoffe in den Einlagerungsbereichen einbezogen.

Durch den Kontakt der Abfallgebinde und der Versatzstoffe mit dem Schutzfluid gehen die chemischen und chemotoxischen Stoffe in Lösung. Es wurde angenommen, dass die Stoffe instantan in Lösung gehen können. Die Berechnung der maximalen Stoffkonzentrationen erfolgte unter Berücksichtigung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern in mehreren Schritten. Dies führte zu einem Quellterm, siehe /BUC 2006a/ und Kapitel 6.2.2.

Die Ausbreitung der chemischen und chemotoxischen Stoffe im Gesamtsystem erfolgt mit der Lösungsbewegung, vergleichbar mit der Ausbreitung von Radionukliden (Kapitel 7.5). Bei der Ausbreitung von chemischen und chemotoxischen Stoffen wurden folgende Effekte berücksichtigt /BUC 2006b/:

- die instantane Auflösung des Inventars im initialen Lösungsvolumen des jeweiligen Einlagerungsbereichs,
- die Begrenzung der Stoffkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen durch Löslichkeiten,
- die Verdünnung der Stoffkonzentrationen
 - aus den Einlagerungsbereichen im Grubengebäude und Deckgebirge,
 - aus dem Schutzfluid im Deckgebirge.
- der Übertritt der Stoffe in das oberflächennahe Grundwasser.

Die Ausbreitung gelöster chemischer und chemotoxischer Stoffe wurde als Ausbreitung von Tracern mit den gleichen Rechenprogrammen und konzeptuellen Modellen wie für die Ausbreitung von Radionukliden modelliert. Dabei wurden Advektion, Dispersion sowie Diffusion berücksichtigt, nicht jedoch Ausfällungen und Sorptionsprozesse (vgl. Kapitel 6.8 und 7.5).

Für die Ableitung der Verdünnung von chemischen und chemotoxischen Stoffen aus den Einlagerungsbereichen im Gesamtsystem wurde die Ausbreitung inerter Tracer, die instantan verfügbare, nicht zerfallende und nicht sorbierte Lösungsinhaltsstoffe darstellen, im Transportmodell simuliert. Für jeden Einlagerungsbereich wurden ein inventarbestimmter Tracer und auch ein löslichkeitsbegrenzter Tracer mit einer konstanten Konzentration von 1 mol/m^3 angesetzt. Das zeitliche Minimum des Verhältnisses zwischen der Konzentration des Tracers beim Austritt aus einem Einlagerungsbereich und der Konzentration dieses Tracers in oberflächennahem Grundwasser eines Exfiltrationsgebietes beschreibt die Verdünnungsfaktoren des Gesamtsystems. Die Faktoren wurden für jedes Exfiltrationsgebiet separat ermittelt /ALSA 2006c/.

Für die Ableitung der Verdünnung von chemischen und chemotoxischen Stoffen aus dem Schutzfluid im Deckgebirge wurden ebenfalls die Ergebnisse zur Ausbreitung inerter Tracer im Deckgebirgsmodell herangezogen. Die Modellierung ist bereits in Kapitel 6.8 erläutert. Das zeitliche Minimum des Verhältnisses zwischen der Konzentration eines Tracers beim Austritt aus dem Grubengebäude und der Konzentration des Tracers in oberflächennahem Grundwasser beschreibt die Verdünnungsfaktoren für Grubenlösung im Deckgebirge. Diese Faktoren wurden für jedes Exfiltrationsgebiet separat ermittelt und entsprechen jeweils dem reziproken Wert der Summe der Transferfunktionen, siehe /TRA 2006/ und Kapitel 6.8.

Die Rückhaltung von chemischen und chemotoxischen Stoffen durch Sorptionsprozesse und Löslichkeiten, die zusätzlich eine Abnahme der Konzentrationen bewirken, werden außerhalb der Einlagerungskammern weder im Grubengebäude noch im Deckgebirge berücksichtigt.

7.4.2 Berechnungsmodelle

Einlagerungsbereiche

Für die Abschätzung der Ausbreitung der in den Einlagerungsbereichen eingelagerten chemischen und chemotoxischen Stoffe werden für die bereichsspezifischen Quellterme, vgl. Kapitel 6.2.2, die Stoffkonzentrationen des Schutzfluids abgezogen. Die Stoffkonzentrationen des Schutzfluids werden im Grubengebäude nicht verdünnt und deren Ausbreitung deshalb getrennt berechnet (siehe unten).

Die Ausbreitungen der Tracer ergeben, dass für jeden Tracer eines Einlagerungsbereiches die Verdünnung bei einer Exfiltration im Tal von Wittmar am geringsten ist /ALSA 2006c/. Die wasserrechtlich relevanten Stoffkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen werden um den entsprechenden Verdünnungsfaktor des Gesamtsystems reduziert, siehe Tabelle 7.4-1.

Tab. 7.4-1: Verdünnungsfaktoren für Lösungsinhaltsstoffe aus den Einlagerungsbereichen bei einer Exfiltration im Tal von Wittmar

	LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4	MAW
Referenzwert für inventarbestimmte Tracer*	250 000	1 200 000	1 200 000	480 000	2 900 000	200 Mio
Referenzwert für Löslichkeitsbegrenzte Tracer*	170 000	1 100 000	1 100 000	480 000	2 800 000	40 Mio

* Minimalwerte aus der kombinierten Variante (KAFKA) aus /ALSA 2006c/

Die Stoffkonzentrationen aus den Einlagerungsbereichen werden sich im Grubengebäude überlagern. Dies wurde durch Summation der einzelnen Konzentrationsbeiträge berücksichtigt.

Grubengebäude

Für die chemischen und chemotoxischen Stoffe des Schutzfluids wurde der Quellterm in Anlehnung an die Vorgehensweise für die Einlagerungsbereiche berechnet /BUC 2006b/.

Die Ausbreitung des Tracers im Deckgebirge ergibt, dass für die wahrscheinliche Entwicklung im Deckgebirge die Verdünnung bei Exfiltration im Tal von Wittmar nach etwa 25 000 Jahren am geringsten ist. Der Verdünnungsfaktor beträgt zu dieser Zeit 2 500 /TRA 2006/. Die wasserrechtlich relevanten Stoffkonzentrationen des Schutzfluids werden um diesen Verdünnungsfaktor, welcher ausschließlich eine Folge der Ausbreitung im Deckgebirge ist, reduziert. Die Verdünnung der Stoffkonzentrationen bis zur Exfiltration in den anderen möglichen Exfiltrationsgebieten fällt höher aus /COL 2006d/.

Die Stoffkonzentrationen aus dem Schutzfluid werden sich im Grubengebäude und Deckgebirge mit denen aus den Abfallgebänden überlagern. Dies wurde durch Summation der einzelnen Konzentrationsbeiträge berücksichtigt.

7.4.3 Ergebnisse und Konsequenzen

Das Gesamtinventar an chemischen und chemotoxischen Stoffen in der Schachanlage setzt sich aus Stoffkomponenten des Abfalls und der Versatzstoffe zusammen. Dabei wurden die noch einzubringenden Versatzstoffe, einschließlich des Schutzfluids, entsprechend dem Schließungskonzept und der geplanten Verfüllkonzepte für die Einlagerungskammern einbezogen.

Die berechneten wasserrechtlich relevanten Stoffkonzentrationen in oberflächennahen Wässern sind in /BUC 2006b/ ausführlich dargestellt und bewertet. Der Vergleich mit den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung von 2001 und den Prüfwerten der einschlägigen Regelwerke zeigt, dass unter wahrscheinlichen Bedingungen für die Ausbreitung chemischer und chemotoxischer Stoffe im Gesamtsystem keine unzulässigen Verunreinigungen des oberflächennahen Grundwassers auftreten werden.

Die Prüfung einer möglichen Verunreinigung des Grundwassers bzw. Trinkwassers durch wasserrechtlich relevante Stoffe aus den Abfällen und Versatzstoffen in der Schachanlage Asse ist für eine abdeckende Bandbreite der Stoffinventare und ungünstige Annahmen für die Verdünnung der Stoffkonzentrationen im Gesamtsystem durchgeführt worden. Weitere Rückhalteeffekte für wasserrechtlich relevante Stoffe, wie Löslichkeiten und Sorption, im Grubengebäude außerhalb der Einlagerungsbereiche und im Deckgebirge wurden nicht berücksichtigt.

Es wurde nachgewiesen, dass die künftige Gefahr einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität bzw. einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder eine nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Das wasserrechtliche Schutzziel wird deshalb bei anforderungsgerechter Umsetzung der geplanten Schließungsmaßnahmen eingehalten.

7.5 Potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre über den Lösungspfad

Die radioaktiven Abfälle in den Einlagerungsbereichen kommen durch die gezielte Einleitung des Schutzfluids in Kontakt mit Lösung. Nach Mobilisierung aus den Abfällen sind die Radionuklide teilweise oder vollständig in der Flüssigkeit gelöst und können mit der Flüssigkeit durch die Grube in das Deckgebirge und letztendlich in die Biosphäre transportiert werden. Nach diesem Transport können die Radionuklide eine Strahlenexposition in der Biosphäre verursachen. Wegen der durch Korrosionsprozesse verursachten Gasbildung in den Einlagerungsbereichen sind stets eine flüssige und eine gasförmige Phase in den Grubenbauen vorhanden. Daher wird in der Konsequenzenanalyse auch eine Freisetzung über den Gaspfad betrachtet; dies wird in Kapitel 7.6 thematisiert.

Die Freisetzung über den Lösungspfad gehört zu den potenziell wesentlichen langzeitrelevanten Konsequenzen der eingelagerten radioaktiven Abfälle. Daher hat die Diskussion der zugehörigen Modellannahmen und Rechenergebnisse einen großen Stellenwert im Rahmen der Konsequenzenanalyse. Auf die Qualität der verwendeten Eingangsdaten wird nur an einigen Stellen eingegangen, da die Bewertungen des Schließungskonzepts, der Standortdaten und der Ergebnisse von Modellrechnungen für Teilsysteme an anderer Stelle in diesem Bericht erfolgen (Kapitel 2 bis 4 sowie 8).

Die Standortbedingungen (Kapitel 2) und ihre modellhafte Abbildung sowie die Prognosen für die Entwicklungen des Gesamtsystems (Kapitel 5.1) bilden die Grundlagen für die Berechnung der Freisetzung über den Lösungspfad und der potenziellen Strahlenexpositionen. Die Grundlagen der Rechnungen und die Ergebnisse sind ausführlich in den Berichten /ALSA 2005a/ und /ALSA 2006c/ dargestellt. Der erste Bericht enthält die Ergebnisse von Rechnungen für den Referenzfall sowie für einige Varianten und Szenarien. Der zweite Bericht enthält als Ergänzung die Ergebnisse für die kombinierte Variante, welche die als am wahrscheinlichsten angesehene Repräsentation aus der Szenariengruppe des Referenzszenarios darstellt. Die Ergebnisse der probabilistischen Unsicherheitsanalyse sind im Bericht /USA 2006/ enthalten. Diese drei Berichte werden im Folgenden oft erwähnt und zusammenfassend als „die drei Berichte zum Lösungspfad“ bezeichnet.

Den Berechnungen der Konsequenzen liegen konzeptuelle Modelle für die potenzielle Ausbreitung der Radionuklide im Nahfeld, im Deckgebirge und in der Biosphäre zu Grunde. Eine Bewertung dieser Modelle erfolgt in Kapitel 7.5.1. Die konzeptuellen Modelle wurden in Berechnungsmodelle umgesetzt, welche in den Computercodes zur Berechnung des Lösungs- und Radionuklidtransports verwendet wurden. Auf die Bewertung dieser Berechnungsmodelle wird in Kapitel 7.5.2 eingegangen.

In den Kapiteln 7.5.3 und folgende werden die Ergebnisse der Modellrechnungen für den Referenzfall, die kombinierte Variante, die Unsicherheitsbetrachtungen und alternativen Szenarien sowie die probabilistische Unsicherheitsanalyse beschrieben und bewertet. In Kapitel 7.5.9 werden die aus diesen Ergebnissen abzuleitenden Konsequenzen diskutiert.

Zur Untersuchung der Langzeitsicherheit wurde zu einem relativ frühen Zeitpunkt der Nachweisführung ein Referenzfall für die mögliche Entwicklung des Gesamtsystems am Standort Asse definiert. Dieser Fall repräsentiert eine wahrscheinliche Entwicklung aus der Szenario-

riengruppe des Referenzszenarios und berücksichtigt die vorgesehenen Maßnahmen des Schließungskonzepts in vollem Umfang (vgl. Kapitel 4.2). Er wurde bei einigen Sensitivitäts- bzw. Unsicherheitsbetrachtungen /ALSA 2005a/, /ALSA 2006a/ zum Vergleich herangezogen. Der Referenzfall wird im Folgenden stets „Referenzfall^{TF}“ genannt, wenn es sich um die Rechnungen aus dem Bericht /ALSA 2006c/ handelt, die mit den Transferfunktionen für den Deckgebirgsrechenfall DR13 gemäß /TRA 2006/ berechnet wurden. Er ist dann mit der kombinierten Variante (siehe unten) vergleichbar, die im Wesentlichen zusätzlich die aktualisierten Quellterme berücksichtigt.

Der Referenzfall basiert auf Eingangsdaten, die Mitte 2005 verfügbar waren und den zu diesem Zeitpunkt bestehenden Kenntnisstand widerspiegeln. Für einige Teilsysteme leiteten sich Modellbeschreibungen aus (a) noch nicht überprüften Annahmen, (b) Experteneinschätzungen oder (c) konservativen Annahmen zum Systemverhalten ab. Dies betraf insbesondere

- die Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern (a),
- die maximal möglichen Konzentrationen relevanter Radionuklide, einschließlich deren langzeitiger Entwicklung (b),
- den Diffusionskoeffizienten (c),
- die zeitliche Entwicklung des Abströmwiderstandes im Deckgebirge gegen das Auspressen von Grubenlösung in den ersten hundert Jahren (b) und
- die Transportpfade und infolge dessen ebenso die Transportzeit von Schadstoffen im Deckgebirge (c).

Parallel zu den für den Referenzfall durchgeführten deterministischen Sensitivitäts- bzw. Unsicherheitsbetrachtungen wurden die getroffenen Modellannahmen für die oben genannten Prozesse (a) überprüft und belastbare Parameter ermittelt, die Experteneinschätzungen (b) aktualisiert und Konservativitäten (c) durch realistischere Modellbeschreibungen und Parameterwerte abgebaut. Die hieraus abgeleiteten, neuen Parameter wurden in den Datensatz der Szenariengruppe des Referenzszenarios einbezogen und seitdem in den Modellrechnungen zur Ausbreitung von Schadstoffen im Gesamtsystem Asse berücksichtigt /ALSA 2006c/. Der hierauf basierende Datensatz beschreibt eine als sehr wahrscheinlich eingeschätzte Entwicklung des Gesamtsystems in der Szenariengruppe des Referenzszenarios und wird als „Kombinierte Variante“ bezeichnet (siehe Kapitel 7.5.4). Auf dieser kombinierten Variante basiert auch die probabilistische Analyse, deren Ergebnisse in den Kapiteln 7.5.7 und 7.5.8 beschrieben sind.

7.5.1 Nachweismodell

In den drei Berichten zum Lösungspfad wird definiert, was unter einem konzeptuellen Modell verstanden wird. Die Definition eines Modells orientiert sich am IAEA-Glossar /IAEA 2005/ und entspricht damit internationalen Standards.

Mit Hilfe der konzeptuellen Modelle werden die Teilbereiche des komplexen Grubengebäude- und Deckgebirgs-Systems so aufbereitet, dass eine nachfolgende Anwendung numerischer Methoden möglich ist. Für alle Teilbereiche und alle Effekte wurden konzeptuelle Modelle entwickelt, um das Gesamtsystem sicherheitstechnisch zu bewerten. Im Folgenden werden die eingesetzten konzeptuellen Modelle – unterschieden nach den Komponenten Nahfeld, Deckgebirge und Biosphäre – diskutiert. Die aus den konzeptuellen Modellen abgeleiteten mathematischen Berechnungsmodelle werden in Kapitel 7.5.2 behandelt.

7.5.1.1 *Nahfeld*

Das konzeptuelle Modell für das Nahfeld ist – für einen groben Überblick stark vereinfacht ausgedrückt – wie folgt:

- Die komplexe Struktur des Grubengebäudes, d.h. das vernetzte System von Wegsamkeiten, bestehend aus Auffahrungen und Auflockerungszonen, wird in einer vereinfachten Geometrie und Struktur abgebildet, wobei eine numerisch handhabbare Anzahl von Strukturelementen entsteht. Einige stellen die Einlagerungsbereiche für die eingelagerten Abfälle dar, die anderen die restlichen Grubengebäudeteile mit den Verbindungen zur Übertrittsstelle in das Deckgebirge.
- Die Grube wird mit Schutzfluid gefüllt. Die eingelagerten Radionuklide werden durch chemische Prozesse aus den Abfallgebinden, bzw. aus der Abfallmatrix mobilisiert und advektiv/dispersiv mit dem Schutzfluid sowie diffusiv in Lösung im Grubengebäude transportiert.
- Gasbildung in den Einlagerungskammern und Gastransport in der Grube werden berücksichtigt. Die Gasspeicherung führt zu einem Auspressen von kontaminierter Lösung, u.A. aus den Einlagerungsbereichen.
- Antrieb für die Fluidbewegungen ist neben der Gasbildung die Gebirgskonvergenz, die von hydraulischen Randbedingungen, den Strömungswiderständen in der Grube und im Deckgebirge sowie weiteren Parametern abhängt.
- Der Transport in der Grube wird durch Strömungsbarrieren, Auflockerungszonen, Schweben, Verschlüsse und versetzte Bereiche beeinflusst.

Zum Nahfeld gehören im geometrischen Sinn die bergmännisch erstellten Grubenbaue, die an diese Grubenbaue angrenzenden Teile des Wirtsgesteins (z.B. Auflockerungszonen und Schweben) und die Verbindung zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge. Im weiteren Sinn gehören zum Nahfeld die eingelagerten Abfälle, der Versatz und die Strömungsbarrieren, das Schutzfluid und alle weiteren beim Betrieb des Bergwerks eingebrachten Stoffe.

Alle Details dieses konzeptuellen Modells für das Nahfeld sind in den drei Berichten zum Lösungspfad zu finden. Das Modell ist geeignet für eine Umsetzung in den verwendeten Rechenprogrammen. Insbesondere die relativ feine Diskretisierung der Grube in mehr als 120 Segmente ermöglicht eine ausreichend genaue Berechnung der wesentlichen Prozesse, wie

Konvergenz der Grubenbaue, Gasbildung, Lösungs- und Gastransport sowie Tracer- und Radionuklidtransport. Im Folgenden wird auf wesentliche Teilmodelle eingegangen.

Strukturmodell der Grube

Die geometrische Struktur des Grubengebäudes ist sehr komplex, so dass für die numerische Behandlung Vereinfachungen vorgenommen wurden. Abbildung 7.5-1 zeigt den ersten Schritt der Vereinfachung der Grubengebäudestruktur, d.h. eine Blockstruktur, die für die Modellrechnungen noch weiter unterteilt wird. Diese Blockstruktur ist für alle Rechnungen in den drei Berichten zum Lösungspfad gültig, jedoch ist die weitere Unterteilung unterschiedlich. In den Rechnungen zum Referenzfall /ALSA 2005a/, den zugehörigen Unsicherheitsbetrachtungen und den alternativen Szenarien wird das „Strukturmodell D4“ zugrunde gelegt, in der kombinierten Variante /ALSA 2006c/ und in der Unsicherheitsanalyse /USA 2006/ das „Strukturmodell D5“ /Asse-Datenbank/. D4 und D5 unterscheiden sich nur geringfügig, beispielsweise durch die kompaktierbaren Volumina im Grubenhöchsten und in einem Segment oberhalb des Abbaus 6/725(Na2). Das Strukturmodell D5 ist auch die Basis für Rechnungen zum Szenario „Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer (LsgMAW)“, für welche der MAW-Nahbereich detaillierter abgebildet wird.

Ein weiteres Strukturmodell – auf der Basis von D5 – wurde für die Überprüfung von Modellannahmen im Nahbereich der LAW-Einlagerungskammern verwendet, siehe die Darstellung in Kapitel 6.2 und /ALSA 2006d/. Dieses Strukturmodell wurde nur für spezielle Rechnungen verwendet, um eventuelle Konvektionsvorgänge im Nahbereich der LAW-Einlagerungsbereiche (Kapitel 6.4) zu ermitteln sowie um die Strömungsverhältnisse und den Lösungsaustausch in einzelnen Kammern für die Berechnung des chemischen Milieus (Kapitel 6.1) und der Radionuklid-Quellterme (Kapitel 6.2) prognostizieren zu können. Die in diesen Rechnungen verwendete Detaillierung der ELB kann nur für solche Abschätzungen verwendet werden und lässt sich aus numerischen Gründen nicht für die Modellrechnungen zur Fluid- und Schadstoffbewegung im gesamten Grubengebäude einsetzen.

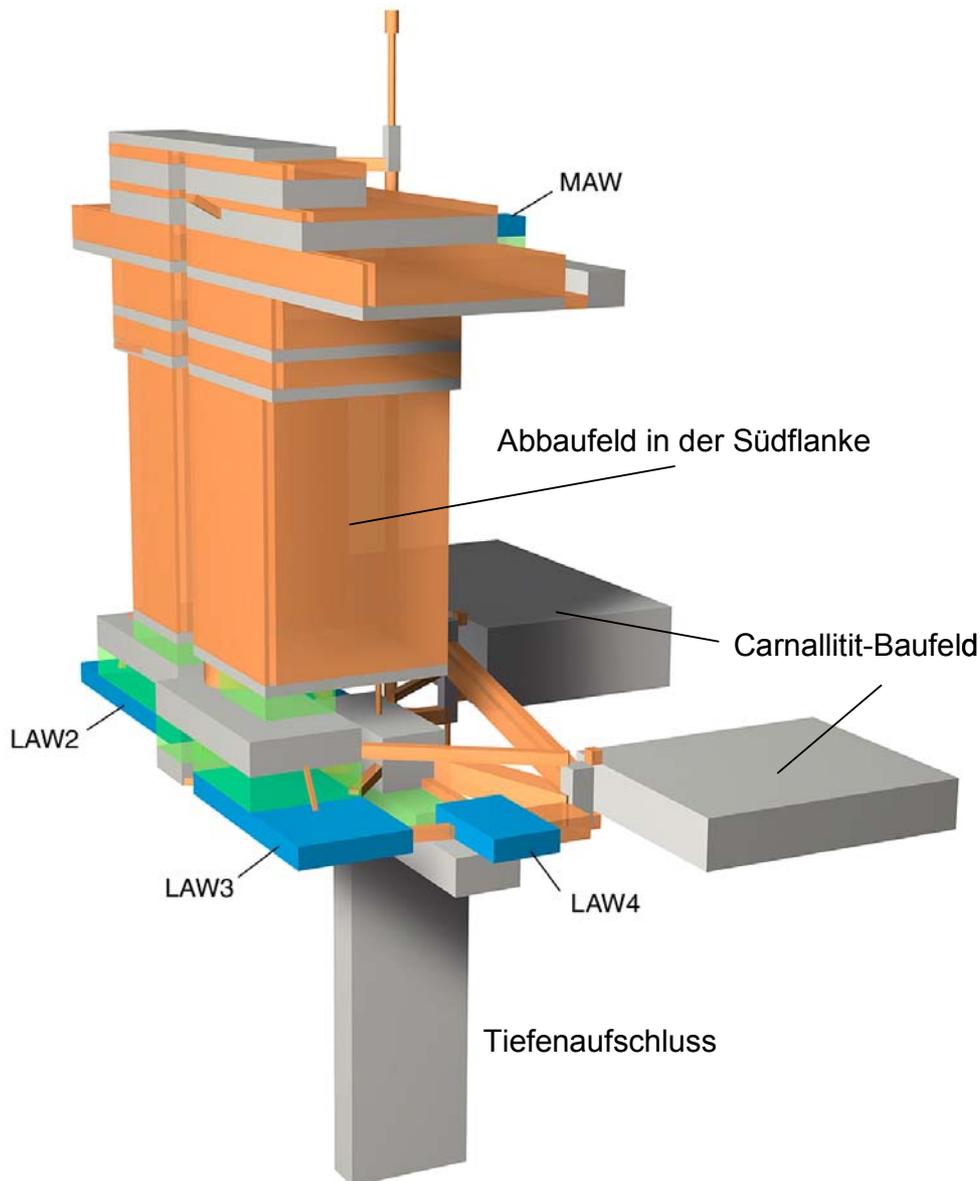


Abb. 7.5-1: Blockbild der Strukturmodelle D4 und D5

Die Details des Strukturmodells D4 sowie die Umsetzungen in den Modellrechnungen werden in /ALSA 2005a/ und in /GRS 2005b/ behandelt. Änderungen der Struktur bezüglich des Strukturmodells D5 werden in /ALSA 2006c/, bzw. /GRS 2006c/ dargestellt. Im Folgenden werden die Vereinfachungen der Strukturmodelle einzeln diskutiert und ihre Berechtigungen begründet.

Für eine genaue Abbildung der Grubengebäudestruktur ist eine große Anzahl von Segmenten erforderlich, aus numerischen Gründen ist aber die Anzahl der Segmente eines Strukturmodells begrenzt. Daher werden Grubenbaue zu einer Einheit zusammengefasst, wenn sie sich physikalisch und chemisch gleich verhalten, beispielsweise Grubenbaue auf der gleichen Sohle im Baufeld in der Südflanke. Andererseits werden aber auch einzelne Grubenbaue in mehrere Segmente aufgeteilt, wenn dies aus programmtechnischen Gründen erforderlich ist, beispielsweise zur genaueren Abbildung von Transportvorgängen im Nahbereich der MAW-Kammer, siehe den Abschnitt weiter unten.

Die Grubenbaue mit den radioaktiven Abfällen werden zu insgesamt sechs Einlagerungsbereichen zusammengefasst. Eine Begründung für die Zusammenfassung zu Einlagerungsbereichen erfolgt in Kapitel 2.1.1.

Der Nahbereich der MAW-Kammer ist im Strukturmodell D4 durch wenige Segmente abgebildet, die die MAW-Kammer 8a/511, die darunter liegende Schwebel S-MAW und die beiden Kammern 8a/532 und 8b/532 repräsentieren. Im Strukturmodell D5 ist dieser Bereich im Zusammenhang mit dem Szenario „Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer“ (LsgMAW) stärker verfeinert, um die Transportvorgänge zwischen der MAW-Kammer und dem Baufeld in der Südflanke realistischer abbilden zu können. Das einfache Modell aus dem Strukturmodell D4 ist für Rechnungen geeignet, in denen angenommen wird, dass es zu keiner Freisetzung von Radionukliden aus der MAW-Kammer kommt, wie beispielsweise in der kombinierten Variante.

Das Baufeld in der Südflanke (vgl. Abbildung 7.5-1) besteht in den Strukturmodellen D4 und D5 jeweils aus einem östlichen und einem westlichen Strang mit äquivalent-porösen Eigenschaften, welche die Kammerreihen K1 bis K4 sowie K5 bis K9 abbilden. Die Aufteilung in zwei Stränge erlaubt eine genauere Abbildung der Strömungspfade von den LAW-Einlagerungsbereichen zu den Austrittsstellen ins Deckgebirge, deren Anbindung an das Baufeld im östlichen Bereich in 500 m Teufe und im westlichen Bereich in 574 m Teufe liegt. Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Abmessungen und Permeabilitäten der Modellsegmente im Baufeld ist in /ALSA 2005a/ im Detail beschrieben und begründet.

In der Hauptströmungsrichtung (vertikal) haben die beiden Stränge jeweils einen großen Querschnitt. Da nicht anzunehmen ist, dass der gesamte Querschnitt von Gas und von der kontaminierten Lösung durchströmt wird, wird zunächst angenommen, dass nur ein Bruchteil der Querschnittsfläche für Gasspeicherung und Gastransport zur Verfügung steht (siehe auch den Abschnitt unten zur Gasspeicherung). Der in den Rechnungen angesetzte Wert von 10 % für den Bruchteil wurde durch Expertenschätzung ermittelt. Für den Radionuklidtransport wird ferner angenommen, dass nur ein Teil des Querschnitts von kontaminierter Lösung durchströmt wird. Der Rest wird nur diffusiv erreicht. Als Referenzwert wird für die durchströmte Querschnittsfläche 40 % angenommen. Dieser Wert wurde durch Expertenschätzung ermittelt. In den Rechnungen hat sich gezeigt, dass diese Kanalisierung einen großen Effekt auf die Freisetzung von Radionukliden haben kann, siehe Kapitel 7.5.5. Daher wird der Parameter außer in den deterministischen Unsicherheitsbetrachtungen auch in den probabilistischen Rechnungen der Unsicherheitsanalyse in einer großen Bandbreite variiert, siehe Kapitel 7.5.6.

Die modellierte Segmentstruktur erlaubt insgesamt eine genügend genaue Abbildung aller Transportvorgänge im Baufeld in der Südflanke bei gleichzeitig aus numerischen Gründen erforderlicher Reduktion der Anzahl der Segmente.

Das Carnallit-Baufeld (siehe Abbildung 7.5-1) erfordert eine besondere Abbildung im Strukturmodell, siehe im Detail /ALSA 2005a/. Die Struktur ergibt sich aus den Anforderungen an das Auspressen von Lösung durch Konvergenz und Gasspeicherung, die Verdünnung von zutretenden Lösungen aus dem Einlagerungsbereich LAW4 und ggfs. aus LAW1, die hydraulischen Widerstände für Lösungsbewegungen im Streichen, eine geringe Gasspeicherung

im Ostteil und die Transportverzögerung für Lösungsinhaltsstoffe aus LAW4 zum Baufeld in der Südflanke. Das Baufeld wird ähnlich wie das Baufeld in der Südflanke in einen Ost- und einen Westteil unterteilt, da die Radionuklide aus LAW4 potenziell im Osten, diejenigen aus LAW1 im Westen in diesen Bereich zutreten können. Die hydraulische Wirksamkeit in horizontaler Richtung wird durch eine kompaktierbare und eine nicht kompaktierbare Modellstrecke abgebildet, die den Ost- und Westteil miteinander verbinden. In vertikaler Richtung wird ein vernachlässigbarer Strömungswiderstand angenommen. Die Modellstruktur erlaubt eine gute Abbildung der Transportvorgänge und der mit der Gasspeicherung verbundenen Vorgänge in diesem Baufeld. Kontrollrechnungen haben gezeigt, dass die Struktur einen großen, die Aufteilung der Volumina auf die einzelnen Modellsegmente aber einen geringen Einfluss auf die Freisetzung von Schadstoffen hat.

Die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere bildet eine Übertrittsstelle für Flüssigkeit und Gas zwischen dem Baufeld in der Südflanke und dem Deckgebirge, siehe Kapitel 2.2.1 und 6.5. Die Übertrittsstelle wird in den Modellrechnungen durch zwei Austrittsstellen-Segmente mit den Bezeichnungen DG500 und DG574 abgebildet. Diese Segmente liegen in Teufen von 500 m, bzw. 574 m, die die obere und untere Grenze des desintegrierten Bereichs darstellen. Die physikalischen Eigenschaften dieser Segmente (und der in KAFKA anschließenden Deckgebirgs-Segmente) bilden – zusammen mit dem Schachtverschluss – die hydraulische Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge. Die Modellrechnungen haben gezeigt, dass diese Schnittstelle großen Einfluss auf die Entwicklung des Lösungsaustritts und damit auch potenziell auf die Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude hat. Ausgehend von Deckgebirgsrechnungen mit NAMMU /COL 2006d/ wurde diese Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge auf ähnliche Weise in den Rechenprogrammen LOPOS und KAFKA umgesetzt /GRS 2006a/, /COL 2006h/.

Die Tagesschächte stellen neben der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere eine potenzielle Wegsamkeit zum Deckgebirge dar. Sie werden durch einen Modellschacht abgebildet, der in mehrere Teilbereiche eingeteilt ist. Im Teufenbereich zwischen 475 m und 425 m befindet sich ein Segment für den Schachtverschluss. Dieser Verschluss ist in den Modellrechnungen mit KAFKA explizit berücksichtigt. Da in den Ergebnissen keine relevanten Ströme über diesen Verschluss auftreten, wurde er in den Modellrechnungen mit LOPOS als undurchlässig abgebildet. In beiden Modellen erfolgt die Freisetzung von Schadstoffen ausschließlich über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere.

Technische Strömungswiderstände, wie Strömungsbarrieren und Stützversatz, bilden in Verbindung mit den sie umgebenden Auflockerungszonen im Gebirge hydraulische Widerstände im Grubengebäude, die den Fluidtransport in Verbindung mit höher durchlässigen Strecken, wie Schotterstrecken, beeinflussen, siehe Kapitel 4.2. Die Widerstände werden durch eine Querschnittsfläche, hydraulisch wirksame Länge und integrale Permeabilität der Modell-Strömungsbarrieren abgebildet. Technische Strömungswiderstände werden je nach Lage in der Grube einzeln als Segmente abgebildet, oder es werden mehrere Strömungswiderstände und ggfs. Auflockerungszonen zu einem Segment zusammengefasst. Bei einer Zusammenfassung werden die hydraulischen Eigenschaften durch effektive Permeabilitäten und effektive geometrische Abmessungen abgebildet.

Radionuklidinventar

In den Modellrechnungen wird das für den Zeitpunkt 01.01.2005 ermittelte Radionuklidinventar /GSF 2002a/ verwendet, siehe auch Kapitel 2.1.2. Der radioaktive Zerfall wird ab diesem Zeitpunkt in allen Modellrechnungen berücksichtigt. Die NuklidAuswahl erfolgte unter dem Aspekt der Radiotoxizität des eingelagerten Inventars, bzw. der Relevanz bezüglich einer potenziellen Strahlenexposition. Für das Inventar wurde keine Bandbreite ermittelt, d.h. es wird in allen, auch in den probabilistischen Rechnungen, ein fester, abdeckender Wert für das Eingangsinventar verwendet. Dadurch können die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen überschätzt sein. Dies betrifft insbesondere solche Radionuklide, deren aktuelle Konzentration durch den Quellterm in den Einlagerungsbereichen nicht begrenzt ist, beispielsweise Am-241 in einigen Einlagerungsbereichen.

In einigen Rechnungen werden Tracer anstelle von Radionukliden zur Untersuchung des Transports verwendet. Diese Tracer repräsentieren entweder eine in jedem Einlagerungsbereich feste Menge, oder eine feste Konzentration. Sie erlauben damit u.A. die Untersuchung von Konzentrationsgradienten in der Grube und die Ermittlung von relativen Freisetzungen aus jedem Einlagerungsbereich bis in die Exfiltrationsgebiete des Deckgebirges, unabhängig von Effekten des radioaktiven Zerfalls.

Kontur- und Porenvolumina

Alle Volumina der Grubenbaue wurden auf den Stichtag 29.05.2009, den zeitlichen Nullpunkt der Modellrechnungen, extrapoliert und in kompaktierbare, nicht kompaktierbare und unverfüllte Volumina aufgeteilt. In den Modellrechnungen werden alle Modellsegmente als quaderförmige Körper oder als Körper mit fester Länge und beliebiger Querschnittsform abgebildet. Diese Segmente haben jeweils eine feste Länge, einen durch Konvergenz ggfs. veränderlichen Querschnitt, ein vorgegebenes geometrisches Anfangsvolumen und eine Anfangsporosität. Die Abmessungen (strömungswirksamer Querschnitt, hydraulisch wirksame Länge, etc.) sowie die Permeabilitäten und Porositäten werden dabei bei Bedarf den realen Verhältnissen in angemessener Weise angepasst, beispielsweise wenn die Modellsegmente eine Zusammenfassung von Grubengebäudeteilen mit unterschiedlichen Eigenschaften darstellen. Das bedeutet als Beispiel, dass für ein Modellsegment, das zwei parallele Grubenbaue mit unterschiedlicher Länge und gleichem Querschnitt repräsentiert, eine effektive Permeabilität und eine effektive Länge ermittelt werden, so dass der Gesamtströmungswiderstand und das verdünnungswirksame Volumen erhalten bleiben. Hinsichtlich der transportwirksamen Länge wurde – konservativ – das Minimum der Längen der Teilsegmente verwendet.

Einleiten des Schutzfluids

Das Einleiten des Schutzfluids wird gemäß den Vorgaben des Schließungskonzepts modelliert, siehe Kapitel 4.2.1. Das Einleitregime ist ein wichtiger Effekt, weil beispielsweise bei einer längeren Unterbrechung der Flutung die Konvergenz einzelner Grubenbereiche ohne nennenswerten hydraulischen Gegendruck abläuft und dadurch andere Strömungsmuster in der Grube entstehen sowie die Freisetzung von Radionukliden beeinflusst werden können.

Im Grubenhöchsten werden einzelne Grubenbaue nicht gezielt gefüllt, so dass diese erst nach Abschluss des Einleitens durch Strömungsvorgänge in der Grube mit Schutzfluid gefüllt werden.

Geomechanische Prozesse

Durch die Verformung des Salzgesteins (Konvergenz) werden die Resthohlräume der Grube im Lauf der Zeit verkleinert. Dadurch wird das eingeschlossene Schutzfluid ausgepresst.

Die Konvergenzraten wurden mit gebirgsmechanischen Modellrechnungen für eine vereinfachte Grubengebäudestruktur ermittelt /IfG 2006b/, siehe auch Kapitel 6.5. Die vereinfachte Grubengebäudestruktur enthält jeweils mindestens ein Segment pro Sohle, so dass sie der in den Transportprogrammen modellierten Struktur in groben Zügen entspricht. Daher können die Konvergenzraten in diese Transportprogramme übernommen werden. Durch spezielle gebirgsmechanische Vergleichsrechnungen wurden die Güte der Anpassungen überprüft und der Einfluss von Unsicherheiten in der Abbildung des Konvergenzverhaltens auf den Schadstofftransport untersucht, siehe auch die Unsicherheitsbetrachtungen in Kapitel 7.5.5. In einer weiteren gebirgsmechanischen Rechnung wurden Konvergenzraten berechnet unter Berücksichtigung eines aufgeprägten hydrostatischen Außendrucks an der Übertrittsstelle zum Deckgebirge. Dieser Außendruck war aus LOPOS-Rechnungen vorgegeben worden. Es zeigte sich, dass beide gebirgsmechanisch ermittelten Konvergenzverläufe (ohne und mit aufgeprägtem Außendruck) jeweils mit den gleichen Konvergenzparametern in den Transportprogrammen wiedergegeben werden können.

Mobilisierung der Radionuklide und Quellterm

Für alle Einlagerungsbereiche wurden maximal mögliche Elementkonzentrationen bestimmt, siehe Kapitel 6.2 und /GRS 2006c/. Bei den meisten Elementen kann das gesamte Inventar gelöst werden („inventarbestimmte Quellterme“), bei einigen Elementen – vor allem den Actiniden – ist die maximal mögliche Elementkonzentration jedoch durch Löslichkeiten und Sorptionseffekte begrenzt, so dass in einigen Einlagerungsbereichen ein großer Teil des Inventars einiger Radionuklide nicht in Lösung geht.

Im Modell wird das aus den Abfallmatrizes mobilisierte und potenziell verfügbare Inventar formal in zwei Teile geteilt: das gelöste, für einen Transport zur Verfügung stehende und das ausgefällte, zurückgehaltene Inventar. In den Modellrechnungen hat sich gezeigt, dass der Quellterm, der das gelöste Inventar bestimmt, einen großen Einfluss auf die Freisetzung der Radionuklide aus der Grube hat, da die potenzielle Strahlenexposition von den zumeist stark zurückgehaltenen Actiniden dominiert wird, siehe Kapitel 7.5.3 und 7.5.5. Der Absicherung des Quellterms und den Rechnungen mit variiertem Quellterm kommt daher eine große Bedeutung zu.

Gasbildung

Die Gasbildungsraten und die insgesamt gebildeten Gasmengen wurden anhand von standortspezifischen Daten ermittelt und sind im Bericht /IST 2005b/ dokumentiert. Als Normalfall wird dabei eine „realistische“ Gasbildung zugrunde gelegt, in der Variante „mit hoher Gasbildung“ eine Gasbildung unter der Annahme der vollständigen Umsetzung des organischen Materials mit maximal möglicher CO₂-Bildung, siehe Kapitel 6.3. Die Daten aus diesem Bericht werden durch geeignete Parametrisierung in die Transportprogramme übernommen. Dabei werden die Gasbildung durch Korrosion und die Gasbildung durch mikrobiellen Abbau mit zeitlich abnehmenden Raten beschrieben.

Für die MAW-Kammer wird im Referenzfall angenommen, dass die Abfälle trocken bleiben und dass die Gasbildung unter diesen trockenen Bedingungen deutlich geringer ist als unter feuchten Bedingungen zu erwarten wäre. Für das Szenario LsgMAW, bei dem ein Lösungszutritt in die MAW-Kammer unterstellt wird, wird die Gasbildung für feuchte Bedingungen abgebildet.

Gasspeicherung und Gasabfluss

Jedes poröse Medium kann mindestens entsprechend der residualen Gassättigung Gas speichern, wobei das Gas im Prinzip gleichmäßig über das Volumen des Segments verteilt ist. Bei den Segmenten mit großer Grundfläche (Annahme – durch Expertenschätzung – in den Modellrechnungen: > 100 m²) wird angenommen, dass nur ein Bruchteil des potenziellen Gasspeichervolumens auch wirklich von Gas erreicht wird, weil der Aufstieg des Gases – dies zeigt die Erfahrung – in diesen großen Kammern kanalisiert erfolgt. Dies gilt beispielsweise für die großen Grubenbaue im Baufeld in der Südflanke.

Gas kann auch in der Firste eines Grubenbaus gespeichert werden, wenn die Firstrauhigkeit entsprechend groß ist, oder wenn die für das Gas zur Verfügung stehende Abflussmöglichkeit unterhalb der Teufe der Firste liegt. Außerdem kann Gas in Zwickelhohlräumen der Abfallgebinde und in den Gebinden gespeichert werden. Aus all diesen Gasspeicherräumen werden initiale Gasspeichervolumina für jeden Grubenbau ermittelt.

Aus den initialen Gasspeichervolumina werden mit Hilfe der Zweiphasenrechnungen von KAFKA effektive Gasspeichervolumina berechnet, siehe Kapitel 7.5.3. Diese effektiven Gasspeichervolumina ergeben sich unter Berücksichtigung des Gaseindringdrucks in angrenzende Segmente und sind zeitlich veränderlich. Insbesondere zu frühen Zeiten können bei großen Gasbildungsraten temporär große Gasvolumina in einem Segment gespeichert werden. Nach Überschreiten des Gaseindringdrucks können die Gase jeweils in benachbarte Bereiche gelangen und sich in der gesamten Grube ausbreiten. In Kapitel 7.5.3 ist dargestellt (Abbildung 7.5-2), welcher Ausbreitungspfad sich im Referenzfall einstellt. Die mit KAFKA ermittelten maximalen Gasspeichervolumina werden in LOPOS übernommen und als prozentuale Anteile des Porenvolumens angegeben.

Konvektion im Nahbereich der LAW-Kammern

Durch die Auflösung der zementhaltigen Abfallgebinde wird es in den LAW-Einlagerungskammern zu einer Reduktion der Dichte des Schutzfluids kommen. Dieser Effekt wurde in /ALSA 2006d/ untersucht, siehe auch Kapitel 6.4, und eine mögliche Konvektion zwischen der 750-m-Sohle und der 725-m-Sohle abgeschätzt. Als Ergebnis werden in den Modellrechnungen für die Verbindungen oberhalb der Einlagerungsbereiche LAW2 und LAW3 erhöhte Diffusionskoeffizienten angesetzt. In den Rechnungen /ALSA 2006c/ und /USA 2006/ wird zusätzlich eine Konvektion zwischen dem Einlagerungsbereich LAW4 und dem Carnallitbaufeld durch einen erhöhten Diffusionskoeffizienten berücksichtigt. Obwohl zwischen der 725-m-Sohle und der 700-m-Sohle keine Entstehung von konvektiven Lösungsbewegungen mit relevantem Einfluss auf den Schadstofftransport zu erwarten sind, werden in den probabilistischen Modellrechnungen als ungünstige Annahme dennoch erhöhte Diffusionskoeffizienten für die Wegsamkeiten zwischen den Abbauen auf der 725-m-Sohle im Jüngeren Steinsalz und dem Baufeld in der Südflanke angesetzt, siehe /USA 2006/.

Transportprozesse

Als Transportprozesse für Radionuklide in der Grube werden Advektion, Dispersion und Diffusion berücksichtigt. In der Anfangsphase ist Advektion der dominierende Prozess, weil die Auspressung der kontaminierten Flüssigkeit durch Konvergenz und Gasbildung groß ist. Zu späten Zeiten, wenn die Gasspeichereffekte aufhören und die Konvergenzrate stark abgenommen hat, wird die Diffusion bedeutsam. Die Diffusion bewirkt dann einen allmählichen Konzentrationsausgleich über die gesamte Teufe von den Einlagerungsbereichen bis zum Grubenhöchsten. Die Dispersion wird durch die Dispersionslänge charakterisiert. Der Wert der Dispersionslänge wurde für ein poröses Medium mit Bezug auf die typischen Abmessungen der Segmente im Strukturmodell abgeschätzt und hat einen konstanten Wert. Da die Abmessungen der Segmente sehr unterschiedlich sind, wird die Dispersion in einigen Segmenten unterschätzt, in anderen Segmenten überschätzt. Wegen der relativ geringen Relevanz der Dispersion für die gesamte Freisetzung sind diese Ungenauigkeiten akzeptabel. Alle Transportprozesse werden in den Transportprogrammen in entsprechende numerische Modelle umgesetzt.

Lösungszutritt in das Grubengebäude und hydraulische Randbedingung

Solange der Fluiddruck in der Grube kleiner ist als der hydraulische Druck im Deckgebirge, ist ein Lösungszufluss aus dem Deckgebirge möglich. Die Randbedingung zur Berechnung des Fluiddrucks an der Übertrittsstelle in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere wird dabei auf zwei unterschiedliche Arten berücksichtigt. Im Referenzfall und in den weiteren Rechnungen zu /ALSA 2005a/ wurden die hydrostatischen Bedingungen im Deckgebirge und die hydraulische Drossel im Rötanhydrit in 350 m Teufe berücksichtigt. Die Modellparameter wurden dabei so festgelegt, dass das Modell bei Atmosphärendruck im Grubengebäude und der Viskosität von NaCl-gesättigter Deckgebirgslösung die beobachtete mittlere Zutrittsrate von 12,5 m³ pro Tag wiedergibt. Im Modell wird die Änderung des Strömungswiderstands im Deckgebirge durch das aus der Grube eindringende, höher viskose Schutzfluid in

LOPOS durch einen linearen, in KAFKA durch einen sprunghaften Anstieg berücksichtigt. In den Rechnungen zu /ALSA 2006c/ wird ein neues Modell für die Schnittstelle verwendet, das auf NAMMU-Rechnungen für die Strömungsmodellierung im Deckgebirge basiert, siehe Kapitel 6.5. Aus den NAMMU-Rechnungen wird der hydraulische Widerstand durch eine funktionale Abhängigkeit zwischen Lösungsdruck an der Übertrittsstelle und Auspressrate ermittelt und näherungsweise parametrisiert /ALSA 2006c/. Diese neue Randbedingung wird in den beiden Transportprogrammen vergleichbar modelliert.

Modellunsicherheiten

Unsicherheiten in den konzeptuellen Modellen werden soweit wie möglich als Datenunsicherheiten behandelt und als solche in den Unsicherheitsbetrachtungen (Kapitel 7.5.5) und in der probabilistischen Unsicherheitsanalyse (Kapitel 7.5.7) berücksichtigt. Beispiele hierfür sind Variationen der Durchlässigkeiten von Auflockerungszonen und Schweben, mit denen das beschränkte Wissen über die hydraulischen Eigenschaften dieser Bereiche berücksichtigt wird. Einige Modellunsicherheiten, beispielsweise für die Randbedingung für den Strömungswiderstand im Deckgebirge, die mit den Transferfunktionen zur Beschreibung des Radionuklidtransports im Deckgebirge korreliert ist, werden zwar nicht durch Datenunsicherheiten beschrieben, lassen sich aber dennoch probabilistisch behandeln. In diesem Fall wird für jeden Deckgebirgsrechenfall ein Satz von Strömungswiderständen ermittelt, der in einer probabilistischen Rechnung über eine Zufallsgröße ausgewählt werden kann. Diese Vorgehensweise deckt die Bandbreite der vorhandenen Information bezüglich der Strömungswiderstände im Deckgebirge ausreichend ab.

Eine Tabelle mit den in deterministischen Rechnungen untersuchten Unsicherheiten ist in Kapitel 7.5.5 angegeben. Bei den probabilistischen Rechnungen /USA 2006/ wurde angestrebt, alle bekannten Unsicherheiten, soweit sie über Datenunsicherheiten abzubilden sind, zu berücksichtigen. Einige Modellunsicherheiten (Teufe der oberen Grenze der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere; Anzahl der Austrittsstellen, welche den desintegrierten Bereich repräsentieren; Auswahl des MAW-Szenarios: trocken oder feucht; Strömungswiderstand im Deckgebirge) werden, wie vorhergehend erwähnt, über „Schalter“ berücksichtigt, mit denen keine Verteilungsfunktion für einen Parameter, sondern jeweils ein ganzer Datensatz ausgewählt werden kann.

Modellunterschiede in den Rechenprogrammen

In den beiden Rechenprogrammen für die Transportrechnungen werden einige Effekte unterschiedlich modelliert. Das berechnete Ergebnis – in den Transportrechnungen vor allem die potenzielle Strahlenexposition – ist bezüglich dieser Modellunterschiede unsicher, d.h. würde die potenzielle Strahlenexposition statt mit LOPOS-Modellen mit KAFKA-Modellen berechnet, ergäben sich andere Werte. Diese Unsicherheiten können bei der Berechnung der potenziellen Strahlenexpositionen nicht explizit abgebildet werden. Zur Untersuchung der Bedeutung dieser Unsicherheiten wurden jedoch Rechengrößen, die in beiden Programmen zur Verfügung stehen, miteinander verglichen, beispielsweise die Lösungsflüsse aus der Grube, die Druckentwicklungen an ausgewählten Stellen in der Grube oder die in das Deckgebirge freigesetzten Tracerflüsse.

Im Folgenden sind die wesentlichen Modellunterschiede kurz angesprochen:

- In den Modellsegmenten von KAFKA können Porositäten und Volumina für kompaktierbare und nicht kompaktierbare Bereiche getrennt angegeben werden. In LOPOS werden gemittelte Porositäten verwendet.
- Die mit den gebirgsmechanischen Modellrechnungen ermittelten Konvergenzraten werden in den Modellrechnungen mit KAFKA durch eine geeignete Parametrisierung übernommen. Diese stützt sich entsprechend den Ergebnissen der geomechanischen Modellrechnungen sohlenspezifisch auf eine Trockenkonvergenzrate und nach Fluidkontakt auf eine veränderliche Konvergenzrate, deren Abhängigkeit vom Fluiddruck und von der Porosität des kompaktierbaren Materials durch geeignete funktionale Beziehungen beschrieben wird, siehe /COL 2006h/. In den Modellrechnungen mit LOPOS erfolgt die Anpassung durch Berücksichtigung mehrerer zeitabhängiger und lokaler Konvergenzparameter, siehe /GRS 2006a/. Die mit KAFKA und LOPOS berechneten Volumenänderungen des gesamten Grubengebäudes und die während der Modellrechnungen auftretenden Drücke sind geringfügig unterschiedlich. Diese Unterschiede sind in einem vertretbaren Rahmen, so dass die Anwendung beider Konvergenzmodelle gerechtfertigt ist, vergleiche die Ergebnisdiskussionen in Kapitel 7.5.3.
- In beiden Transportprogrammen wird die Gasbildung durch Korrosion und mikrobiellen Abbau durch eine Summe von Reaktionen erster Ordnung beschrieben, d.h. mit exponentiell abnehmenden Raten. Dabei führt eine unterschiedliche Anzahl von Freiheitsgraden in den Modellen der beiden Programme zu geringfügig abweichenden Gasbildungsraten. Es zeigen sich aber in den Modellrechnungen nur vernachlässigbare Unterschiede in den Zeitpunkten des Auffüllens der einzelnen Gasspeicher, so dass die Unterschiede in der Modellierung, auch wegen der unterschiedlichen Modellierung des Gastransports in den beiden Programmen, nicht relevant sind.
- In LOPOS ist keine direkte Berechnung der Gasausbreitung, d.h. keine Berechnung eines Gasstroms zwischen Nachbarsegmenten, implementiert. Stattdessen werden die Ergebnisse aus den KAFKA-Rechnungen über geeignete Modelle umgesetzt. Diese Modelle erlauben den Weitertransport in bestimmte, vorzugebende Zielsegmente. In jedem Segment wird das aktuelle Gasvolumen entsprechend der Gasbildungsrate, dem Fluiddruck und dem Gastransport berechnet. Dabei wird der Gastransport als Gasstrom modelliert, der ohne Strömungswiderstand in das vorgegebene Zielsegment gelangt. Auf diese Weise ergeben sich die Auswirkungen der Gasbildung analog zu der Zweiphasenrechnung. Die Übereinstimmung der Rechenergebnisse mit KAFKA und LOPOS ist dadurch gut.
- Solange der Fluiddruck im Inneren der Grube kleiner ist als der hydraulische Druck im Deckgebirge, ist ein Lösungszufluss aus dem Deckgebirge möglich. Dieser Zufluss wird in KAFKA abgebildet, in LOPOS nicht. Die hierdurch auftretenden Unterschiede bei den Modellrechnungen mit den beiden Programmen bezüglich der Zeitpunkte der vollständigen Füllung der Grube und des Druckgleichgewichts mit dem Deckgebirge sind gering, treten nur kurzzeitig auf und sind auch im Vergleich zu den Unterschieden, die sich aus der unterschiedlichen Konvergenzmodellierung ergeben, gering und daher akzeptabel.

7.5.1.2 Deckgebirge

Das konzeptuelle Modell für das Deckgebirge in den Modellrechnungen zur Tracer- und Radionuklidausbreitung über den Lösungspfad hat sich im Verlauf der Projektbearbeitung geändert. In den Rechnungen zu /ALSA 2005a/ besteht dieses Modell im Wesentlichen aus der Berücksichtigung einer instantanen Verdünnung und einer hydraulischen Randbedingung für das Nahfeldmodell, siehe Kapitel 6.8.

In den aktuellen Rechnungen zu /ALSA 2006c/ wird der Transport im Deckgebirge mit Hilfe von Transferfunktionen berechnet, siehe Kapitel 6.8 und /TRA 2006/. Zu deren Ermittlung wird mit dem hydrogeologischen Deckgebirgsmodell die Ausbreitung von Tracern berechnet, welche während begrenzten Zeitintervallen vom Grubengebäude in das Deckgebirge über-treten. Der zeitliche Verlauf der berechneten Tracerkonzentration in oberflächennahen Wäs-tern, normiert mit der Tracerkonzentration im Übertritt aus dem Grubengebäude, entspricht der Transferfunktion für das entsprechende Exfiltrationsgebiet und das entsprechende Zeitin-tervall des Tracerübertritts aus der Grube. Aus diesen Transferfunktionen für Tracer wird unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls der Transport aller Radionuklide durch das Deckgebirge berechnet. Eine Verzögerung des Transports durch Sorption wird dabei nicht berücksichtigt.

In dem Modell wird angenommen, dass die Schadstoffströme aus den beiden Austrittsstellen der Grube im Rötanhydrit des Deckgebirges zusammenkommen und gemäß den jeweiligen Flüssigkeitsströmen dort zu einer mittleren Konzentration führen. Aus dieser Eingangskon-zentration wird mit Hilfe der Transferfunktionen eine Schadstoffkonzentration in jedem Exfil-trationsgebiet berechnet. Bei dieser Berechnung wird eine Verdünnung im Exfiltrationsgebiet berücksichtigt, so dass das entnommene Wasser einen maximalen NaCl-Gehalt von 1 g/l aufweist. Dieser Wert ist konservativ, da nach der Trinkwasserverordnung die maximale Konzentration noch einen Faktor 2 kleiner sein müsste.

Modellunsicherheiten werden in den Modellrechnungen zum Radionuklidtransport bezüglich der Verdünnung auf Trinkwasserqualität und bezüglich der Transferfunktionen berücksichtigt. Die Unsicherheiten der Transferfunktionen lassen sich nicht auf eine Datenunsicherheit zu-rückführen, d.h. es lassen sich keine Bandbreiten für die Parameter in den Transferfunktio-nen angeben. Stattdessen werden für mehrere Deckgebirgsrechenfälle Sätze von Transfer-funktionen ermittelt, woraus sich in einer probabilistischen Rechnung über eine Zufallsgröße jeweils ein Satz ziehen lässt.

7.5.1.3 Biosphäre

In Kapitel 2.7 ist die Situation am Standort Asse bezüglich der Biosphäre beschrieben. Das daraus abgeleitete und in den Rechnungen verwendete, konzeptuelle Modell für die Bio-sphäre ist standortspezifisch in Anlehnung an die Allgemeine Verwaltungsvorschrift (AVV) zur Strahlenschutzverordnung /StrlSchV 2002/ entwickelt worden und wird in /GSF 2006i/ beschrieben, siehe auch die Darstellungen und Begründungen in Kapitel 6.9. In Ergänzung zur aktuell noch gültigen AVV, die verknüpft ist mit der StrlSchV aus dem Jahr 1990, wurden aktuelle Ergebnisse der Untersuchungen über den Radionuklidtransfer zwischen den ver-schiedenen Kompartimenten, z.B. Boden-Pflanze, Futter-Milch, Wasser-Fisch, berücksich-

tigt. Die potenziellen Strahlenexpositionen wurden in Anlehnung an die novellierte, aber noch nicht veröffentlichte AVV berechnet /BfS 2005/, siehe die Beschreibung in /GSF 2006i/. Das dort beschriebene Rechenverfahren ist für mehrere Standorte sowie in internationalen Vergleichen verwendet worden und stellt den Stand der Wissenschaft dar.

Die Strahlenexposition, die sich über alle Transportpfade in der Biosphäre zusammenfassend ergibt, wird durch so genannte normierte Dosiskonversionsfaktoren aus den Radionuklidkonzentrationen in einem Exfiltrationsgebiet berechnet /GSF 2006i/. Es werden dabei die heutigen Standortbedingungen berücksichtigt, wobei die Annahme zugrunde liegt, dass zukünftigen Generationen keine höheren Belastungen zugemutet werden dürfen als solche, die man heute bereit ist zu akzeptieren. In den Rechnungen zur Ausbreitung über den Lösungspfad wird die potenzielle Strahlenexposition für die Personengruppe der Erwachsenen betrachtet, siehe Kapitel 6.9.

Modellunsicherheiten bezüglich der Biosphäre werden bei den deterministischen Transportrechnungen /ALSA 2005a/ und /ALSA 2006c/ sowie in den probabilistischen Rechnungen /USA 2006/ nicht berücksichtigt, d.h. die verwendeten Dosiskonversionsfaktoren sind konstant. In dem Bericht /GSF 2006i/ zur Biosphärenmodellierung wird jedoch auf Unsicherheiten eingegangen, die beispielsweise von Klimaänderungen verursacht werden, siehe Kapitel 6.9.

7.5.2 Berechnungsmodelle

Zur Anwendung der konzeptuellen Modelle in den Computercodes für die Modellrechnungen werden mathematische Modelle verwendet. Im Folgenden wird nicht auf alle Modelle eingegangen, sondern es werden diejenigen Berechnungsmodelle behandelt, die sich bei den Modellrechnungen als sensitiv für die Radionuklid Ausbreitung herausgestellt haben. Sie sind ausführlich in /ALSA 2005a/ und ergänzend in /ALSA 2006c/ beschrieben.

Nahfeld

Die Modellrechnungen zum Lösungs-, Gas- und Schadstofftransport werden mit den Rechenprogrammen KAFKA und LOPOS durchgeführt. Diese beiden Programme wurden ausgewählt, weil sie die erforderlichen numerischen Methoden zur gleichzeitigen Berechnung der Lösungs- und Gasausbreitung (KAFKA) und zur Berechnung der Radionuklid Ausbreitung in der Grube (LOPOS) zur Verfügung stellen. Entsprechend den Asse-spezifischen Anforderungen werden die wesentlichen transportrelevanten Eigenschaften und Prozesse, wie Strömungswiderstände, Fluiddrücke, Gebirgskonvergenz, Gasspeicherung, usw. in beiden Programmen berücksichtigt. Beide Programme sind allgemein und bezüglich der speziellen Modelle in den Modellrechnungen für den Standort Asse verifiziert, siehe /COL 2006h/, /GRS 1999b/ und /GRS 2006a/.

Es wurden zwei Rechenprogramme eingesetzt, damit die Stärken der beiden Programme genutzt werden können: eine Stärke von KAFKA ist beispielsweise die Berücksichtigung des Zweiphasen-Flusses, eine Stärke von LOPOS die Berechnung des Radionuklidtransports

unter Berücksichtigung von Mobilisierung und Rückhalteeffekten. Da beide Programme eine Vielzahl von ähnlichen Ausgabegrößen berechnen, ist durch die Verwendung von zwei Programmen gleichzeitig eine Verifizierung und Kontrolle der durchgeführten Rechnungen möglich, siehe Kapitel 7.5.1.1. In den Dokumentationen der Modellrechnungen für den Standort Asse II werden wegen der Übersichtlichkeit im Allgemeinen nur die Ergebnisse jeweils eines Programms dargestellt, beispielsweise werden Lösungsströme und Tracertransport als KAFKA-Ergebnisse und der Radionuklidtransport als LOPOS-Ergebnisse dargestellt.

Das Programm LOPOS /GRS 1999b/ wurde zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden entwickelt. Es wurde in mehreren nationalen und internationalen Projekten eingesetzt und mit anderen Rechencodes verglichen. Die verwendeten Modelle und Rechenverfahren sind damit qualifiziert. Die notwendigen Anpassungen an den implementierten Modellen für die standortspezifischen Gegebenheiten wurden qualitätsgesichert und sind in dem Bericht /GRS 2006a/ dokumentiert.

Das Programm KAFKA /COL 2006h/ wurde für den gleichen Einsatzzweck entwickelt und berücksichtigt insbesondere die gleichzeitige Ausbreitung einer flüssigen und gasförmigen Phase. Es wurde mit anderen Rechencodes verglichen und dadurch qualifiziert. Die notwendigen Anpassungen an den implementierten Modellen für die standortspezifischen Gegebenheiten wurden qualitätsgesichert und sind in den Berichten /ALSA 2005a/ und /ALSA 2006c/ dokumentiert.

Im Folgenden werden die wesentlichen Berechnungsmodelle im Detail kurz angesprochen und bewertet. Für die Details der Modelle siehe die ALSA-C-Berichte.

- Radionuklid-Quellterm

Die Mobilisierung der Radionuklide aus der Abfallmatrix und den Behältern wird mit einer linearen Rate modelliert, deren Wert von der Abfallmatrix (zementiert oder bituminiert) und dem Gebindetyp (Fass oder Fass mit Verlorener Betonabschirmung) abhängt. In diesem einfachen Ansatz werden die aus den geochemischen Modellrechnungen /INE 2006a/ abgeleiteten maximalen Zeiten der Verfügbarkeit des jeweiligen Inventars berücksichtigt. Die mit diesem Ansatz berechneten, verfügbaren Inventare werden für jeden Einlagerungsbereich unter Berücksichtigung von maximal möglichen Elementkonzentrationen in gelöste Anteile und die Anteile in Festphase aufgeteilt. Bei inventarbestimmten Radionukliden ist immer das gesamte Inventar für den Transport verfügbar, bei nicht inventarbestimmten Radionukliden können die maximal möglichen Elementkonzentrationen das für den Transport verfügbare Inventar begrenzen. Ein Zeitpunkt der Änderung des geochemischen Milieus kann berücksichtigt werden, womit ein Wechsel der maximal möglichen Elementkonzentrationen in jedem Einlagerungsbereich abgebildet werden kann, vgl. Kapitel 6.2.

Die Modellierung des Radionuklid-Quellterms entspricht damit den aus den geochemischen Modellrechnungen abgeleiteten Vorgaben.

- Konvergenz

Die Modellierung der Konvergenz wird im Detail in den jeweiligen Programmdokumentationen beschrieben. Für beide Rechenprogramme wurden die Parameter des Konvergenzansatzes so ermittelt, dass die mit gebirgsmechanischen Rechnungen ermittelten Konvergenzraten (siehe Kapitel 6.5) unter den dort angenommenen Randbedingungen (Geometrie, Druck) gut wiedergegeben werden. Da während einer Modellrechnung andere Randbedingungen gelten, führen Modellunterschiede in den beiden Rechenprogrammen zu abweichenden Ergebnissen. Diese wurden im Rahmen von Parametervariationen untersucht, wobei sich zeigte, dass die Abweichungen toleriert werden können.

- Einleiten des Schutzfluids

Für das Einleiten von Schutzfluid werden in KAFKA und LOPOS zwei unterschiedliche Modelle verwendet, die die Einleitung jeweils gut beschreiben (siehe die jeweilige Programmdokumentation). Das Ende der Schutzfluideinleitung wird in KAFKA- und LOPOS-Rechnungen zum nahezu gleichen Zeitpunkt erreicht, so dass beide Modellierungen als gleichwertig anzusehen sind.

- Schnittstelle zum Deckgebirge (Strömungswiderstand als Randbedingung)

Die hydraulische Verbindung von der Grube entlang der Tagesschächte zum Deckgebirge wurde nur im Modell von KAFKA abgebildet; als Resultat aus den Ergebnissen von KAFKA wird diese Verbindung in LOPOS als undurchlässig angenommen.

Die wesentliche hydraulische Verbindung zum Deckgebirge ist an der Übertrittsstelle in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere zwischen etwa 500 m und 574 m Teufe. Zur Abbildung dieser Übertrittsstelle werden in den Rechenprogrammen in unterschiedlicher Weise geeignete Schnittstellensegmente verwendet, die der Modellierung des Transports im Deckgebirge angepasst werden.

- Transport von Flüssigkeit und Gas

Dieser Transport wird in KAFKA im Sinne eines Zweiphasen-Flusses berechnet, in LOPOS wird nur der Flüssigkeitstransport explizit gerechnet, für Gase werden die Auswirkungen der Auffüllung von Gasspeichern und Gaspolstern berücksichtigt, wobei der Gasfluss vorgegebenen Wegen folgt. Die diesen Transportprozessen zugrunde liegenden Modelle sind Stand von Wissenschaft und Technik und werden in den entsprechenden Programmdokumentationen beschrieben.

Die Permeabilitäts-Sättigungs-Beziehungen in KAFKA werden gemäß den Zusammenhängen von /BRO 1964/ angesetzt. Der sättigungsabhängige Kapillardruck, d.h. der Unterschied des Druckes in Lösung und in der Gasphase, wird vernachlässigt. Es wird jedoch vereinfachend berücksichtigt, dass Gas nur bei einem Druck oberhalb des Gaseindringdruckes in lösungsgesättigte Bereiche eindringen kann (vgl. /COL 2006h/).

Im KAFKA-Modell müssen die Gaseindringdrücke an der Phasengrenze erfüllt sein, damit Gas aus einer Kammer austreten kann. Im LOPOS-Modell verlässt das Gas eine

Kammer widerstandsfrei, wenn das gesamte dem Gas zur Verfügung stehende Volumen mit Gas gefüllt ist. Dieses Volumen ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der KAFKA-Rechnungen und wird von dort als Eingangsparameter übernommen. Die Gaspolster in der gesamten Grube werden in den KAFKA- und LOPOS-Rechnungen etwa zu gleichen Zeiten aufgefüllt.

Die Auswirkungen der Gasbildung und des Gastransports auf den Schadstofftransport sind in den beiden Programmen nicht immer gleich. So können in KAFKA Gaspolster den Abtransport von Lösung behindern und sich wieder leeren, in LOPOS nicht. Dieser Unterschied existiert nur für Einlagerungsbereiche und ist hauptsächlich für den Einlagerungsbereich LAW1B relevant, in dem sich ggf. ein großes Gaspolster ausbilden kann. Die Auswirkungen dieses Effektes auf den Transport von Schadstoffen aus einem ELB haben sich als wenig relevant herausgestellt.

In KAFKA können unterschiedliche Dichten der Lösungen im Deckgebirge und im Grubengebäude berücksichtigt werden. Der Einfluss dieser Modellierung auf den berechneten Schadstofftransport ist gering /ALSA 2005a/.

- Transport von Schadstoffen

Bei der Berechnung des Schadstofftransports werden Advektion, Diffusion und Dispersion berücksichtigt. Diese Prozesse sind in den Rechenprogrammen mit bewährten Verfahren implementiert. Radioaktiver Zerfall inklusive Zerfallsketten wird entlang des gesamten Transportwegs berücksichtigt. Sorption und Ausfällung werden in den vorliegenden Rechnungen nur in den Einlagerungsbereichen in Form der Quellterme berücksichtigt. Der Transport von Radionukliden in der Gasphase wurde separat berechnet, siehe Kapitel 7.6.

Durch Dichteunterschiede in der Lösung können Konvektionsvorgänge ausgelöst werden. Die Konvektion in solchen Bereichen wird durch erhöhte Diffusionskoeffizienten abgebildet, siehe Kapitel 6.5 und /ALSA 2006d/.

Fernfeld

Das in den Rechnungen zum Bericht /ALSA 2005a/ verwendete Verfahren der Verdünnung der Radionuklidkonzentrationen im Deckgebirge durch einen Verdünnungsfaktor wird nicht mehr angewendet und daher nicht bewertet. Die Berechnung des Transports im Deckgebirge mittels Transferfunktionen ist in /TRA 2006/ beschrieben. Dies stellt ein in verwandten Disziplinen bewährtes Verfahren dar. Es wurde ein Postprozessor entwickelt, um den Transport mit diesen Transferfunktionen zu berechnen. Eine Beschreibung und Verifikation für dieses Werkzeug ist in /TRA 2006/ enthalten.

Biosphäre

Die in /GSF 2006i/ ermittelten Dosiskonversionsfaktoren werden in den Modellrechnungen zur Ermittlung der potenziellen Strahlenexpositionen verwendet, siehe auch Kapitel 6.9. Es

handelt sich hierbei um eine einfache Multiplikation der mit Transferfunktionen berechneten Radionuklidkonzentrationen im Exfiltrationsgebiet mit den Dosiskonversionsfaktoren.

7.5.3 Ergebnisse der Modellrechnungen für den Referenzfall^{TF}

Der Referenzfall ist eine mögliche Realisierung aus der Szenariengruppe des Referenzszenarios, auf dem auch einige deterministische Unsicherheitsbetrachtungen (siehe Kapitel 7.5.5) basieren. Um einen Vergleich der Rechnungen in /ALSA 2005a/ und /ALSA 2006c/ zu ermöglichen, wurde der Referenzfall unter Verwendung von Transferfunktionen für den Deckgebirgsrechenfall DR13 nachgerechnet. Diese Rechnungen werden – wie bereits erwähnt – als „Referenzfall^{TF}“ bezeichnet und im Folgenden diskutiert.

Nach Beendigung der Rechnungen für den Referenzfall wurde als wahrscheinlicherer Repräsentant dieser Szenariengruppe die „kombinierte Variante“ entwickelt, deren Ergebnisse in Kapitel 7.5.4 erläutert werden. In /ALSA 2005a/ und in /ALSA 2006c/ sind alle Werte der verwendeten Eingangsparameter für den Referenzfall und die kombinierte Variante zusammengestellt. Wegen der größeren Eintrittswahrscheinlichkeit für die kombinierte Variante werden deren Ergebnisse ausführlich dargestellt, während die folgenden Ausführungen zum Referenzfall^{TF} kurz ausfallen.

Das Hauptergebnis der Modellrechnungen zum Referenzfall^{TF} ist wie folgt:

- Die maximale Strahlenexposition für einen Angehörigen der betrachteten Personengruppe beträgt $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a und liegt damit ca. um einen Faktor 17 unterhalb des Bewertungsmaßstabs von 0,3 mSv/a. Diese maximale Strahlenexposition wird für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Tal von Wittmar“ berechnet.
- Den Hauptbeitrag zur maximalen Strahlenexposition liefert Pu-239 zu späten Zeiten.
- Die Freisetzung von Radionukliden aus der Grube beginnt früh, aber auf niedrigem Niveau, da bereits während der gezielten Einleitung von Schutzfluid kontaminierte Lösung in das Baufeld in der Südflanke gelangt.
- Der maximale Volumenstrom aus der Grube beträgt ca. 1400 m³/a. Der Strom fällt bereits nach ca. 50 Jahren auf etwa die Hälfte ab und nimmt danach weiter langsam ab. Der in älteren Rechnungen auftretende, starke Abfall entfällt mit der neuen Modellierung der Schnittstelle zum Deckgebirge wie in /ALSA 2006c/, siehe Kapitel 7.5.4.
- Einige Radionuklide werden effektiv in den Einlagerungsbereichen zurückgehalten, weil die vom Inventar her möglichen Konzentrationen der maßgebenden Radionuklide die maximal möglichen Elementkonzentrationen überschreiten.

Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Modellrechnungen zum Referenzfall^{TF} wiedergegeben und diskutiert.

7.5.3.1 Lösungstransport aus der Grube

Der Lösungstransport und die dabei auftretenden Drücke sind entscheidend für den advektiven Transport der Schadstoffe in der Grube. Die berechneten Flüssigkeitsströme aus der Grube und die Drücke basieren auf der Druckrandbedingung an der Schnittstelle zum Deckgebirge, die in /ALSA 2005a/ verwendet wurde, und sind hier nicht wiedergegeben. Eine vergleichbare Rechnung mit der neuen Druckrandbedingung gemäß /ALSA 2006c/ wird in Kapitel 7.5.4.1 für die kombinierte Variante diskutiert.

Die insgesamt aus der Grube über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere ausgepresste Flüssigkeitsmenge beträgt über den Betrachtungszeitraum von 100 000 Jahren ca. 1,2 Mio m³. Dies ist etwa 90 % des am Ende der Nachbetriebsphase vorhandenen Porenvolumens. Gemäß den Ergebnissen der KAFKA-Rechnungen treten über den Schachtverschluss kein Gas und nur eine vernachlässigbar kleine Menge (<0,4 m³) Flüssigkeit aus.

7.5.3.2 Gasbildung; Gasflüsse; Gasspeicherung

Die Gasbildung beeinflusst durch die Wechselwirkung des gebildeten Gasvolumens mit dem Flüssigkeitsvolumen den advektiven Transport von Schadstoffen. Die berechneten Auswirkungen der Gasbildung sind sehr ähnlich zu denjenigen in der kombinierten Variante und werden daher dort ausführlich diskutiert (Kapitel 7.5.4.1).

7.5.3.3 Lösungsflüsse und Transport von Schadstoffen in der Grube

Aus der Untersuchung der Lösungsflüsse und des Tracertransports lassen sich die dominanten Strömungspfade im Umfeld der Einlagerungsbereiche und im übrigen Grubengebäude ermitteln, siehe Abbildung 7.5-2. Es ist bemerkenswert, dass der westliche Strang des Baufeldes in der Südflanke wegen der Austrittsstelle in 574 m Teufe oberhalb dieser Teufe praktisch nicht zum Schadstofftransport beiträgt. Auch gibt es nur geringe Wechselwirkungen zwischen den beiden Strängen und zwar hauptsächlich unterhalb von 574 m Teufe. Dies bedeutet, dass Radionuklide, die in LAW1, LAW3 und LAW4 mobilisiert werden, zum größten Teil über den östlichen Teil der Grube, diejenigen, die in LAW2 mobilisiert werden, zum größten Teil über den westlichen Teil der Grube transportiert werden.

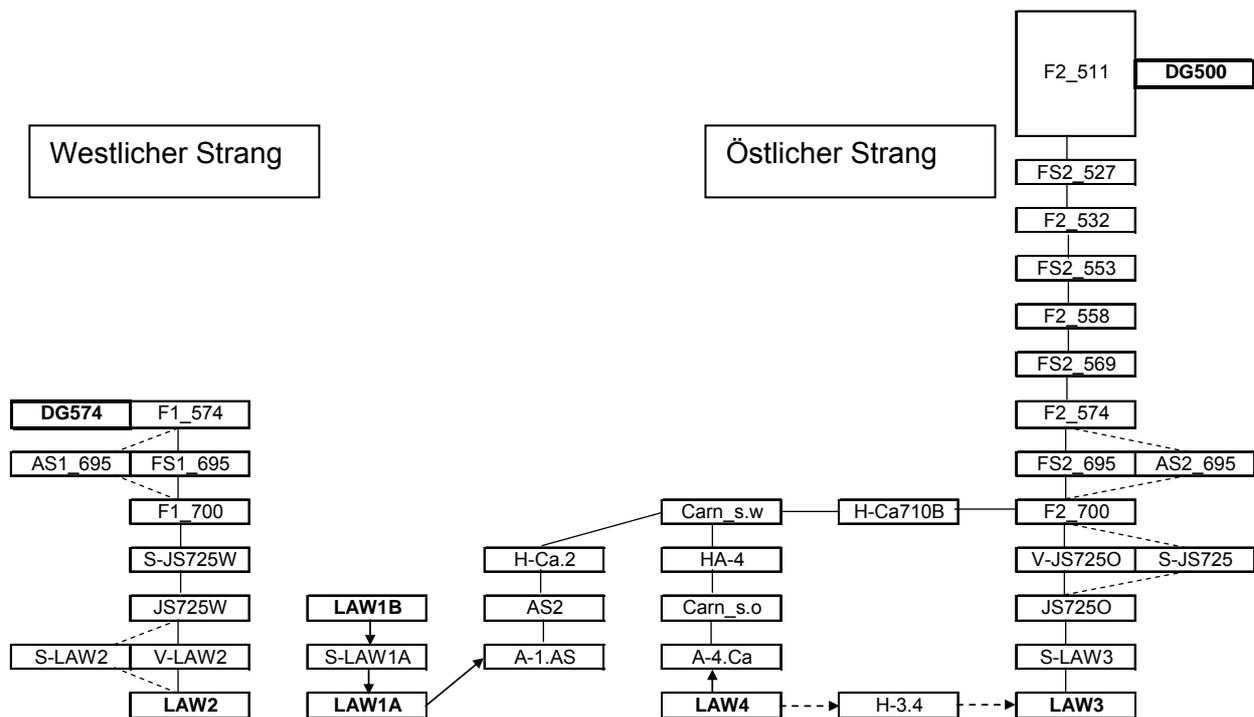


Abb. 7.5-2: Haupttransportpfade von den ELB zu den Austrittsstellen zum Deckgebirge (zum Zeitpunkt 200 Jahre; 20 000 Jahre gestrichelt) /ALSA 2005a/

Die Haupttransportpfade der Tracer sind Indikatoren für die Transportpfade der Radionuklide aus den Einlagerungsbereichen, wobei bezüglich der Menge der aus dem Grubengebäude freigesetzten Radionuklide die maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen zu berücksichtigen sind.

Der wesentliche Transport der Schadstoffe in der Grube ist advektiv mit der ausgepressten Lösung. Die Antriebsmechanismen sind Konvergenz und Gasspeicherung, welche die kontaminierte Flüssigkeit auspressen. Zu frühen Zeiten sind beide Antriebsmechanismen relevant, nach Beenden der Gasspeicherung in der Grube nur noch die Konvergenz. Diffusive und dispersive Prozesse führen ebenfalls zu Radionuklidströmen, sind aber von untergeordneter Bedeutung. Auch die durch erhöhte Diffusion abgebildete Konvektion im Umfeld einiger LAW-Einlagerungsbereiche führt – im Vergleich zu den advektiven Strömen – zu keinen relevanten Radionuklidströmen.

7.5.3.4 Transport im Deckgebirge und Gesamtstrahlenexposition

Der Transport im Deckgebirge wird über Transferfunktionen beschrieben, siehe Kapitel 6.8. Die nach dem Transport in ein Exfiltrationsgebiet auftretenden Radionuklidkonzentrationen führen zu einer Strahlenexposition, wie in Kapitel 6.9 beschrieben. Detaillierte Ergebnisse zur potenziellen Strahlenexposition werden in Kapitel 7.5.4 für die kombinierte Variante angegeben.

Für den Referenzfall^{TF} beträgt das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a und wird für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Tal von Wittmar“ bei etwa 24 000 Jahren erreicht. Es wird von Pu-239 dominiert. Die maximalen Strahlenexpositionen für die anderen Exfiltrationsgebiete sind kleiner und betragen jeweils $3,5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a. Sie werden von Am-241 (vD-Amm), bzw. Pu-239 (m-Amm) dominiert.

7.5.4 Ergebnisse der Modellrechnungen für die kombinierte Variante

Die kombinierte Variante ist eine wahrscheinliche Realisierung aus der Szenariengruppe des Referenzszenarios, sie hat eine größere Relevanz bezüglich der Bewertung der potenziellen Strahlenexposition als der in Kapitel 7.5.3 diskutierte Referenzfall^{TF}. Der wesentliche Unterschied zum Referenzfall^{TF} ist die Berücksichtigung aktualisierter Radionuklid-Quellterme in den Einlagerungsbereichen, die unter anderem für Plutonium zu höheren Freisetzungen führen. Die Fluidbewegungen sind gegenüber dem Referenzfall kaum verändert. Die Ergebnisse für die kombinierte Variante sind ausführlich in /ALSA 2006c/ dargestellt.

Die Hauptergebnisse der Modellrechnungen zur kombinierten Variante sind wie folgt:

- Die globale maximale Strahlenexposition für ein Individuum der betrachteten Personengruppe beträgt $5,1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a (Zum Vergleich: im Referenzfall^{TF} $1,7 \cdot 10^{-5}$ Sv/a) und liegt damit um einen Faktor 6 unterhalb des Bewertungsmaßstabs von 0,3 mSv/a. Diese maximale Strahlenexposition wird für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Tal von Wittmar“ berechnet.
- Den Hauptbeitrag zur maximalen Strahlenexposition liefert Pu-239 zu späten Zeiten.
- Die Freisetzung von Radionukliden aus der Grube beginnt früh, aber auf niedrigem Niveau, da bereits während der gezielten Einleitung von Schutzfluid kontaminierte Lösung in das Baufeld in der Südflanke gelangt.
- Der maximale Volumenstrom aus der Grube beträgt ca. 1250 m³/a (zum Vergleich: im Referenzfall ca. 1400 m³/a). Der Strom nimmt im Vergleich zum Referenzfall kontinuierlicher ab und erreicht nach ca. 100 Jahren etwa die gleichen Werte wie im Referenzfall.
- Einige Radionuklide werden effektiv in den Einlagerungsbereichen zurückgehalten, weil die vom Inventar her möglichen Konzentrationen der maßgebenden Radionuklide die vorgegebenen maximal möglichen Elementkonzentrationen überschreiten.

Die Unterschiede zum Referenzfall^{TF} betreffen hauptsächlich die maximale Strahlenexposition, die im Wesentlichen von dem anderen Radionuklid-Quellterm beeinflusst wird. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Modellrechnungen im Einzelnen dargestellt und bewertet.

7.5.4.1 Lösungstransport aus der Grube

In der kombinierten Variante werden der Lösungstransport und die im Grubengebäude auftretenden Drücke mit der Druckrandbedingung an der Schnittstelle zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge gemäß dem Deckgebirgsrechenfall DR13 berechnet.

Der Lösungsstrom aus dem Grubengebäude steigt nach etwa 10 Jahren stark an und erreicht kurz danach sein Maximum, siehe Abbildung 7.5-3. Dieses Maximum ist etwas geringer als im Referenzfall. Der Vergleich mit dem Referenzfall wurde hier eingefügt, um die durch die alternative Modellierung der Schnittstelle Grubengebäude/Deckgebirge bedingten Unterschiede zu zeigen, die sich beim Lösungsstrom besonders stark auswirken. Die insgesamt aus dem Grubengebäude über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere ausgepresste Flüssigkeitsmenge ist gegenüber dem Referenzfall nur geringfügig erhöht.

Nach ca. 800 Jahren setzt der Ausstrom von Gas aus dem Grubengebäude ein. Dies ist in der Abbildung nicht eingetragen.

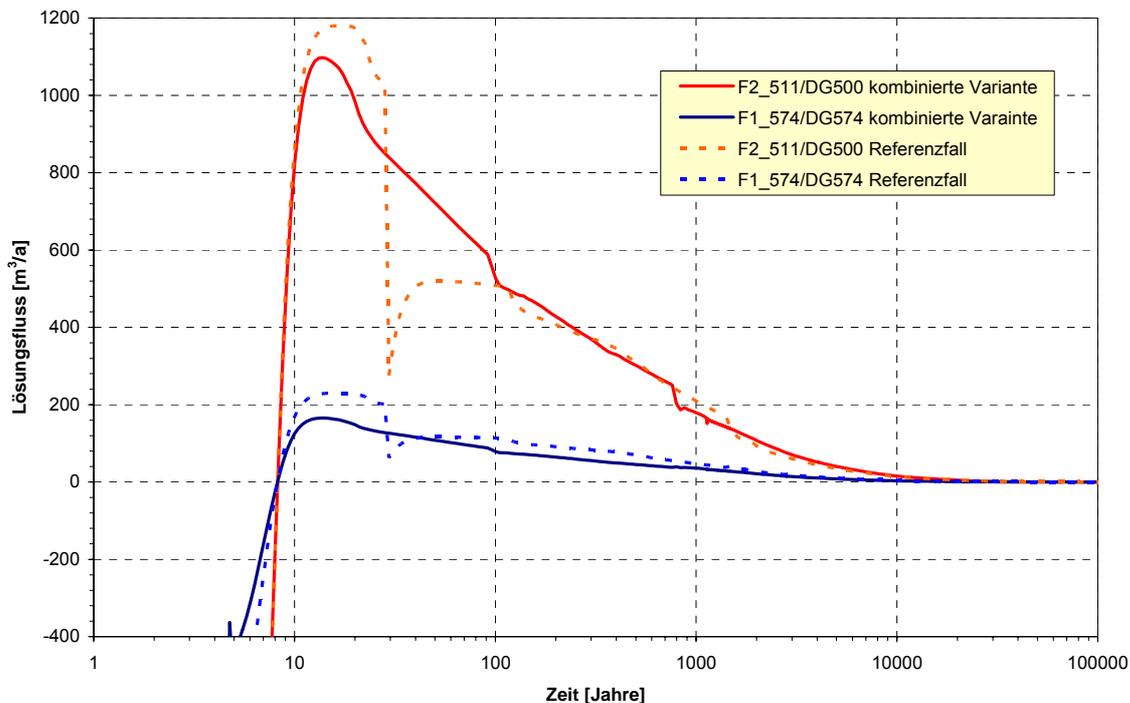


Abb. 7.5-3: Lösungsströme aus der Grube (kombinierte Variante vs. Referenzfall – gestrichelt). /ALSA 2006c/

Der Druck im Grubengebäude steigt in den ersten ca. 5 Jahren durch die Einleitung des Schutzfluids langsam an (vgl. Abbildung 7.5-4), danach bis ca. 15 Jahren stark und erreicht nach ca. 100 Jahren sein Maximum. Der Anstieg bis etwa 100 Jahre ist durch Gebirgskonvergenz bedingt. Die neue Modellierung der Schnittstelle zum Deckgebirge bewirkt insgesamt eine harmonischere Druckentwicklung in der Grube als im Referenzfall.

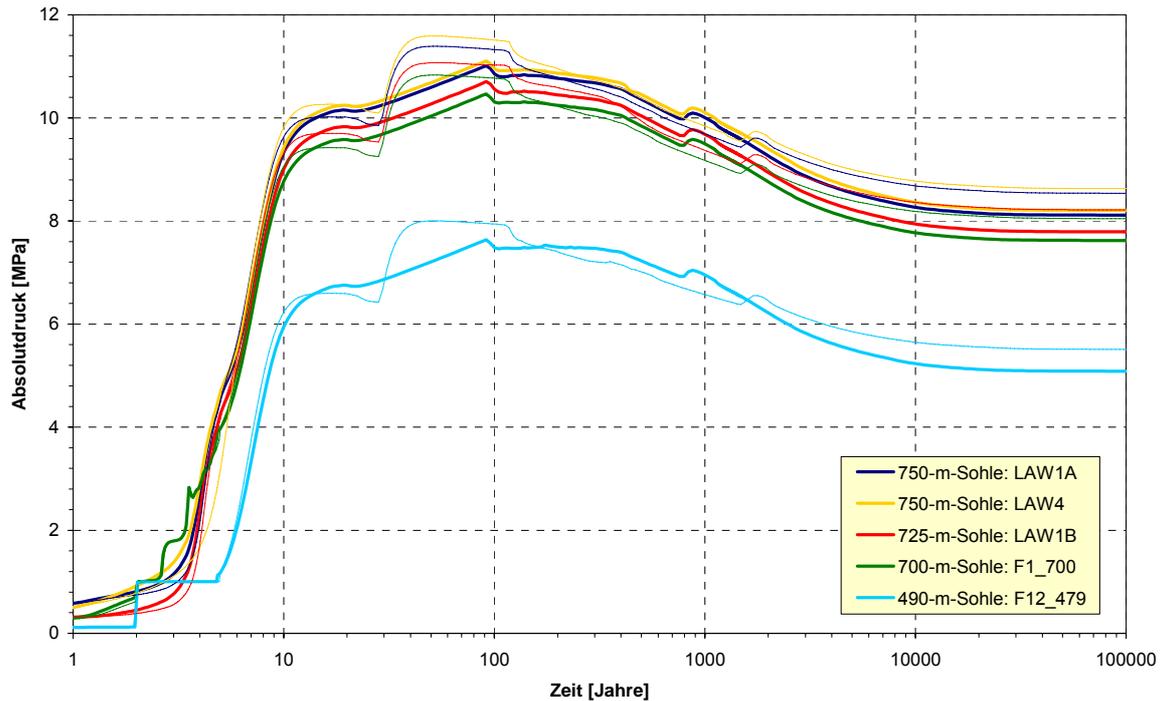


Abb. 7.5-4: Druckentwicklung in ausgewählten Bereichen des Grubengebäudes (kombinierte Variante vs. Referenzfall – dünn) /ALSA 2006c/

7.5.4.2 Gasbildung; Gasflüsse; Gasspeicherung

Die Gasbildung in den Einlagerungskammern führt zu einem kontinuierlichen Anstieg der Gassättigung und einer entsprechenden Entsättigung an Flüssigkeit. In Abbildung 7.5-5 ist die Lösungssättigung in den Einlagerungsbereichen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in allen Einlagerungsbereichen eine geringere Lösungssättigung auftritt, als der residualen Gassättigung (10 %) entspräche. Das bedeutet, dass sich entsprechend der lokalen Situation zeitabhängige Gaspolster aufbauen, die durch einen behinderten Abfluss aus den Einlagerungsbereichen verursacht werden. Am deutlichsten ist das Gaspolster in LAW1B zu erkennen.

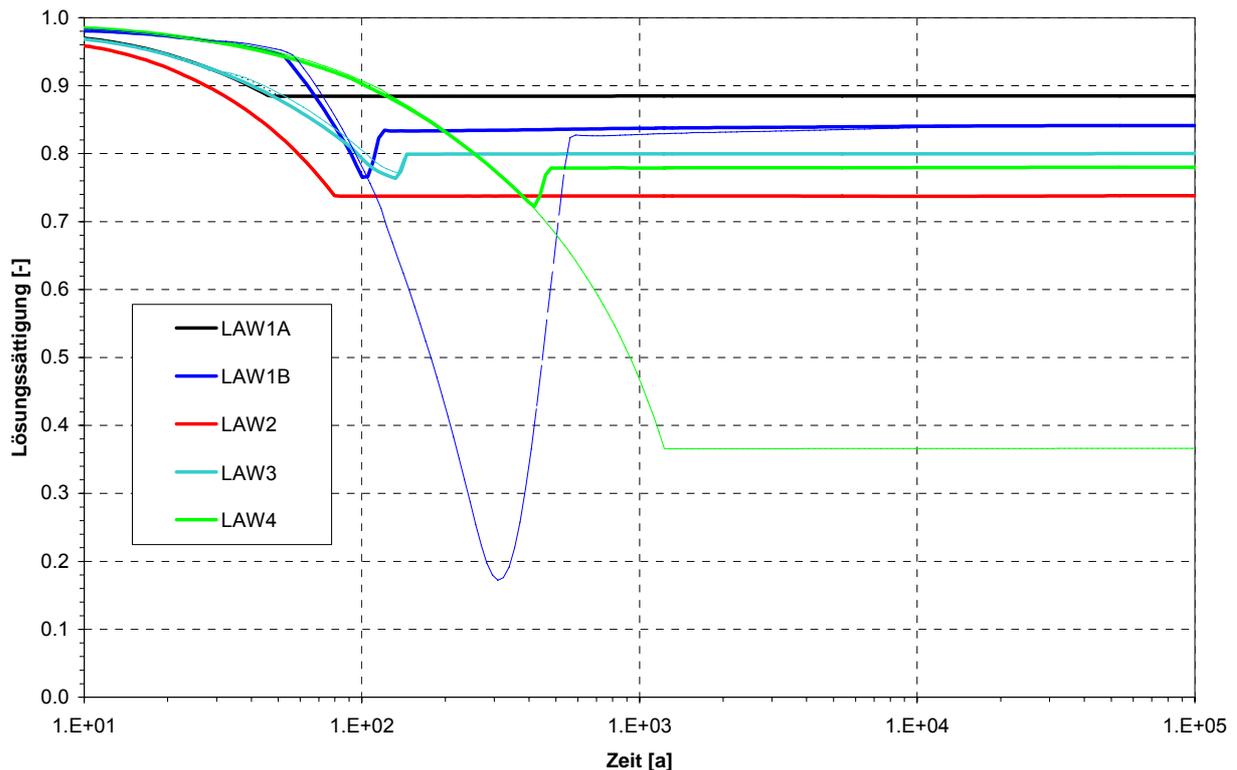


Abb. 7.5-5: Lösungssättigung in den Einlagerungsbereichen (KAFKA, kombinierte Variante vs. Referenzfall – dünn, gestrichelt) /ALSA 2006c/

7.5.4.3 Lösungsflüsse und Transport von Schadstoffen in der Grube

Da die Änderungen zwischen dem Referenzfall und der kombinierten Variante hauptsächlich den Radionuklid-Quellterm betreffen, sind die Unterschiede bei den Lösungsflüssen und dem Tracertransport so gering, dass die Aussagen aus Kapitel 7.5.3 uneingeschränkt gültig bleiben. Dies betrifft u.A. die dominanten Strömungspfade für Tracer im Umfeld der Einlagerungsbereiche, die in der Abbildung 7.5-2 (Kapitel 7.5.3) dargestellt sind. Der Transport aus LAW2 und LAW3 erfolgt bevorzugt senkrecht nach oben, aus LAW4 horizontal in Richtung des Carnallit-Baufelds und aus LAW1B hauptsächlich nach unten über LAW1A in Richtung zum Älteren Steinsalz. Zu späten Zeiten, d.h. nach ca. 5000 Jahren überwiegt beim Transport aus LAW1B derjenige nach oben direkt in das Baufeld in der Südflanke.

Durch den aktualisierten Radionuklid-Quellterm (vgl. Kapitel 6.2) sind die Radionuklid-Konzentrationen in den Einlagerungsbereichen geändert, so dass sich unter anderem die Beiträge der Radionuklide aus den einzelnen Einlagerungsbereichen zur Gesamtfreisetzung im Vergleich zum Referenzfall ändern können. In einigen Einlagerungsbereichen werden die maximal möglichen Elementkonzentrationen von einigen Radioelementen nicht mehr erreicht, beispielsweise Plutonium in LAW1A, siehe Tabelle 7.5-1. Das bedeutet, dass für diese Elemente die aktuellen Konzentrationen inventarbestimmt sind. Folglich wird eine Erhöhung einer maximal möglichen Elementkonzentration nicht notwendigerweise zu einem

linearen Anstieg der potenziellen Strahlenexposition führen. Dies wird im folgenden Kapitel 7.5.4.4 und in den Varianten in Kapitel 7.5.5 diskutiert.

Tab. 7.5-1: Erreichen und Unterschreiten der maximal möglichen Konzentrationen in Jahren für die kombinierte Variante /ALSA 2006c/

RX.5	U		Pu		Th		Np		Am	
	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis	von	bis
LAW1A	0,0	> 10 ⁵	-	-	0,0	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW1B	0,0	> 10 ⁵	3,9	17 800	0,0	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW2	0,0	> 10 ⁵	3,9	10 000	0,0	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW3	0,4	> 10 ⁵	0,9	> 10 ⁵	1,4	> 10 ⁵	-	-	-	-
LAW4	0,0	> 10 ⁵	0,1	> 10 ⁵	0,0	> 10 ⁵	-	-	3,5	955

Änderungen gegenüber dem Referenzfall sind fett hervorgehoben

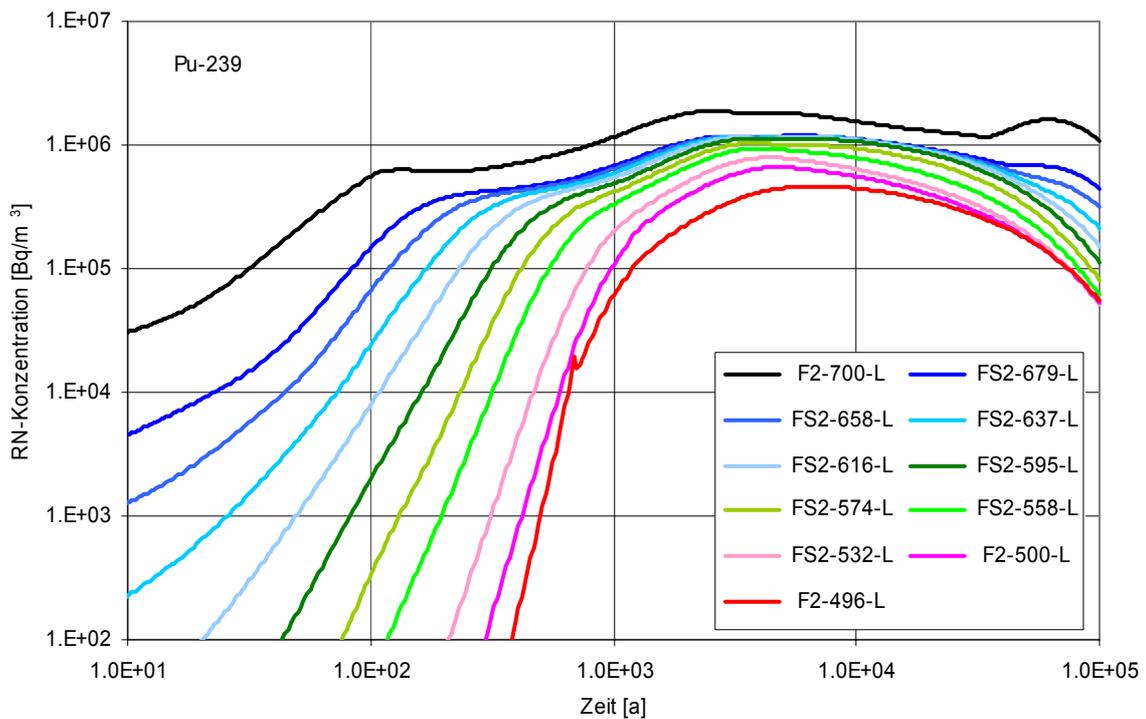


Abb. 7.5-6: Konzentration von Pu-239 im Baufeld in der Südflanke, östlicher Teil. Kombinierte Variante /ALSA 2006c/

Wie im Referenzfall erfolgt der Transport der Schadstoffe in der Grube im Wesentlichen advektiv mit der ausgepressten Lösung. Zur Verdeutlichung der Relevanz des advektiven Transports sind in Abbildung 7.5-6 die Konzentrationsverläufe für das relativ langlebige Radionuklid Pu-239 im Baufeld in der Südflanke dargestellt. Der Abfall der Konzentrationen zu späten Zeiten ergibt sich durch den radioaktiven Zerfall. Es ist eine kontinuierliche Zunahme

der Konzentrationen mit der Tiefe zu erkennen (Die Zahlenangaben in der Legende beziehen sich jeweils auf die Tiefe). Insgesamt zeigen die Kurvenverläufe, dass der Transport im Wesentlichen advektiv ist; ein diffusiver Konzentrationsausgleich macht sich auf Grund des geringen Diffusionskoeffizienten erst zu späten Zeiten bemerkbar.

7.5.4.4 Transport im Deckgebirge und Gesamtstrahlenexposition

Der Transport im Deckgebirge wird über Transferfunktionen für drei Ausbreitungspfade, bzw. Exfiltrationsgebiete berechnet (vgl. Kapitel 6.8). Die daraus berechneten potenziellen Strahlenexpositionen sind in Abbildung 7.5-7 dargestellt.

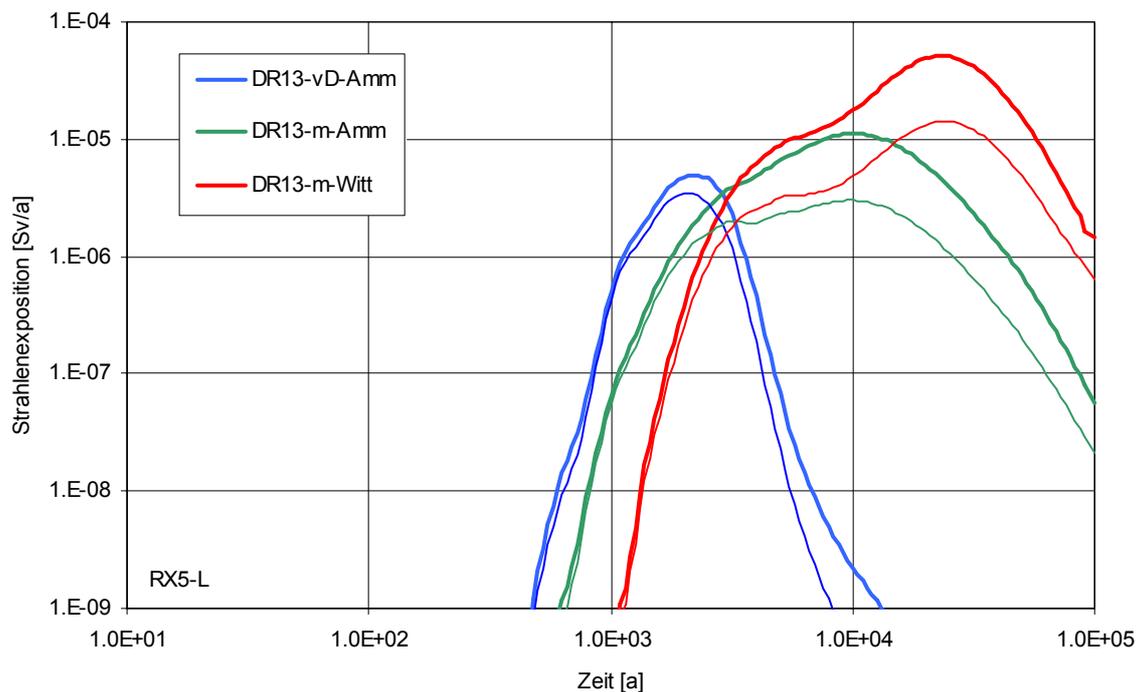


Abb. 7.5-7: Potenzielle Strahlenexposition in den Exfiltrationsgebieten (Kombinierte Variante vs. Referenzfall^{TF} – dünne Linie) /ALSA 2006c/

Die potenziellen Strahlenexpositionen in der kombinierten Variante sind für alle Exfiltrationsgebiete größer als im Referenzfall^{TF}, jedoch besonders ausgeprägt für m-Amm und m-Witt, bei denen die Strahlenexposition durch Pu-239 dominiert wird. Das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition beträgt $5,1 \cdot 10^{-5}$ Sv/a und wird für das Exfiltrationsgebiet „Muschelkalk – Tal von Wittmar“ bei etwa 23 000 Jahren angenommen. Es ist ca. einen Faktor 3 größer als im Referenzfall^{TF}. Zu frühen Zeiten dominieren Am-241 und Pu-239 gemeinsam das Maximum der Strahlenexposition für das Exfiltrationsgebiet „verstürztes Deckgebirge – Tal der Ammerbeek“. In diesem Fall ist das Maximum gegenüber dem Referenzfall^{TF} um ca. 40 % erhöht.

Die Radionuklide, die die maximalen potenziellen Strahlenexpositionen für jedes Exfiltrationsgebiet dominieren, stammen jeweils aus unterschiedlichen Einlagerungsbereichen. Dies lässt sich mit Hilfe von speziellen Rechnungen zeigen, bei denen das gleiche Radionuklid in verschiedenen Einlagerungsbereichen unterschiedliche Namen hat und die einzelnen Pfade in ähnlicher Weise wie für Tracer verfolgt werden. Diese Auswertung wird bei allen Rechnungen durchgeführt und zeigt für die kombinierte Variante und das Exfiltrationsgebiet m-Witt, dass Plutonium aus allen Einlagerungsbereichen außer LAW4 für das globale Maximum der potenziellen Strahlenexposition verantwortlich ist.

7.5.4.5 *Bewertung von Modellunterschieden KAFKA / LOPOS*

In diesem Kapitel werden einige durch Modellunterschiede bedingte Besonderheiten der Rechenergebnisse diskutiert.

Das Maximum des Lösungsstroms aus dem Grubengebäude ist in den Modellrechnungen mit KAFKA etwa 25 % größer als in den LOPOS-Rechnungen. Der Unterschied zwischen KAFKA- und LOPOS-Ergebnissen beruht auf der unterschiedlichen Konvergenzmodellierung und zeigt, dass die Radionuklidfreisetzung aus dem Grubengebäude dadurch mit einer Unsicherheit von ca. 20 % behaftet ist.

In den LOPOS-Rechnungen setzt der Ausstrom von Gas aus der Grube nach etwa 1100 Jahren aus dem Grubengebäude ein, was etwa im Bereich des Maximums der Gasfreisetzung in den KAFKA-Rechnungen liegt. Die Abbildung der Gasspeicherung und Gasbewegung in LOPOS, die gemäß den KAFKA-Ergebnissen parametrisiert wird, ist also zufriedenstellend.

Abbildung 7.5-8 zeigt die mit LOPOS ermittelte Lösungssättigung in den Einlagerungsbereichen. Als maximal mögliche Gasspeicheranteile werden die in KAFKA maximal ermittelten Werte der Gassättigung verwendet, siehe Abbildung 7.5-5. Es ist eine gute Übereinstimmung mit den KAFKA-Ergebnissen zu erkennen, wobei die Modelleigenschaft von LOPOS auffällt, dass einmal mit Gas gefüllte Gaspolster nicht wieder abnehmen (außer durch Konvergenz), d.h. dass die Gas- und Lösungssättigung dann konstant bleiben.

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, dass die Auswirkungen der Gasbildung und Gasspeicherung für beide Rechenprogramme nahezu gleich sind, d.h. dass die Vorgehensweise – Übernahme der Gaspfade und der Gaspolster aus KAFKA nach LOPOS – erfolgreich ist. Dieses Ergebnis ist wichtig, weil das durch Gasspeicherung bedingte Auspressen kontaminierter Lösung zu frühen Zeiten ein wesentlicher Prozess für den Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen ist.

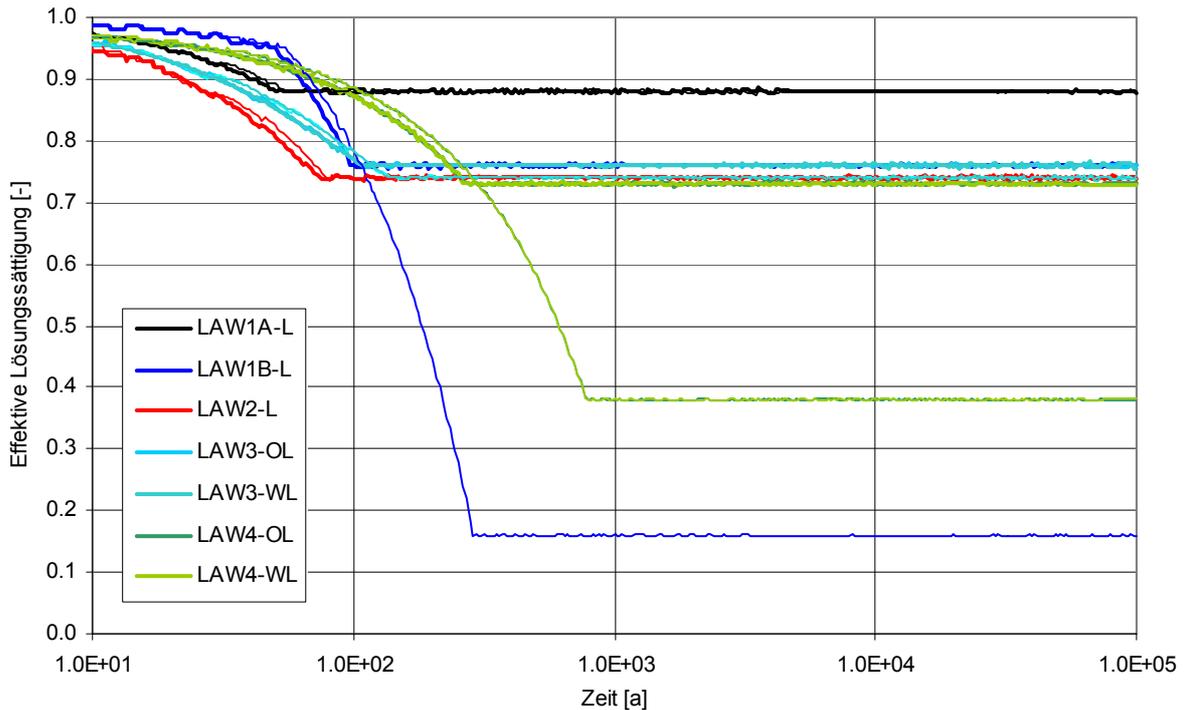


Abb. 7.5-8: Lösungsättigung in den Einlagerungsbereichen (LOPOS, kombinierte Variante vs. Referenzfall – dünne Linie), nach /ALSA 2006c/

Nach etwa 100 Jahren stellen sich in den KAFKA- und LOPOS-Rechnungen in der gesamten Grube geringfügig unterschiedliche Druck- und Strömungsverhältnisse ein. Diese wirken sich besonders auf den Lösungsstrom aus LAW1B in das Baufeld in der Südflanke aus. Infolgedessen ist der Schadstofftransport aus LAW1B über diese vertikale Verbindung in den LOPOS-Rechnungen mittelfristig etwa 3-mal höher als in den KAFKA-Rechnungen. Damit können die mit LOPOS gerechneten LAW1B-Beiträge zu den Radionuklidkonzentrationen im Baufeld in der Südflanke im Sinne der Modellunsicherheiten in den Programmen als konservativ charakterisiert werden.

7.5.4.6 Schlussfolgerungen aus der kombinierten Variante

Der berechnete Transport der Lösungen und Tracer im Grubengebäude unterscheidet sich in der kombinierten Variante kaum von demjenigen im Referenzfall gemäß /ALSA 2005a/. Das bedeutet, dass sich die vorgenommenen Aktualisierungen von Parametern gegenüber dem Referenzfall, soweit sie nicht mit dem Quellterm zusammenhängen, nur wenig auf die Radionuklidverbreitung in der Grube auswirken. Die Ergebnisse des Schlussberichts /ALSA 2005a/ zum Einfluss einzelner Prozesse und Parameter, d.h. die berechneten Veränderungen des Radionuklidübertritts in das Deckgebirge gegenüber dem Referenzfall, sind in guter Näherung weiterhin gültig. Durch die realitätsnähere Abbildung der Radionuklidverbreitung im Deckgebirge mit Hilfe der Transferfunktionen erhalten die Übertritte der verschiedenen Radionuklide zu den verschiedenen Zeiten jedoch andere Gewichte. Aus diesem Grund wurden die Rechenfälle der Unsicherheitsbetrachtung aus /ALSA 2005a/ unter Verwendung

der Transferfunktionen für die Ausbreitung im Deckgebirge (anstelle des Verdünnungsfaktors) neu bewertet. Das Ergebnis wird im nachfolgenden Kapitel 7.5.5 zusammenfassend wiedergegeben.

Der aktualisierte Radionuklid-Quellterm führt zu einer Erhöhung einiger Radionuklidkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen und folglich zu einer höheren potenziellen Strahlenexposition. Insofern sind die Ergebnisse für den Referenzfall^{TF} revidiert worden.

In der kombinierten Variante und im Referenzfall^{TF} ergeben sich im Vergleich zum Referenzfall geringere maximale Strahlenexpositionen, wenn diese vom relativ kurzlebigen Radionuklid Am-241 dominiert werden, aber höhere Strahlenexpositionen, wenn diese vom relativ langlebigen Radionuklid Pu-239 dominiert werden. Die Berücksichtigung von Transferfunktionen anstelle der Verdünnungsfaktoren führt generell zu niedrigeren Strahlenexpositionen. Referenzfall^{TF} und Referenzfall unterscheiden sich jedoch zusätzlich auch in Bezug auf den zugrunde liegenden Deckgebirgs-Rechenfall. Insofern sind die Ergebnisse für den Referenzfall revidiert worden.

Wegen der Berücksichtigung der aktualisierten Radionuklid-Quellterme in den Einlagerungsbereichen und der realistischeren Abbildung des Transports im Deckgebirge über Transferfunktionen ist es sinnvoll, die kombinierte Variante⁴⁰ als Basis für die probabilistische Unsicherheitsanalyse zu verwenden, siehe Kapitel 7.5.7. Zur Absicherung der Ergebnisse werden ferner einige deterministische Unsicherheitsbetrachtungen zur kombinierten Variante durchgeführt, siehe Kapitel 7.5.5. Wesentliche Aussagen zum Referenzfall behalten weiterhin ihre Gültigkeit, siehe die Ausführungen an den entsprechenden Stellen in diesem Bericht.

7.5.5 Ergebnisse der Unsicherheitsbetrachtungen

In allen Modellrechnungen müssen Unsicherheiten, bzw. Ungewissheiten berücksichtigt werden. Dies betrifft Daten, Modelle und Szenarien. Im vorliegenden Kapitel werden Daten- und Modellunsicherheiten behandelt, Unsicherheiten des Systemverhaltens (Szenariengruppen) sind Thema in Kapitel 7.5.6. Als die Repräsentanten des Referenzszenarios wurden der Referenzfall und die kombinierte Variante betrachtet, die jeweils durch einen festen Satz von Eingangsdaten definiert sind. Diese Eingangsdaten wurden unter dem Gesichtspunkt einer weitgehend realistischen Abbildung des Systems – beispielsweise unter Berücksichtigung heutiger Gegebenheiten am Standort, d.h. ohne Berücksichtigung zukünftiger pessimistischer Entwicklungen – festgelegt, konservative Festlegungen wurden nach Möglichkeit vermieden. Zur Einschätzung der Auswirkungen von Unsicherheiten in diesen Eingangsdaten wurden Unsicherheitsbetrachtungen durchgeführt. Modellunsicherheiten wurden dabei durch Parametervariationen behandelt. Die deterministischen Unsicherheitsbetrachtungen unterscheiden sich von der probabilistischen Unsicherheitsanalyse, bei der der Einfluss einer Vielzahl von Unsicherheiten gleichzeitig untersucht wird, siehe Kapitel 7.5.7.

⁴⁰ Es wird die kombinierte Variante mit Berücksichtigung des Deckgebirgsrechenfalls DR14 (vgl. Kapitel 6.8) als Basis verwendet, was einer gewissen Modifikation der kombinierten Variante entspricht.

Referenzfall (Kapitel 7.5.3) und kombinierte Variante (Kapitel 7.5.4) gehören zur Szenariengruppe des Referenzszenarios. Zur Untersuchung der Unsicherheiten werden einzelne Parameterwerte in Bandbreiten variiert, die mit den Maßnahmen des Schließungskonzepts kompatibel sind.

In Tabelle 7.5-2 sind die bei den Unsicherheitsbetrachtungen berücksichtigten Themenfelder und Phänomene in einer Übersicht zusammengestellt. Einige in /ALSA 2005a/ diskutierte Unsicherheitsbetrachtungen werden hier weggelassen, weil die dort vorgenommenen Annahmen inzwischen als unwahrscheinlich eingestuft werden, wie zum Beispiel die Rechnungen zur Szenariengruppe acM. Die Themen der Unsicherheitsbetrachtungen umfassen diejenigen Parameter, die bezüglich der potenziellen Strahlenexposition als relevant angesehen werden.

Die in der Tabelle angegebenen Themenfelder wurden in /ALSA 2005a/, /ALSA 2005b/, und /ALSA 2006c/ ausführlich untersucht. Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammenfassend bewertet. Die Bewertung der Relevanz der untersuchten Themen orientiert sich an der globalen maximalen Strahlenexposition, d.h. am Maximum als Funktion der Zeit und über alle Exfiltrationsgebiete. Dabei wird angesetzt:

Große Auswirkungen: Maximale Strahlenexposition mehr als einen Faktor 3 verändert

Mittlere Auswirkungen: Maximale Strahlenexposition weniger als einen Faktor 3 verändert

Dieser Faktor ist willkürlich gewählt und dient lediglich der Kategorisierung der Ergebnisse. In den Unsicherheitsbetrachtungen zur kombinierten Variante werden die Änderungen bezüglich dieser Variante verwendet, ansonsten die Änderungen bezüglich des Referenzfalls^{TF}.

Zu den Themen mit großen Auswirkungen auf die Strahlenexposition gehören:

- Radionuklid-Quellterm,
- Durchströmter Querschnitt des Baufeldes in der Südflanke,
- Transport im Deckgebirge.

Es handelt sich bei diesen Themen um die bereits in den Modellrechnungen zum Strukturmodell D4 /ALSA 2005a/ identifizierten, wesentlichen Einflussgrößen auf den Radionuklidtransport und die potenzielle Strahlenexposition. Ihre Bedeutung ist groß, weil sie direkt in den Einlagerungsbereichen die Anfangskonzentrationen der dosisrelevanten Radionuklide beeinflussen, im Baufeld in der Südflanke die Konzentration der Radionuklide, die für die Freisetzung in das Deckgebirge wesentlich sind, bestimmen und weil sie den Transport durch das Deckgebirge bestimmen, der direkt die Strahlenexpositionen beeinflusst. Die probabilistischen Rechnungen, die in Kapitel 7.5.7 diskutiert werden, bestätigen diese Wertung weitgehend.

Tab. 7.5-2: Themen der Unsicherheitsbetrachtungen zu Daten und Modellen

Thema „Radionuklidquellterme und Mobilisierung“
Maximal mögliche Elementkonzentrationen gemäß oberer und unterer Bandbreite
Thema „Gasbildungsrate, Gasspeicherung und Gasabfluss“
Höhere Gasbildung und Gasbildung außerhalb der Einlagerungsbereiche
Höhere Gasspeichervolumina
Höherer Gaseindringdruck von eingebauten Strömungsbarrieren und von Auflockerungszo- nen (Schweben und ausgewählten Pfeilern im Nahbereich) bei unveränderter Permeabilität
Thema „Strömungswiderstände im Grubengebäude“
Höhere Permeabilität der Schweben und ausgewählter Pfeiler im Nahbereich bei unverän- dertem Gaseindringdruck
Geringere Permeabilität der Schweben und ausgewählter Pfeiler im Nahbereich mit korrelier- ter Anpassung des Gaseindringdrucks
Einkriechen von Salz in mit Schotter verfüllte Auffahrungen
Veränderte Permeabilität von Salzgrusversatz
Höhere Transmissivität der Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke
Global erhöhte und verringerte integrale Durchlässigkeit von Strömungsbarrieren
Thema „Kanalisation“
Durchströmter Querschnitt des Baufeldes in der Südflanke gemäß oberer und unterer Band- breite
Verfüllung der noch offenen Abbaue mit Sorelbeton
Thema „Deckgebirge und Schnittsstelle mit dem Deckgebirge“
Alternativer Deckgebirgsrechenfall DR12. Damit verknüpft: veränderter Strömungswiderstand zwischen Grube und Deckgebirge
Veränderte Abbildung der Wegsamkeiten in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere
Thema „Konvergenz“
Generell höhere Konvergenzraten; Anfangskonvergenzrate
Lokale Konvergenzrate
Explizite Zeitabhängigkeit der Konvergenzrate
Größere Abhängigkeit vom Fluiddruck
Effektiver Gesteinsdruck
Niedrigere Konvergenzrate wegen geringerer Ausdehnung der Feuchtezone im Salinar
Feuchtekonvergenz
Örtlich ungleichmäßige Konvergenz des Baufeldes in der Südflanke

Zu den Themen mit mittleren Auswirkungen auf die Strahlenexposition gehören einige Pa-
rameter für die Modellierung der Konvergenz. Die Konvergenz wirkt ebenfalls direkt auf den

Radionuklidtransport und über den gesamten Betrachtungszeitraum auf die Lösungsströme in der Grube. Da die Konvergenz über mehrere Parameter modelliert wird, sind die einzelnen Parameter in den Variationen nur von mittlerer Bedeutung. In der Gesamtheit ist die Konvergenz jedoch von großer Bedeutung, wie sich auch in der probabilistischen Unsicherheitsanalyse gezeigt hat.

Zu den Themen ohne nennenswerte Auswirkungen auf die Strahlenexposition gehören die

- Raten der Radionuklidmobilisierung,
- Asymmetrische Konvergenz des Grubengebäudes,
- Lokale Konvergenzraten,
- Explizite Zeitabhängigkeit der Konvergenzrate,
- Versatzpermeabilitäten,
- Strömungswiderstände der Schweben und Barrieren im Nahbereich der ELK,
- Verteilung des Lösungsstroms über die Austrittsstellen in das Deckgebirge,
- Transmissivität der Auflockerungszonen,
- Vertikale Ausdehnung der Übertrittsstelle,
- Gasbildung und Gasspeicherung.

Bei einigen dieser Themen ist die geringe Relevanz unerwartet, beispielsweise bei der Gasbildung oder der Rate der Radionuklidmobilisierung. Diese beiden Prozesse beeinflussen die Radionuklidkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen aber nur für relativ kurze Zeit, so dass die Auswirkungen gering sind. In der Restgrube bewirkt eine geänderte Gasbildung eine zeitliche Veränderung des Auffüllens der Gasspeichervolumina und auch dieser Effekt hat auf den Radionuklidtransport kaum Einfluss.

7.5.6 Ergebnisse der alternativen Szenarien

Bei der Ermittlung der Konsequenzen für alternative Szenariengruppen wurde ein repräsentatives Szenario für jede Gruppe analysiert. Die vom Referenzszenario abweichenden Merkmale, Ereignisse und Prozesse sind jeweils durch eher ungünstige Parameterwerte modelliert worden. Als wesentliches Ergebnis wird jeweils die potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre als Funktion der Zeit berechnet.

Da die Berücksichtigung alternativer Szenarien in eine andere Kategorie von Unsicherheit fällt als die Datenunsicherheiten in Kapitel 7.5.5, werden sie separat behandelt. Die folgenden Szenariengruppen wurden untersucht:

- Lösungszutritt in den Fasskegel der MAW-Kammer (LsgMAW),
- Gasfluss über die Tagesschächte (GTs) und
- vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ (vZdSB)

Im Szenario LsgMAW wird der gesamte MAW-Nahbereich detaillierter abgebildet.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind im Detail in /ALSA 2005a/ und /ALSA 2006c/ dargestellt. Für alle alternativen Szenariengruppen sind die Konsequenzen für den Lösungspfad gering bis vernachlässigbar (zu „Vergletscherung“ (Vg) siehe Kapitel 7.2.2 – diese Gruppe wurde in den Modellrechnungen zum Lösungspfad nicht berücksichtigt).

Als Beispiel seien die Ergebnisse für die Szenariengruppe LsgMAW betrachtet. Diese ist durch das Eindringen von Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer und die Mobilisierung von Schadstoffen in dieser Kammer charakterisiert, siehe Kapitel 5.2. Durch die feucht-anaeroben Bedingungen kommt es zu einer höheren Gasbildung als im Referenzszenario, die anfangs zu einem schnellen Auspressen kontaminierter Lösung führt. Der advective Transport kommt im Bereich der MAW-Kammer aber schnell zum Erliegen. In Abbildung 7.5-9 sind die potenziellen Strahlenexpositionen für die Rechnungen zum Szenario LsgMAW dargestellt. Die gestrichelten Linien ergeben sich unter der Annahme, dass das MAW-Inventars nicht mobilisiert wird (kombinierte Variante). Es sind keine Änderungen der Strahlenexpositionen zu erkennen, der Beitrag der Radionuklide aus der MAW-Kammer zur Gesamtstrahlenexposition ist vernachlässigbar.

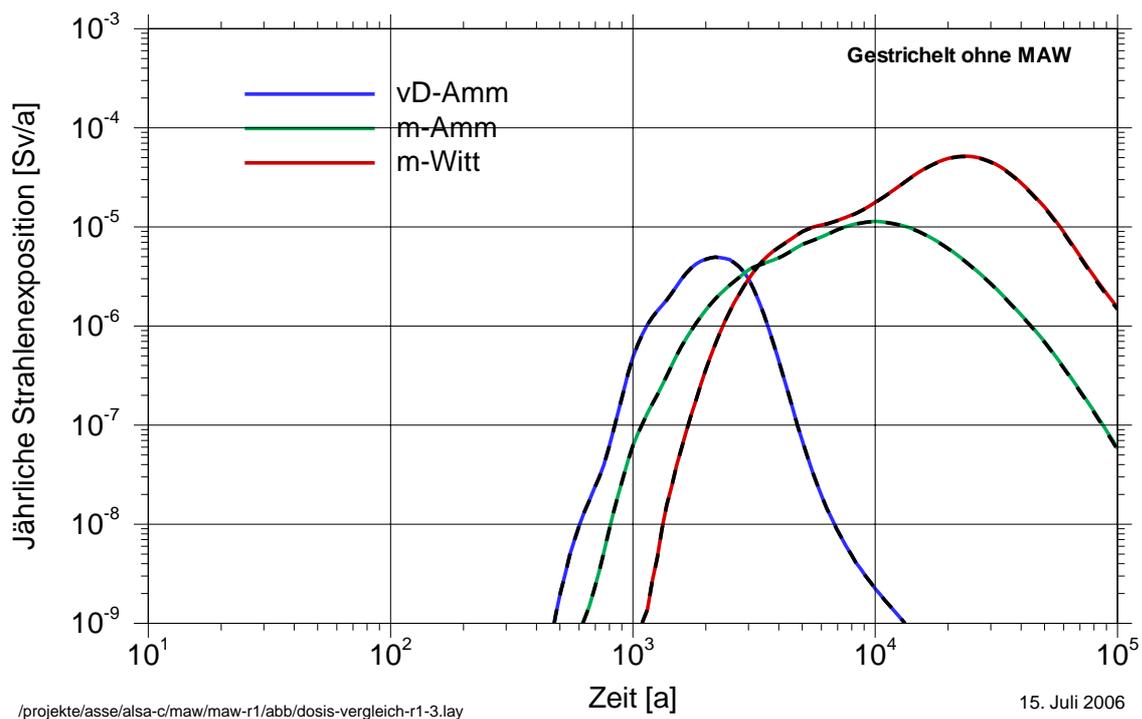


Abb. 7.5-9: Einfluss der Radionuklide aus der MAW-Kammer auf die gesamte potenzielle Strahlenexposition. Szenario LsgMAW /ALSA 2006c/

7.5.7 Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse

Die Unsicherheitsanalyse wurde als Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Dies ist eine bewährte Methode, ist anerkannter Standard für Sicherheitsanalysen von Endlagerstandorten in den Vereinigten Staaten und wird in Deutschland auch im Verfahren für das Endlager Morsleben eingesetzt. Die Modellrechnungen erfolgten unter Verwendung des Programmpakets EMOS /GRS 1999a/, das neben den Modulen LOPOS, ACDEC und EXCON einen Monte-Carlo-Rahmen zur Verfügung stellt. Es wurden die gleichen Module wie in den deterministischen Rechnungen eingesetzt, jedoch wurden für die probabilistischen Rechnungen einige Änderungen an den Programmen vorgenommen, die aber für die deterministischen Rechnungen ohne Auswirkungen sind. Insofern gilt die Qualitätssicherung für LOPOS usw. wie für die deterministischen Rechnungen als erfüllt.

Die Unsicherheitsanalyse wurde so konzipiert, dass möglichst viele Parameter als unabhängige Zufallsgrößen behandelt wurden, um eine zuverlässige Bandbreite der berechneten Konsequenzen unter Berücksichtigung möglichst vieler Unsicherheiten zu erhalten. Dabei wurde in Kauf genommen, dass wegen der Vielzahl der Zufallsgrößen nur eine eingeschränkte Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden konnte, siehe Kapitel 7.5.8. Wegen der langen Rechenzeiten für eine Simulation wurden nur 300 Simulationen durchgeführt. Diese Anzahl ist aus statistischen Gründen ausreichend, um eine Aussage über die Einhaltung des Schutzziels machen zu können. Als Schutzziel der probabilistischen Rechnungen wird ange-
setzt, dass mehr als 90 % der Simulationen bei einem Vertrauensgrad von 90 % unterhalb des Bewertungsmaßstabs von 0,3 mSv/a liegen (siehe Kapitel 3).

In der probabilistischen Unsicherheitsanalyse wurden alle als wesentlich angesehenen Parameter in realistischen Bandbreiten variiert. Die Auswahl der zu variierenden Parameter erfolgte durch GSF und ihre Sachverständigen, die Bandbreiten und die Verteilungsfunktionen der Parameterwerte wurden entweder aus vorliegenden Messwerten und frei zugänglichen Datenbeständen oder durch Expertenschätzung festgelegt. Es wurden insgesamt 487 unabhängige Zufallsgrößen und eine etwa gleich große Anzahl abhängiger Zufallsgrößen verwendet. Ausgangsdatensatz ist derjenige für die kombinierte Variante in /ALSA 2006c/, siehe auch Kapitel 7.5.4. Die ausführliche Diskussion der Ergebnisse in /USA 2006/ wird im Folgenden zusammenfassend dargestellt.

Zur Bewertung des Ergebnisses werden die Summen der Radionuklidbeiträge zur potenziellen Strahlenexpositionen verwendet. Diese werden wie in den deterministischen Rechnungen /ALSA 2006c/ unter Verwendung von Transferfunktionen im Deckgebirge berechnet. Die Auswertung wird für die drei dominierenden Exfiltrationsgebiete durchgeführt.

Tab. 7.5-3: Statistische Kenngrößen der Monte-Carlo-Simulation

Kenngröße	vD-Amm	m-Amm	m-Witt
Medianwert [Sv/a]	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Mittelwert [Sv/a]	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
95 %-Quantil [Sv/a]	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	$7,5 \cdot 10^{-5}$
Maximalwert [Sv/a]	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

vD-Amm: „verstärktes Deckgebirge – Tal der Ammerbeek“;
 m-Amm: „Muschelkalk – Tal der Ammerbeek“;
 m-Witt: „Muschelkalk – Tal von Wittmar“

In der Tabelle 7.5-3 sind die wesentlichen statistischen Kenngrößen für die Stichprobe der **maximalen** potenziellen Strahlenexpositionen angegeben. Der Medianwert ist wie im Basisfall der probabilistischen Unsicherheitsanalyse (=kombinierte Variante (Kapitel 7.5.4) mit Deckgebirgsrechenfall DR14) für das Exfiltrationsgebiet m-Witt am höchsten; die Werte für alle Exfiltrationsgebiete sind etwa gleich groß wie im Basisfall,

Die Mittelwerte und 95 %-Quantile liegen für alle Exfiltrationsgebiete unterhalb des Wertes von 0,3 mSv/a. Der Mittelwert ist für vD-Amm etwa eine Größenordnung höher als die lokale maximale Strahlenexposition der kombinierten Variante, für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete sind die Mittelwerte vergleichbar groß wie die lokalen Maxima in der kombinierten Variante /ALSA 2006c/. Der Unterschied für das Gebiet vD-Amm wird durch die hohen potenziellen Strahlenexpositionen in den Simulationen für den Deckgebirgsrechenfall DR12 verursacht, welcher in der kombinierten Variante nicht betrachtet wird. Auch für das Exfiltrationsgebiet m-Witt spielt der Deckgebirgsrechenfall DR12 eine Rolle, da dieser für die Simulationen mit den niedrigsten Strahlenexpositionen verantwortlich ist.

Für die Exfiltrationsgebiete m-Amm und m-Witt wird der Wert von 0,3 mSv/a in allen Simulationen eingehalten. Für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm wird der Wert von 0,3 mSv/a nur in 8 von 300 Simulationen überschritten. D.h. dieser Wert wird in diesem Fall mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % bei einem Vertrauensgrad von 95 % eingehalten.

Die Bandbreiten der berechneten potenziellen Strahlenexpositionen betragen

- $2,5 \cdot 10^{-8}$ Sv/a bis $1,0 \cdot 10^{-3}$ Sv/a für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm,
- $1,8 \cdot 10^{-6}$ Sv/a bis $9,0 \cdot 10^{-5}$ Sv/a für das Exfiltrationsgebiet m-Amm und
- $2,7 \cdot 10^{-6}$ Sv/a bis $1,0 \cdot 10^{-4}$ Sv/a für das Exfiltrationsgebiet m-Witt,

siehe Abbildung 7.5-10. Für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm ist diese Bandbreite relativ groß, für die beiden anderen Exfiltrationsgebiete klein. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten für vD-Amm ist, dass dieser Ausbreitungspfad stark vom Zeitpunkt des Radionuklidaustritts in das Deckgebirge – und damit von der Transportverzögerung in der Grube – abhängt (vgl. Abbildung 6.8-6) und zudem einen schnellen Transport durch das Deckgebirge ermöglicht, so dass die relativ kurzlebigen Radionuklide Am-241 und Ra-226/Pb-210 für die potenzielle Strahlenexposition bedeutsam sind. Für die anderen Exfiltrationsgebiete ist die Bandbreite derart klein, da die Ausbreitung in diese Gebiete wesentlich schwächer vom Zeit-

punkt des Radionuklidaustritts in das Deckgebirge abhängt und zudem mit einer relativ langen Transportzeit verbunden ist. Dadurch dominieren die langlebigen, wenig von der Transportzeit abhängenden Radionuklide Pu-240 und Pu-239.

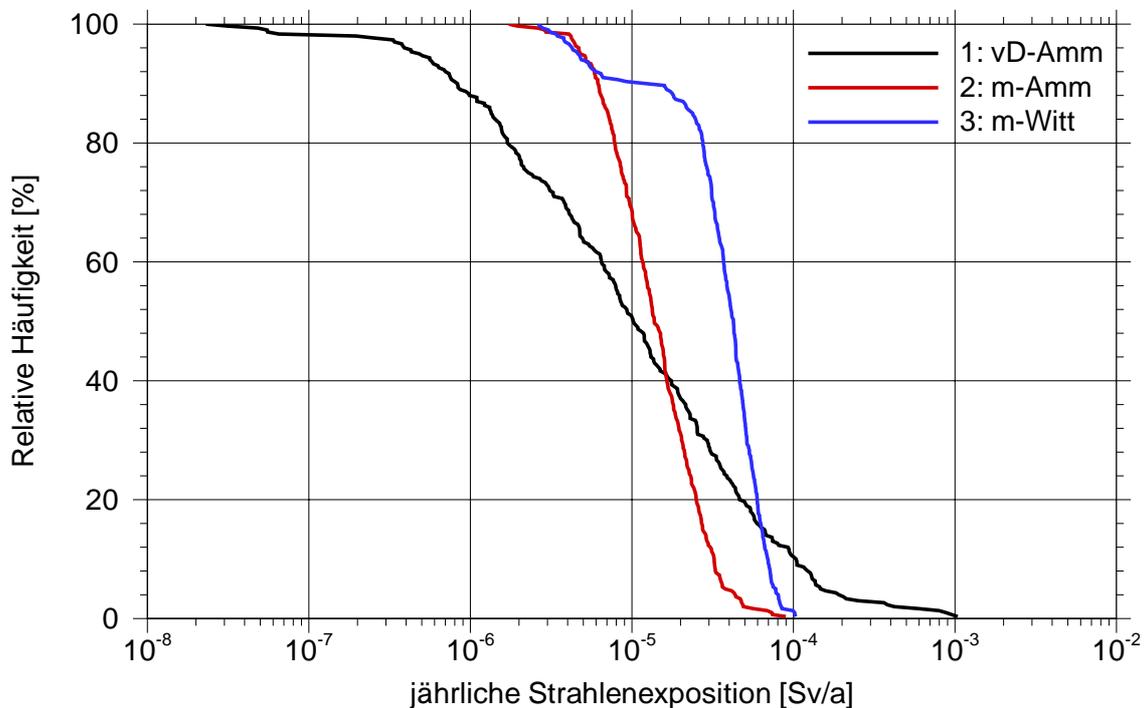


Abb. 7.5-10: Komplementäre kumulative Häufigkeiten der maximalen Strahlenexpositionen /USA 2006/

Aus der engen Verteilung der berechneten potenziellen Strahlenexpositionen für die Exfiltrationsgebiete m-Amm und m-Witt ist zu schließen, dass für diese Ausbreitungspfade das Gesamtsystem robust ist, da große Variationen von Eingangsparametern zu vergleichsweise geringen Reaktionen führen. Für den Ausbreitungspfad in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm gilt diese Aussage nur eingeschränkt.

In den Simulationen mit den höchsten potenziellen Strahlenexpositionen sind die folgenden Eigenschaften des Gesamtsystems in der angegebenen Weise repräsentiert:

- Die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke ist stark.
- Der Anfangswert der Trockenkonvergenzrate ist hoch.
- Die maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium in den Einlagerungsbereichen sind hoch.
- Die Verhältnisse im Deckgebirge werden durch den Deckgebirgs-Rechenfall DR12 repräsentiert.

Umgekehrt sind in den Simulationen mit den geringsten potenziellen Strahlenexpositionen generell die folgenden Eigenschaften des Gesamtsystems in der angegebenen Weise repräsentiert:

- Die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke ist gering.
- Der Anfangswert der Trockenkonvergenzrate ist gering.
- Die maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium in den Einlagerungsbereichen sind gering.
- Es bestehen hydraulisch wirksame Wegsamkeiten durch den Rötquitard in den Muschelkalk (DR13 und DR14).

Alle übrigen Parameter sind bezüglich der maximalen und minimalen Strahlenexpositionen nicht herausragend. Diese Ergebnisse werden durch die Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse in Kapitel 7.5.8 bestätigt. Auch bei den Unsicherheitsbetrachtungen in Kapitel 7.5.5 stellte sich heraus, dass die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke, die Konvergenzrate und die maximal möglichen Elementkonzentrationen unter den entscheidenden Parametern bezüglich des Einflusses auf die potenzielle Strahlenexposition sind. Insofern stimmen die Ergebnisse der probabilistischen Unsicherheitsanalyse mit den Ergebnissen der deterministischen Parametervariationen überein.

In Deutschland existieren keine gesetzlichen Vorgaben, wie die Ergebnisse probabilistischer Unsicherheitsanalysen zu bewerten sind, so dass die Bewertung im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens Neuland betritt. Allerdings wird seit einiger Zeit über den Einbezug von Aspekten der Probabilistik in die Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle diskutiert. In den Vereinigten Staaten von Amerika sind probabilistische Verfahren Standard bei der Sicherheitsbewertung. Dort wird gefordert, dass – bei einer Betrachtung aller relevanten Szenarien – die berechnete Strahlenexposition mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 90 % unter dem Schutzziel (Richtwert) und zu mehr als 99,9 % unter dem 10-fachen des Schutzziels liegt. Bei Anwendung dieses Bewertungsverfahrens für Ergebnisse von probabilistischen Rechnungen in Verbindung mit dem für den Standort Asse gültigen radiologischen Schutzziel „Wert des § 47 der Strahlenschutzverordnung von 0,3 mSv/a“ ergibt sich aus den Ergebnissen der durchgeführten Rechnungen, dass die radiologische Langzeitsicherheit der verschlossenen Schachanlage Asse II gegeben ist⁴¹.

7.5.8 Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der in Kapitel 7.5.7 dargestellten Unsicherheitsanalyse wurden bezüglich der sensitiven Parameter ausgewertet. Die Ergebnisse dieser globalen Sensitivitätsanalyse sind ebenfalls in /USA 2006/ dargestellt. Wegen der für diese Zielsetzung geringen Anzahl der Simulationen und der Vielzahl der unabhängigen Zufallsgrößen sind nur eingeschränkte

⁴¹ Da nur 300 Simulationen durchgeführt wurden, ist keine Aussage zum 99,9 %-Kriterium möglich.

Aussagen über die Sensitivität aller Parameter, d.h. zum Aufstellen einer Reihenfolge der Wichtigkeit möglich, jedoch wurden die wichtigsten Zufallsgrößen identifiziert.

Tabelle 7.5-4 zeigt die fünf wichtigsten Zufallsgrößen. In der ersten Spalte sind die Summen über die Bedeutungsranke, ermittelt über die beiden Sensitivitätsschätzer angegeben. Die Zahlen in den restlichen Spalten sind Bedeutungsranke, wobei der Rang 1 die höchste Bedeutung anzeigt. Es werden nur Ergebnisstichproben der maximalen Strahlenexpositionen unabhängig vom Zeitpunkt ihres Auftretens ausgewertet.

Tab. 7.5-4: Rangfolge ausgewählter unabhängiger Zufallsgrößen für die Stichprobe der maximalen Strahlenexpositionen (Auszug aus /USA 2006/)

Summe *			Zufallsgröße	Spearman-Test			Smirnov-Test		
vD-Amm	m-Amm	m-Witt		vD-Amm	m-Amm	m-Witt	vD-Amm	m-Amm	m-Witt
8	2	2	Kanalisation im Baufeld in der Südflanke	1	1	1	7	1	1
5	4	96	Referenzwert Trockenkonvergenzrate, p=0	2	2	8	3	2	88
4	14	198	Auswahl des Deckgebirgstransports	3	11	4	1	3	194
382	41	4	Max. mögliche Konzentration Pu in LAW3	263	3	2	119	38	2
298	15	14	Anzahl aktiver Austrittsstellen	151	6	6	146	9	8

*) erste Spalte: Summe der Bedeutungsranke für die maximalen Strahlenexpositionen (jeweils zwei Ränge der Spalten 5 bis 10)

Bei vier der fünf ausgewählten Zufallsgrößen handelt es sich um die gleichen, die bereits im Kapitel 7.5.7 angesprochen wurden, als es um die Ursachen für die Simulationen mit den höchsten und den geringsten berechneten Strahlenexpositionen ging. Diese sind in allen bisherigen Modellrechnungen die mit der höchsten Relevanz. Von beiden Schätzern wird die Kanalisation im Baufeld in der Südflanke als der wichtigste Parameter identifiziert, gefolgt von dem Referenzwert für die Trockenkonvergenzrate. Die Auswahl des Deckgebirgstransports ist vor allem für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm von großer Relevanz, weil dort die Kombination mit dem Deckgebirgsrechenfall DR12 zu den höchsten potenziellen Strahlenexpositionen führt. Die maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium in den Einlagebereichen, insbesondere in LAW3, sind gemäß dieser Auswertung nur für die Exfiltrationsgebiete m-Witt und m-Amm relevant. Der Effekt des Quellterms wird allerdings durch mehrere unabhängige Zufallsgrößen abgebildet, die jede für sich nicht zu den wichtigsten Zufallsgrößen gehören, aber in der Summe doch die Strahlenexposition relevant beeinflussen können. Die fünfte ausgewählte Zufallsgröße ist nur für die Exfiltrationsgebiete m-Amm und m-Witt von Bedeutung.

Abbildung 7.5-11 zeigt als Beispiel einen Scatterplot für die Zufallsgröße „Kanalisation im Baufeld in der Südflanke“ für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm, d.h. für die Simulationen mit den größten Variationsbreiten der berechneten Strahlenexpositionen (vgl. Abbildung 7.5-10). Es ist deutlich zu erkennen, dass mit abnehmender Breite, d.h. mit zunehmender Kanalisation die zu erwartende potenzielle Strahlenexposition deutlich zunimmt. Für die Parameterwerte an der oberen und unteren Bandbreite der Kanalisation beträgt die Zunahme mehr

als 2 Größenordnungen; im Mittel, d.h. unter Annahme einer Ausgleichsgeraden, liegt diese etwa zwischen 10^{-6} Sv/a und 10^{-4} Sv/a. Die hohen Werte der potenziellen Strahlenexposition zwischen $1,5 \cdot 10^{-4}$ Sv/a und 10^{-3} Sv/a sind den Simulationen mit dem Deckgebirgsrechenfall DR12, die mit den niedrigen Werten der potenziellen Strahlenexposition unterhalb 10^{-7} Sv/a den Simulationen mit dem Deckgebirgsrechenfall DR13 zuzuordnen.

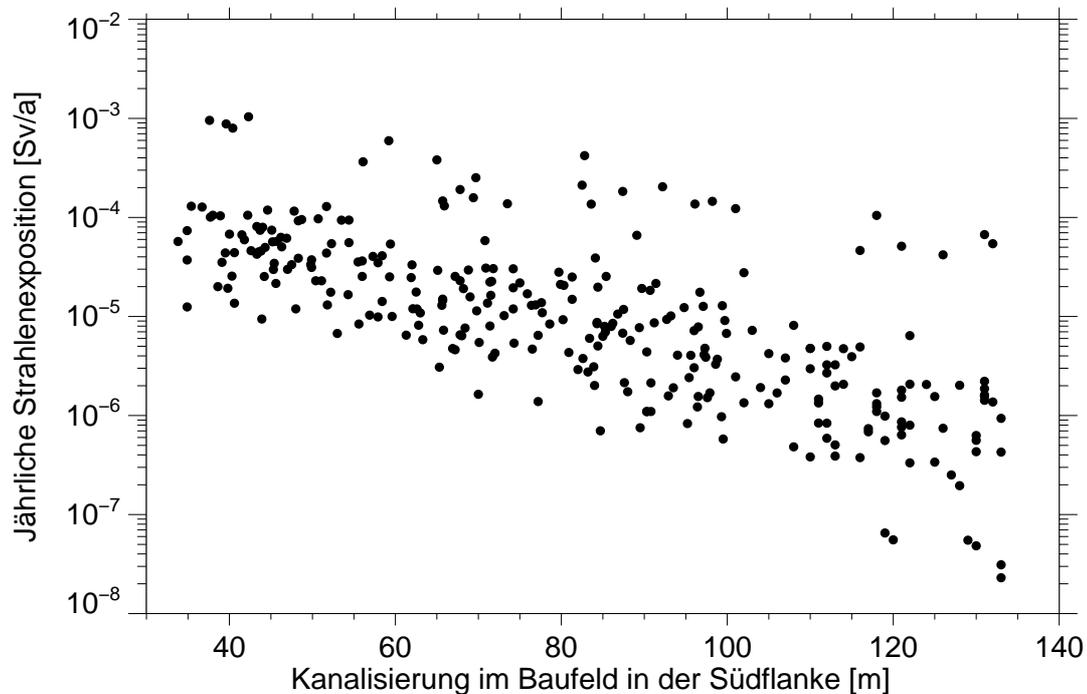


Abb. 7.5-11: Scatterplot für die Kanalisation im Baufeld in der Südflanke für das Gebiet vD-Amm /USA 2006/ (Breite des Strömungspfad als Maß für die Kanalisation)

Für die anderen Exfiltrationsgebiete zeigen die Scatterplots für die Kanalisation ein weniger ausgeprägtes Verhalten, d.h. die Streubreite der berechneten Strahlenexpositionen ist im Mittel geringer und beträgt nur rund eine Größenordnung.

7.5.9 Schlussfolgerungen

Die Schlussfolgerungen aus den deterministischen und probabilistischen Rechnungen zu den potenziellen Strahlenexpositionen über den Lösungspfad betreffen folgende Themen:

- Robustheit des Systems

Alle deterministischen Parametervariationen (Unsicherheitsbetrachtungen) zeigen eine Variation der berechneten potenziellen Strahlenexposition in einer Bandbreite von ca. einer Größenordnung. Die meisten Parameter führen in den deterministischen Rechnungen zu geringeren bis sehr viel geringeren Änderungen der berechneten Strahlen-

expositionen, als diese Bandbreite angibt. In der probabilistischen Unsicherheitsanalyse beträgt die Streubreite der Verteilung der maximalen Strahlenexpositionen für die Freisetzung in die Exfiltrationsgebiete m-Amm und m-Witt ca. zwei Größenordnungen, ist also gering. Gemessen an der Freisetzung in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm ist die Streubreite größer und das Gesamtsystem zeigt sich als weniger robust. Ursachen sind die deutlich stärkere Abhängigkeit von der Transportverzögerung in der Grube und der größere Einfluss der relativ kurzlebigen Radionuklide ^{241}Am und $^{226}\text{Ra}/^{210}\text{Pb}$. Das weniger robuste Verhalten des Systems, welches sich in der potenziellen Strahlenexposition im Exfiltrationsgebiet vD-Amm zeigt, ist aber von geringer Bedeutung, wenn die berechnete Strahlenexposition niedrig ist. Dies ist in der Mehrzahl der Fälle der Fall (vgl. Abb. 7.5-10). In der globalen Sensitivitätsanalyse haben sich die meisten Parameter – mit drei bis vier Ausnahmen – als wenig sensitiv gezeigt. Eine weitergehende Diskussion zu der Robustheit und ihren Ursachen erfolgt in Kapitel 8.3.2.

- Das radiologische Schutzziel wird eingehalten

In allen deterministischen Rechnungen liegt die potenzielle Strahlenexposition unterhalb des Wertes des § 47 der Strahlenschutzverordnung. Da dieser Wert einen gesetzlichen Rahmen für zukünftige Planfeststellungsverfahren zur Genehmigung von radioaktiven Endlagern bietet, ist er auch auf die Situation der Schachtanlage Asse II anwendbar.

- Wenige Parameter und Prozesse dominieren die radiologischen Konsequenzen

In den deterministischen und in den probabilistischen Rechnungen hat sich gezeigt, dass einige Parameter und Prozesse das Systemverhalten dominieren. Dies sind im Wesentlichen die gleichen wie bei der Diskussion der Robustheit:

1. die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke, d.h der fließwirksame Querschnitt in vertikaler Richtung
2. die Konvergenz, insbesondere die anfänglichen Konvergenzraten
3. der Transport im Deckgebirge, insbesondere die Verdünnung und die Transportzeit
4. der Radionuklid-Quellterm, insbesondere die maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium

- Das Gesamtsystem bietet wenige effektive Ansatzpunkte zur Optimierung bezüglich des Schadstofftransports.

Ein negativer Aspekt der Robustheit ist die Tatsache, dass das Gesamtsystem wenig Spielraum für Optimierungen bietet. Wie durch die Parametervariationen gezeigt, liegen die berechneten Konsequenzen für das Gesamtsystem in einer engen Bandbreite.

In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der berechneten Konsequenzen für das bestehende Nachweis- und Schließungskonzept bewertet.

7.6 Potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre über den Gaspfad

Die großen Mengen an Metallen und organischen Verbindungen, welche mit den Abfällen in das Grubengebäude eingebracht wurden, werden aufgrund von Korrosion und mikrobieller Zersetzung zur Bildung entsprechend großer Gasmengen führen (vgl. Kapitel 6.3 und /IST 2004/, /IST 2005b/). Die Gase fließen in der Grube vom Ort ihres Entstehens gegen das Grubenhöchste ab, wobei ein Teil im Porenraum des Versatzes gespeichert wird. Im oberen Teil des Grubengebäudes bildet sich ein Gaspolster aus. Wenn das Gaspolster die oberste Wegsamkeit durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in 500 m Teufe erreicht, fließt das Gas in das Deckgebirge ab (Referenzszenario). In einem alternativen Szenario, bei dem die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere bis in das Grubenhöchste in 474 m Teufe reicht, kann Gas im Grubenhöchsten aus dem Grubengebäude abfließen und das Gaspolster aus diesem Grund deutlich kleiner ausfallen. In einem weiteren alternativen Szenario wird betrachtet, dass einer oder beide Verschlüsse der Tagesschächte weniger dicht sind, so dass der Gasabfluss entlang der Tagesschächte erfolgt (vgl. Kapitel 5.2.3). Im Deckgebirge steigt Gas entlang der vorliegenden Wegsamkeiten weiter auf und gelangt schließlich in die Biosphäre.

Mit dem Gas können auch Radionuklide als gasförmige Verbindungen bis in die Biosphäre gelangen, die Freisetzung wird als solche über den „Gaspfad“ bezeichnet. Die potenziellen Konsequenzen für diesen Freisetzungspfad wurden untersucht. Dies erfolgte mit einem Modellansatz, welcher an die Modellergebnisse für die Fluidbewegungen im Grubengebäude mit dem numerischen Modell KAFKA anknüpft (siehe Kapitel 7.5). Das konzeptuelle Modell für den Gaspfad, die Parameter und die Ergebnisse der Modellrechnungen sind in /COL 2006f/ im Detail dargestellt, hier folgt eine Übersicht über die Grundlagen und die Ergebnisse.

7.6.1 Konzeptuelles Modell

Das konzeptuelle Modell stützt sich im Wesentlichen auf die folgenden Systemkomponenten und Prozesse:

- den Übergang von volatilen Radionukliden in die Gasphase, eingeschränkt durch das chemische Milieu,
- den Beginn und die Rate des Gasaustritts aus der Grube in das Deckgebirge gemäß Modellrechnungen mit KAFKA,
- den unverzögerten Aufstieg der Gasphase durch das Deckgebirge ohne Minderung durch Lösungsprozesse,
- die teilweise Auflösung von radioaktiven Komponenten des Gases, insbesondere ^{14}C -Methan ($^{14}\text{CH}_4$), in oberflächennahem Grundwasser, mit welchem ein Fischteich gespeist wird, und der anschließende Verzehr von Fisch,

- die vollständige mikrobielle Oxidation des $^{14}\text{CH}_4$ zu $^{14}\text{CO}_2$ in den ungesättigten Bodenschichten vor dem Eintreten in die Atmosphäre und
- die Inhalation von $^{14}\text{CO}_2$ und die Ingestion von Nahrungsmitteln, welche aufgrund der Assimilation von $^{14}\text{CO}_2$ aus der Luft durch Pflanzen ^{14}C enthalten.

Hierbei werden sowohl verschiedene Entwicklungen des Systemverhaltens (Szenarien) im Nahfeld des Standorts Asse /COL 2006b/ als auch drei unterschiedliche Szenarien für die Freisetzung in die Biosphäre und die resultierende potenzielle Strahlenexposition von Einzelpersonen berücksichtigt.

Relevante Radionuklide

Die folgenden Radionuklide im Abfallinventar können gasförmige Verbindungen bilden: ^3H (Tritium), ^{14}C (Radiokohlenstoff), ^{129}I und ^{222}Rn . Unter Berücksichtigung von eingelagertem Aktivitätsinventar und entsprechender Radiotoxizität, den chemischen Bedingungen in den Einlagerungskammern und im Nahfeld, den Halbwertszeiten und der minimalen Zeit bis zum beginnenden Gasübertritt aus der Grube in das Deckgebirge ist nur das ^{14}C als $^{14}\text{CH}_4$ für die Radionuklidfreisetzung auf dem Gaspfad von Bedeutung /COL 2006f/.

Nahfeld

Die Rate, mit welcher das ^{14}C über den Gaspfad aus der Grube freigesetzt wird, wird auf Grundlage der folgenden Annahmen berechnet:

- Die Gasbildung setzt zum Zeitpunkt des Einleitens von Schutzfluid in die Abbaue mit gasbildenden Stoffen ein; es werden die unter realistischen Bedingungen ermittelten Gasbildungsraten, einschließlich der Bandbreiten, verwendet (vgl. Kapitel 6.3).
- Das gesamte ^{14}C -Inventar der Abfälle, d.h. sowohl das in anorganischen als auch das in organischen Verbindungen vorliegende ^{14}C , wird zum Zeitpunkt des Schachtverschlusses instantan und vollständig mobilisiert bzw. umgesetzt, wobei 46 % $^{14}\text{CO}_2$ und 54% $^{14}\text{CH}_4$ entstehen⁴².
- Das $^{14}\text{CO}_2$ wird größtenteils als Carbonat gefällt; der verbleibende gasförmige Anteil ist gegenüber dem $^{14}\text{CH}_4$ von vernachlässigbarer Bedeutung.
- Die Verminderung des gasförmigen Anteils an $^{14}\text{CH}_4$ durch Lösung in der Grube wird vernachlässigt.

⁴² Bei der mikrobiellen Umsetzung von Cellulose entstehen theoretisch gleiche Teile an CO_2 und CH_4 (vgl. Kapitel 6.3 und /IST 2005b/). Bei der anaeroben mikrobiellen Degradation organischer Abfälle in Deponien ist der Methananteil etwas höher. Oxidierende Substanzen in den Einlagerungskammern (Nitrat, Sulfat, Fe(III)) dagegen können den CO_2 -Anteil erhöhen. Der Anteil für $^{14}\text{CH}_4$ von 54% überschätzt sehr wahrscheinlich die tatsächlich gebildeten $^{14}\text{CH}_4$ -Mengen, da nicht berücksichtigt wird, dass ein Teil des ^{14}C in den Abfällen bereits in carbonatischer Form vorliegt, dass das ^{14}C vermutlich in leicht mikrobiell umsetzbaren Verbindungen vorliegt und daher abgebaut wird, wenn noch größere Mengen an Oxidantien vorliegen, was den $^{14}\text{CO}_2$ -Anteil deutlich erhöhen dürfte, und dass eine vollständige Umsetzung des ^{14}C enthaltenden organischen Materials zu Gas wenig plausibel ist.

- Das $^{14}\text{CH}_4$ mischt sich vollständig mit den übrigen Gasen; dabei werden die Beiträge aus allen Kammern in vollem Umfang berücksichtigt. Die ^{14}C -Konzentration im Gas errechnet sich aus 54 % des ^{14}C -Inventars der Abfälle, das gemäß der zweiten und vierten Annahme in $^{14}\text{CH}_4$ übergeht, und der gebildeten Gesamtgasmenge zum Zeitpunkt des Gasaustritts aus dem Grubengebäude.

Der Transport des Gases innerhalb und aus der Grube berücksichtigt die unterschiedlichen Entwicklungen des Systems im Nahfeld /COL 2006b/. Die Modellergebnisse für den Gastransport spiegeln die möglichen Entwicklungen des Systems wider und beruhen auf den Resultaten der Modellrechnungen mit dem Programm KAFKA /ALSA 2005a/, /ALSA 2006c/:

- Referenzfall der Szenariengruppe des Referenzszenarios (Rechenfall R8-K),
- Variante der Szenariengruppe „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ (R.V10-K),
- Variante der Szenariengruppe „Gasabfluss entlang Tagesschächte“ (R.V7-K),
- kombinierte Variante der Szenariengruppe des Referenzszenarios⁴³ mit Gasbildung wie im Referenzfall und Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten (RX.5-K),
- Variante mit Gasbildung bei maximaler CO_2 -Bildung und Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten (RX.13-K).

Deckgebirge

Dem Deckgebirge wird keine Barrierenwirkung zugeschrieben, d.h. Transportverzögerung, Lösungsprozesse und andere, den Radionuklidfluss mindernde Prozesse beim Aufstieg des Gases durch das Deckgebirge werden vernachlässigt.

Biosphäre

Gasförmig in die Atmosphäre freigesetztes ^{14}C kann auf unterschiedliche Weise zu einer Strahlenexposition führen: (i) durch Inhalation sowie (ii) durch Assimilation von Pflanzen, wodurch es in die Nahrungskette gelangt, und die anschließende Ingestion daraus erzeugter Nahrungsmittel. Im konzeptuellen Modell wird angenommen, dass zuvor das $^{14}\text{CH}_4$ in den ungesättigten Bodenschichten mikrobiell vollständig zu $^{14}\text{CO}_2$ oxidiert wird. Diese Annahme ist konservativ, da Methan im Gegensatz zu Kohlendioxid von Pflanzen gar nicht und vom Menschen nur zu einem sehr kleinen Teil metabolisiert wird.

Ein Teil des gasförmig aus dem Deckgebirge aufgestiegenen ^{14}C kann sich im Grund- oder Oberflächenwasser lösen. Dadurch verringert sich die direkte Freisetzung in die Atmosphäre, aber das gelöste ^{14}C führt zu weiteren Expositionspfaden über Wasser (vgl. Kapitel 6.9). Die teilweise Auflösung von aufsteigendem Methan in einem Oberflächengewässer und der Verzehr von Fischen aus lokaler Fischzucht in einem solchen Gewässer sind nicht mit Sicherheit

⁴³ Die entscheidenden Änderungen gegenüber dem Referenzfall bezüglich des Gaspfades sind der rasche Gasabfluss aus LAW1B und die Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten.

auszuschließen. Da eine Aufnahme von ^{14}C durch Pflanzen nur aus der Luft möglich ist und da die Ingestion von $^{14}\text{CH}_4$ oder $^{14}\text{CO}_2$ mit dem Trinkwasser zu deutlich geringeren Dosisbeiträgen führt als der Verzehr von Nahrungsmitteln nach der Assimilation durch Pflanzen, wird hier nur die Exposition über die Akkumulation von ^{14}C in der Nahrungskette des Fischteichs betrachtet.

Für das wahrscheinliche Biosphärenszenario einer flächenhaften Freisetzung des $^{14}\text{CO}_2$ in die bodennahe Luftschicht über einer landwirtschaftlichen Nutzfläche⁴⁴ wurde die entsprechende Modellierung von /GSF 2006i/ zu Grunde gelegt. Die dort aus normierten Freisetzungsraten ermittelten Strahlenexpositionen für Einzelpersonen wurden als Dosiskonversionsfaktoren angewandt⁴⁵. Der Dosisbeitrag durch Inhalation von $^{14}\text{CO}_2$ ist für dieses Szenario aufgrund atmosphärischer Verdünnung im Vergleich zu jener über die Assimilation durch Pflanzen von untergeordneter Bedeutung.

Neben dem wahrscheinlichen Biosphärenszenario wird die Möglichkeit betrachtet, dass mit Grundwasser, in dem sich gasförmig aufsteigendes $^{14}\text{CH}_4$ gelöst hat, ein Fischteich gespeist wird. Bei der Berechnung der potenziellen Strahlenexposition wird zudem vereinfachend angenommen, dass der Fischteich ausschließlich durch ^{14}C -haltiges Grundwasser gespeist wird und dass die ^{14}C -Konzentration im Wasser auf dem Weg in den Fischteich nicht durch Ausgasen abnimmt. Der Dosiskoeffizient für diesen Expositionspfad „Fischteich“ wird aus /GSF 2006i/ übernommen.

Des Weiteren wird ein drittes, als wenig wahrscheinlich eingeschätztes Biosphärenszenario betrachtet, bei dem der gesamte Gasfluss aus dem Deckgebirge bzw. aus der Grube direkt und kanalisiert in den Keller eines Einfamilienhauses erfolgt. Dabei errechnet sich die potenzielle Strahlenexposition aus dem Luftvolumen des Hauses, der Lüftungsrate, der mittleren Atemrate, der täglichen Verweildauer der betroffenen Personen im Haus und dem Dosiskoeffizienten für die Inhalation von $^{14}\text{CO}_2$. Das Modell ist in /COL 2006f/ erläutert.

7.6.2 Berechnungsmodelle

Der zeitliche Verlauf des Gasübertritts aus der Grube in das Deckgebirge ist Resultat von Modellrechnungen mit KAFKA (vgl. Kapitel 7.5 und /ALSA 2005a/, /ALSA 2006c/). Weitere Computermodelle werden nicht benötigt. Die Berechnungen der möglichen Exposition durch ^{14}C erfolgen mit einfachen, analytischen Modellansätzen.

7.6.3 Ergebnisse der Modellrechnungen

Der Gasaustritt aus der Grube beginnt im Referenzfall nach ca. 1 500 Jahren, in den alternativen Szenarien bzw. Rechenfällen nach 150 bis 750 Jahren und erreicht bald darauf ihr Ma-

⁴⁴ Modellrechnungen der GRS zeigen, dass eine punktförmige Freisetzung von Gas unter Berücksichtigung der Expositionspfade Landwirtschaft und Inhalation zu deutlich geringeren Strahlenexpositionen führt.

⁴⁵ Für die Berechnung wurde die Bezugsfläche aus Gründen der Konservativität auf 1 ha reduziert und entsprechend ein 10fach höherer Dosiskonversionsfaktor als in /GSF 2006i/ berechnet verwendet.

ximum (Tabelle 7.6-1). Die berechneten Gasflüsse liegen im Bereich einiger tausend $\text{m}^3_{\text{STP/a}}$, die Austrittsraten für ^{14}C zwischen 10^9 und 10^{10} Bq/a, was für das wahrscheinliche Biosphärenszenario „Landwirtschaft“ zu einer Strahlenexposition zwischen $7 \cdot 10^{-7}$ Sv/a im Referenzfall und $9 \cdot 10^{-6}$ Sv/a für das ungünstigste Szenario mit einer vergrößerten Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere führt.

Für das wenig wahrscheinliche Biosphärenszenario einer Freisetzung in ein Wohnhaus sind die berechneten Strahlenexpositionen um den Faktor 7,5 höher als beim wahrscheinlichen Biosphärenszenario.

Die höchsten potenziellen Strahlenexpositionen ergeben sich für das Biosphärenszenario „Fischteich“ und liegen zwischen $1,1 \cdot 10^{-4}$ Sv/a für den Referenzfall und $2,3 \cdot 10^{-4}$ Sv/a für das Szenario mit einer vergrößerten Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere. Die berechneten Dosiswerte sind weniger stark von den Nahfeldszenarien abhängig, weil sie in erster Linie durch die ^{14}C -Konzentration im freigesetzten Gas beeinflusst werden und nur untergeordnet von der Gasfreisetzungsrate bzw. der Freisetzungsrate von $^{14}\text{CH}_4$ abhängen.,

Tab. 7.6-1: Potenzielle Strahlenexposition für über den Gaspfad freigesetztes ^{14}C für verschiedene Szenarien /COL 2006f/

Rechenfall	t_{max}^1	Dosis (Landwirtschaft)	Dosis (Haus)	Dosis (Fischteich)
	[a]	[Sv/a]	[Sv/a]	[Sv/a]
Referenzfall der Szenariengruppe des Referenzszenarios	2 050	$7 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Variante der Szenariengruppe „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“	400	$9 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$
Variante der Szenariengruppe „Gasabfluss entlang Tagesschächte“	1 850	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Kombinierte Variante, wie Referenzfall mit Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten	1 150	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Variante mit Gasbildung bei maximaler CO_2 -Bildung und Sorelbetonverfüllung im Grubenhöchsten	150	$7 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$

¹ t_{max} : Zeitpunkt des maximalen Gasübertritts aus dem Grubengebäude gemäß Modellrechnung

Die Berechnungen sind durch abdeckende Parametrisierungen für die Ausbreitung von ^{14}C im Gesamtsystem geprägt. Das betrifft die Verfügbarkeit in der Gasphase, insbesondere aber auch die Rückhaltung im Deckgebirge, die Auflösung im oberflächennahen Grundwasser und die Vernachlässigung einer anschließenden Ausgasung.

7.6.4 Konsequenzen

Die potenzielle Strahlenexposition durch Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad wurde einerseits für wahrscheinliche Systementwicklungen in der Grube (Szenariengruppe des Referenzszenarios) und für plausible Verhältnisse in der Biosphäre am Ort der Freisetzung, die Ausgasung in eine landwirtschaftlich genutzte Fläche, betrachtet. Die berechneten Strahlenexpositionen betragen $7 \cdot 10^{-7}$ Sv/a und $2,1 \cdot 10^{-6}$ Sv/a, die Werte liegen rund um den Faktor 100 bzw. 400 unter dem Bewertungsmaßstab von 0,3 mSv/a.

Daneben wurden ungünstige, weniger wahrscheinliche Nahfeld-Szenarien und Verhältnisse in der Biosphäre quantitativ ausgewertet. Die letzteren sind einerseits die kanalisierte Freisetzung des aufsteigenden Gases aus der Grube in ein Wohnhaus und andererseits die Speisung eines Fischteichs mit Wasser, das ^{14}C aus der aufsteigenden Gasphase durch Lösung aufgenommen hat. Die höchste ermittelte Strahlenexposition ergibt sich für die Kombination des repräsentativen Szenarios aus der mäßig wahrscheinlichen Szenariengruppe „vergrößerte Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ mit der Annahme, dass ein Fischteich ausschließlich durch Wasser gespeist wird, das zuvor ins Sättigungsgleichgewicht mit dem ^{14}C -Gehalt in der aufsteigenden Gasphase gelangt ist. Die für diese Kombination berechnete Strahlenexposition liegt im Bereich des Bewertungsmaßstabs von 0,3 mSv/a, rechnerisch knapp darunter. Für die anderen Nahfeld-Szenarien sind die berechneten Strahlenexpositionen für den Expositionspfad Fischteich unter den getroffenen Annahmen um einen Faktor 2 bis 3 niedriger als der Bewertungsmaßstab. Die berechneten Strahlenexpositionen bei der wenig wahrscheinlichen direkten und kanalisierten Freisetzung in ein Wohnhaus sind systematisch geringer.

In der Konzeptualisierung, welche wahrscheinliche Verhältnisse beschreibt, liegt die berechnete potenzielle Strahlenexposition damit um fast drei Größenordnungen unterhalb des Bewertungsmaßstabs von 0,3 mSv/a, in der ungünstigsten Kombination von Nahfeldszenario und Biosphäre im Bereich dieses Werts, rechnerisch knapp darunter. In Anbetracht der konservativen Vereinfachungen, mit denen der zuletzt angesprochene Wert ermittelt wurde, kann das Schutzziel für die Ausbreitung über den Gaspfad als eingehalten bewertet werden.

7.7 Kritikalitätssicherheit

Die eingelagerten Abfälle enthalten zum Teil spaltbare Uran- und Plutoniumisotope. Sobald diese Abfälle in Kontakt mit dem Schutzfluid kommen, beginnen Korrosionsprozesse, die zur Zersetzung der Abfallprodukte und zur Bildung neuer, thermodynamisch stabiler Festphasen führen. Im Laufe dieser Reaktionen könnten sich lokal Aufkonzentrierungen von Kernbrennstoffen ergeben, wodurch prinzipiell die Bildung kritischer Anordnungen und damit das Auftreten von Exkursionen möglich werden. Nachfolgend wird dargelegt, dass dies in der Schachanlage Asse II ausgeschlossen werden kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Kritikalitätssicherheit für die Schachanlage Asse II sind im Bericht /INE 2006c/ dargestellt. Für den Nachweis der Kritikalitätssicherheit wurde als Bewertungsgröße der Neutronenmultiplikationsfaktor für unendlich ausgedehnte homogene Systeme K_{inf} verwendet, der für die hier anzunehmenden Randbedingungen mit einer

klassischen Näherungsformel berechnet wurde. Die maximale Unterschätzung von K_{inf} durch die Näherungsformel wurde durch einen Vergleich mit den Ergebnissen verfeinerter Rechnungen mit dem Programmsystem ERANOS /DOR 1993/ ermittelt. Dieser Code ist eine Gemeinschaftsentwicklung französischer, britischer und deutscher Forschungseinrichtungen und der kerntechnischen Industrie, mit dem vielfältige Berechnungen für Schnelle und Thermische Neutronensysteme durchgeführt wurden, und der extensiv für reaktorphysikalische Fragestellungen verwendet wird. Die Verwendung der Näherungsformel in Verbindung mit ERANOS ist auch im vorliegenden Fall angemessen und entspricht dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Im Sinne der Robustheit des Sicherheitsnachweises wurden zusätzlich einfache, technische Kritikalitätskriterien für die Masse und Konzentration von Kernbrennstoffen herangezogen, mit denen ebenfalls die Bildung kritischer Anordnungen ausgeschlossen werden kann.

7.7.1 Inventar kritikalitätsrelevanter Stoffe

Für Kritikalitätsbetrachtungen relevant sind nur die Isotope ^{235}U und ^{239}Pu , die in Anwesenheit von wässrigen Lösungen ein Potenzial für Kritikalität besitzen. Für die Kritikalität des Inventars (Tabelle 7.7-1, Spalten 2-4) ist zumeist das mengenmäßig dominierende ^{235}U maßgeblich. Bei Plutonium wird konservativ unterstellt, dass dieses ausschließlich als ^{239}Pu vorliegt. Der maximale, inventarbezogene Anreicherungsfaktor beträgt 3,3% für die Kammer 7/750. In den übrigen Kammern entsprechen die Anreicherungsfaktoren denen von Natururan, siehe Tabelle 7.7-1, Spalte 5.

Die Wahrscheinlichkeit der Entstehung kritischer Anordnungen wird durch Neutronenabsorber verringert. Das natürliche Chlor-Isotopengemisch stellt wegen seines hohen Absorptionsquerschnitts für thermische Neutronen von $33,6 \text{ barn} = 33,6 \cdot 10^{-28} \text{ m}^2$ einen effektiven Neutronenabsorber dar, der in so großer Menge nur in Salzformationen anzutreffen ist. Andere, ebenfalls im Salzgestein vorhandene Neutronenabsorber wie Bor, Natrium und Wasserstoff sind demgegenüber vernachlässigbar.

Tab. 7.7-1: Inventar, Anreicherung und maximaler Austrag der Kernbrennstoffe (Erläuterungen zu den Spalten im Text, einschließlich Kapitel 7.7.2)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Kammer	U_{tot}	^{235}U	Pu_{tot}	Anreicherungs faktoren			Lösungs- aus- tausch	max. U/Pu Austrag
	[kg]	[kg]	[kg]	Inv.	Lösg.	Austr.		
				[%]			[m ³]	[kg]
1/750	23 568	172,73	1,40	0,7	1,0	1,0	2 120	2,0
2/750	191	1,27	0,96	1,2	0,9	0,9	1 726	1,6
4/750	16 632	115,93	0,00	0,7	0,7	0,7	3 411	3,2
5/750	243	2,44	0,73	1,3	2,2	2,2	6 335	6,1
6/750	214	1,57	1,70	1,5	1,0	1,0	5 600	5,3
7/750	122	1,15	2,97	3,3	1,2	1,2	6 700	6,4
8/750	28 387	195,10	0,28	0,7	1,9	1,9	4 600	4,4
10/750	1 068	12,41	0,01	1,2	2,4	1,4	4 800	4,6
11/750	809	6,98	1,65	1,1	1,1	1,1	3 986	3,8
12/750	1 197	8,23	0,98	0,8	0,9	0,9	3 549	3,4
2/750-Na2	21 663	78,51	0,12	0,4	2,3	1,4	11 300	10,9
2/725-Na2	7 879	57,76	0,34	0,7	1,0	1,0	7 523	7,2
8a/511	152	2,35	0,60	2,0	2,1	2,1	2 531	2,4

7.7.2 Lösung, Mobilisierung- und Aufkonzentration der Kernbrennstoffe

Bei der Korrosion von zementierten Abfällen werden, je nach anstehendem pH-Wert, chloridhaltige Feststoffe gebildet. Diese sind die Sorel-Phasen und Friedel'sches Salz, das durch Einbau von Chlorid in Zementphasen gebildet wird /INE 2006a/.

Die Mobilisierung des Urans und Plutoniums aus den eingelagerten Abfällen ist unter den Bedingungen in den Einlagerungskammern weitgehend durch die maximal möglichen Elementkonzentrationen begrenzt /INE 2006a/. Die Konzentrationen von Plutonium liegen – mit Ausnahme der Kammer 4/750, in der sich eine deutlich niedrigere Konzentration einstellen wird – zwischen $1 \cdot 10^{-8}$ und $8 \cdot 10^{-8}$ mol/l (vgl. Abbildung 6.1-5). Die Konzentrationen von Uran liegen bei $4 \cdot 10^{-6}$ mol/l (vgl. Abbildung 6.1-6). Hiermit ergeben sich die in Spalte 6 der Tabelle 7.7-1 aufgeführten, auf die Lösung bezogenen Anreicherungs-faktoren mit dem Maximalwert von 2,4 % für die Kammer 10/750. Bei diesen Lösungskonzentrationen ist eine Kritikalität selbst in reinem Wasser bei optimalen Neutronen-Moderations- und Neutronen-Reflexionsbedingungen auszuschließen, da nach /CAR 1976/ und /HEI 1985/ kritische Anordnungen selbst in sehr großen Volumina nur bei reinen ^{235}U - oder ^{239}Pu -Lösungen mit Konzentrationen größer als $4 \cdot 10^{-5}$ mol/l möglich sind.

Die Kernbrennstoffe können durch Bildung von reinen festen Phasen, Ausfällung von Mischphasen, Kopräzipitation und Bildung von festen Lösungen sowie durch Sorptionsphänomene innerhalb der Einlagerungskammern lokal aufkonzentriert werden. Standortspezifische Untersuchungen haben gezeigt, dass gelöste Kernbrennstoffe durch Redoxreaktionen stark am korrodierten Eisen sorbiert werden /INE 2004b/. Da jedoch alle Einlagerungsbehälter in der Schachanlage Asse aus Stahl bestehen, findet die Sorption an allen korrodierten Behältermaterialien in der Einlagerungskammer gleichmäßig statt und daher kann ausgeschlossen werden, dass sich Kernbrennstoffe durch Ausfällung- oder Sorption in den Einlagerungskammern an einem Punkt aufkonzentrieren.

Ein weiterer Mechanismus, der zur Akkumulation von Kernbrennstoffen führen könnte, besteht in der Verdrängung der Lösung aus den Einlagerungskammern und nachfolgender Sorption der Kernbrennstoffe an sorbierenden Oberflächen. Die Daten zum Lösungsaustausch (Tabelle 7.7-1, Spalte 8) stammen aus Modellrechnungen, in denen Lösungsbewegungen und Tracertransport unter dem Einfluss von Dichteunterschieden, Gasbildung und Hohlraumkonvergenz im Zeitraum von 100 000 Jahren berechnet wurden /ALSA 2006d/. Mit den o. g. Konzentrationen von Uran und Plutonium sowie den Volumina der ausgetauschten Lösungen ergeben sich die in den Spalten 7 und 9 von Tabelle 7.7-1 aufgeführten Anreicherungsfaktoren und maximalen Kernbrennstoffmengen, die bei vollständiger Verdrängung aus den Einlagerungskammern ausgetragen und an sorbierenden Oberflächen im Grubengebäude abgeschieden werden können. Danach können z. B. aus der Einlagerungskammer 2/750Na2 aufgrund der Austauschströme ca. 11 kg Kernbrennstoffe mit 1,4 % Anreicherung und aus der Einlagerungskammer 5/750 ca. 6 kg mit 2,2 % hinaus transportiert werden.

Für eine robuste Abschätzung, die auf die tatsächliche Zusammensetzung der Lösungen und Feststoffe und die Neutronenabsorption durch Chlor verzichtet, kann das Kriterium nach den Handbüchern /CAR 1976/, /HEI 1985/ verwendet werden, nach dem technische Systeme von Kernbrennstoffen und Wasser als „kritisch sicher“ gelten, wenn gilt, $K_{inf} < 1$ und die Masse geringer als 45 % der kritischen Masse ist. Die im Sinne dieses Kriteriums kritisch sichere U/Pu-Masse beträgt für 2 % Anreicherung im reinen U/Pu/Wasser-System 26 kg. Damit liegen die theoretisch möglichen ausgetragenen Massen immer unter den kritisch sicheren Massen, so dass für diesen Fall keine detaillierteren Kritikalitätsbetrachtungen notwendig sind.

7.7.3 Kritikalitätsanalyse

Als Bewertungsgröße für das Auftreten einer Kritikalität wird der Neutronenmultiplikationsfaktor für unendlich ausgedehnte homogene Systeme K_{inf} verwendet. Ein System mit $K_{inf} < 1$ ist immer unterkritisch. K_{inf} wurde nach der vereinfachenden Vier-Faktoren-Formel abgeschätzt /OLD 1975/. Da die Vier-Faktoren-Formel für Systeme mit hohem Schwermetallgehalt ungenau sein kann, wurden zur Kontrolle Vergleichsrechnungen mit dem Multigruppen-Code ERANOS /DOR 1993/ durchgeführt. Diese ergaben in der Regel eine gute Übereinstimmung und dass die einfache Vier-Faktoren-Formel K_{inf} bei hochkonzentrierten Lösungen um höchstens 0,1 unterschätzt.

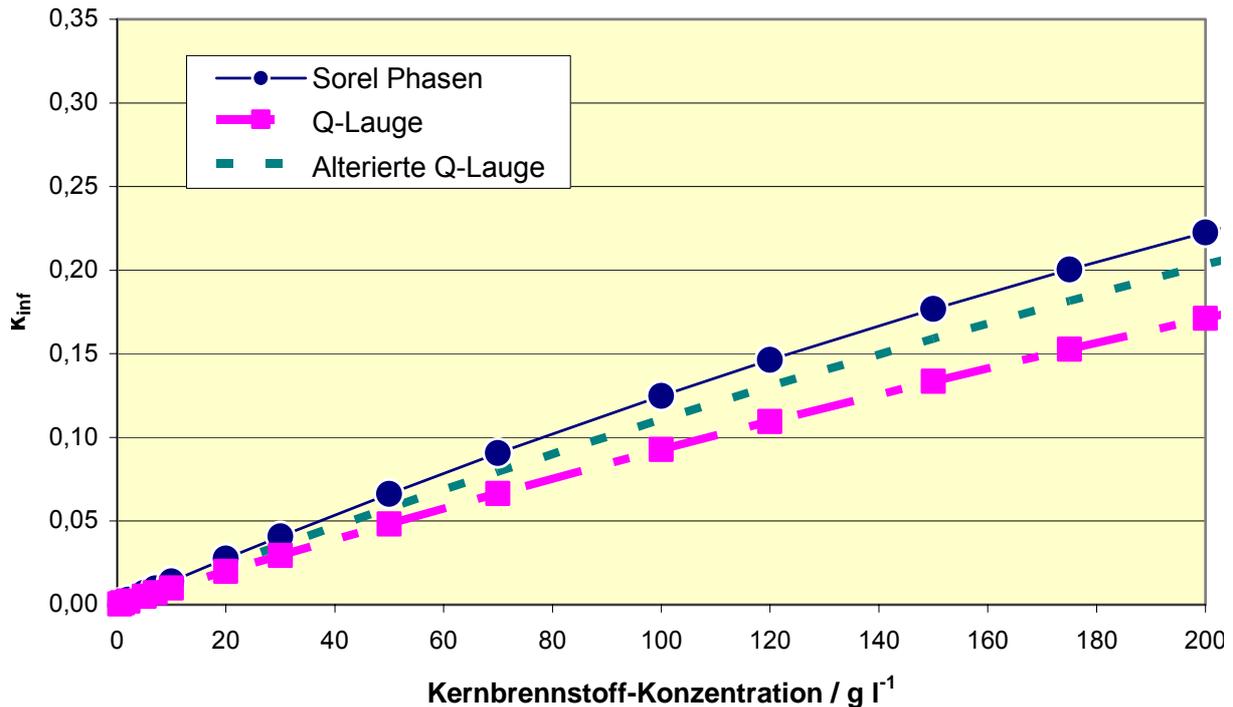


Abb. 7.7-1: Berechneter Neutronenmultiplikationsfaktor K_{inf} für die Bedingungen in den Einlagerungskammern der Schachtanlage Asse II /INE 2006c/

Der Neutronenmultiplikationsfaktor K_{inf} wurde für die Bedingungen in drei wässrigen Systemen (Q-Lösung, alterierte Q-Lösung und Sorel-Phasen)⁴⁶ mit der Vier-Faktoren-Formel in Abhängigkeit von der Kernbrennstoff-Konzentration berechnet. Dabei wurden konservativ $[^{239}\text{Pu}] = [\text{Pu}_{tot}]$ und ein Anreicherungsfaktor von 3,5 % zugrunde gelegt.

Die in Abbildung 7.7-1 dargestellten Berechnungsergebnisse zeigen, dass selbst bei extremen Aufkonzentrierungen des Uran-Plutonium-Gemisches bis zu 200 g/l ($\approx 0,85$ mol/l) die notwendige Bedingung für eine Kritikalität $K_{inf} > 1$ weit unterschritten wird. Dieses gilt auch dann, wenn die Ergebnisse wegen der Unterschätzung durch die verwendete Näherungsformel um den Wert 0,1 nach oben korrigiert werden. Diese Ergebnisse sind auf Grund der Annahmen zum Inventar und der Vernachlässigung der neben ^{238}U , ^{35}Cl und ^1H noch vorhandenen Neutronenabsorber konservativ.

Mit dem Zerfall von ^{239}Pu nimmt die ^{235}U -Konzentration im Verlauf von ca. 24 000 Jahren geringfügig zu. Die Änderung von K_{inf} ist jedoch in dem Diagramm in der Abbildung 7.7-1 nicht erkennbar.

⁴⁶ Für die Einlagerungskammern und deren Nahbereich sind die Ergebnisse für diese drei Systeme abdeckend, da in den entsprechenden Systemen für R-Lösung ein noch höherer Cl-Gehalt vorliegen wird, wodurch die Neutronenabsorption stärker sein wird als in den Systemen für Q-Lösung /INE 2006c/.

7.7.4 Fazit

Die Bildung einer kritischen Anordnung aus den in den Einlagerungskammern der Schachtanlage Asse vorhandenen, in Tabelle 7.7-1 aufgeführten Kernbrennstoffmengen ist auch nach der Degradation und Umsetzung der Abfälle sowie nachfolgendem Transport durch langfristige Lösungsaustauschvorgänge und Sorption der Spaltstoffe an anderen Versatzstoffen ausgeschlossen /INE 2006c/.

8 Gesamtbewertung

Der Nachweis der Betriebs- und Langzeitsicherheit für den Standort Asse basiert auf einem Konzept, das international in ähnlicher Weise bei der Sicherheitsbewertung von Endlagern für radioaktive Abfälle üblich ist. Während das internationale Konzept bereits bei der Standortplanung ansetzt und die Entwicklung eines Sicherheitskonzepts und eines „safety case“⁴⁷ zum Ziel hat, sind für den Standort Asse die örtlichen Rahmenbedingungen gegeben. Aus Zeitgründen mussten zudem die Entwicklung des Sicherheits- und Schließungskonzeptes sowie die Konsequenzenanalyse in einem einzigen Iterationsschritt – jedoch mit mehreren Iterationen zu Teilaspekten – entwickelt bzw. durchgeführt werden. Daher war ein modifiziertes Nachweiskonzept anzuwenden. Hierauf wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

In Kapitel 8.1 wird zunächst auf das Nachweiskonzept eingegangen, d.h. die Methodik des Sicherheitsnachweises bewertet. In Kapitel 8.2 werden die wesentlichen Elemente des Schließungskonzeptes angesprochen und das Konzept insgesamt bewertet. In Kapitel 8.3 werden ergänzende sicherheitsrelevante Aspekte untersucht, die nicht Bestandteil der Analysen von Kapitel 7 waren, aber wesentliche Aussagen stützen und Argumente ergänzen. Kapitel 8.4 enthält die zentralen Aussagen dieser Gesamtbewertung mit der Bewertung der Konsequenzenanalyse selbst.

Das vorliegende Kapitel bildet die Basis für eine Aussage, ob die Vorgehensweise zur Führung des Sicherheitsnachweises geeignet ist und ob die entwickelten Modellkonzepte eine verlässliche Quantifizierung der möglichen Konsequenzen erlauben. Diese Aussage wird in Kapitel 9 getroffen.

8.1 Bewertung des Nachweiskonzeptes

Der Sicherheitsnachweis wurde in der folgenden Reihenfolge durchgeführt:

- Analyse der Gegebenheiten am Standort,
- Entwicklung des Sicherheits- und Schließungskonzeptes,
- Entwicklung von Szenarien,
- Untersuchung von Teilsystemen und Einzelprozessen,
- Konsequenzenanalyse,
- Gesamtbewertung.

⁴⁷ Der Begriff „safety case“ lässt sich nicht direkt übersetzen. In einem iterativen Verfahren werden bei dieser Vorgehensweise die Standortauswahl, die Planung der Grubengebäudestruktur, die Modellierungen, usw. so optimiert, dass „best mögliche“ Sicherheit erreicht wird. Nach Beendigung dieses Verfahrens wird von einem „safety case“ gesprochen.

Diese Vorgehensweise entspricht dem Stand von Wissenschaft und Technik und ist angelehnt an international übliche Vorgehensweisen zur Entwicklung eines „Safety Case“ (vgl. /NEA 1999/ und /NEA 2002/), bei der vertrauensbildende Maßnahmen von großer Bedeutung sind. Die Anlehnung an die international übliche Vorgehensweise bietet die Gewähr, dass das Nachweiskonzept für den Standort Asse akzeptiert werden kann und dass der Langzeitsicherheitsnachweis mit Aussicht auf Erfolg geführt werden kann. Das Konzept ist klar strukturiert, standortbezogen und umfassend. Es wurde mit gutem Erfolg angewandt.

Wie bereits gesagt, sieht das Nachweiskonzept einen vollständigen Durchlauf aller Schritte des Sicherheitsnachweises vor. Durch das Fehlen von globalen Iterationen (Iterationen zu Teilaspekten erfolgten) handelt es sich um keinen „safety case“ im eigentlichen Sinn, so dass von einer „Konsequenzenanalyse entsprechend dem Sicherheits- und Schließungskonzept“ gesprochen wird. Dabei wurden einige Aufgabenstellungen parallel bearbeitet und durch den engen Terminrahmen Abschlussberichte parallel erstellt. Die Abstimmung zwischen den einzelnen Aufgabenstellungen erfolgte dabei für die sicherheitsrelevanten Aspekte im Großen, eine Feinabstimmung im Detail war jedoch nicht immer möglich. So lagen zwar die Hauptergebnisse zu den Teilsystemen und Teilaspekten des Systems zu Beginn der Modellrechnungen zum Schadstofftransport vor, einzelne zugehörige Berichte jedoch erst, nachdem die Modellrechnungen zum Schadstofftransport beendet waren. Diese inhärente Schwierigkeit eines einmaligen Durchlaufs ohne globale Iteration kann an einigen Stellen zu inkonsistenten Ergebnissen führen, die allerdings für die Bewertung der Langzeitsicherheit nicht von Bedeutung sind. In dem vorliegenden Bericht werden alle Ergebnisse der Konsequenzenanalyse zusammengestellt und einzeln sowie im Zusammenwirken bewertet. Auf noch bestehende Inkonsistenzen wird in den entsprechenden Kapiteln eingegangen.

Das verwendete Nachweiskonzept hat sich bewährt, da das Ziel – Ermöglichen einer Bewertung der Konsequenzen anhand von Langzeitprognosen und Modellrechnungen – erreicht wurde.

8.2 Bewertung des Schließungskonzepts

Sowohl der trockene Einschluss der Abfälle als auch der vollständige Abschluss der Schadstoffe von der Biosphäre ist nicht möglich; eine gezielte Nassverwahrung mit der Einstellung von prognostizierbaren Standortbedingungen ist auf Grund der grubenspezifischen Randbedingungen die logische Schlussfolgerung.

In der Gesamtbewertung wurde nachgewiesen, dass das Schließungskonzept für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit am Standort Asse geeignet ist. Die Grundelemente des Schließungskonzepts sind notwendig für diesen Nachweis, d.h. es kann auf keines der Grundelemente verzichtet werden und die Anforderungen an die technische Umsetzung können nicht substantiell herabgesetzt werden. Dies gilt für

- das Einbringen des Schutzfluids, einschließlich des Beaufschlagens der Grube mit einem pneumatischen Druck während der Einleitung oberhalb der 700-m-Sohle,
- das Einbringen von Mg-Depot in die Einlagerungskammern und in deren bevorzugte Austrittspfade,

- den Einbau von Strömungsbarrieren und stützendem Versatz,
- die Verfüllung noch offener Hohlräume sowie
- den Verschluss der Tagesschächte.

Durch das vorgesehene schnelle Einleiten des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle wird zum einen das Tragsystem des Grubengebäudes in der Nachbetriebsphase stabilisiert, die Konvergenz des Grubengebäudes verringert sowie Verformungen im Salzgestein und im Deckgebirge eingeschränkt. Während des Einleitens oberhalb der 700-m-Sohle gewährleistet die Beaufschlagung mit einem pneumatischen Stützdruck die Tragfähigkeit. Zum anderen verhindert die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids Carnallitumlösungen relevanten Ausmaßes.

Das Einleiten des Schutzfluids, einschließlich Beaufschlagung des pneumatischen Drucks, ermöglicht nicht nur den Nachweis der Tragfähigkeit des Grubengebäudes sondern bewirkt auch eine harmonisch degressive Konvergenzentwicklung in der Nachbetriebsphase. Erst dadurch ist eine zuverlässige Prognose des Systemverhaltens am Standort möglich. Das Einleiten des Schutzfluids stellt somit die zentrale Maßnahme für die sichere Schließung der Schachtanlage Asse dar.

Durch die vorgesehene Anordnung der Strömungsbarrieren wird die Lösungsbewegung im Nahbereich der Einlagerungskammern sowohl begrenzt als auch gelenkt. Der Einbau von Strömungsbarrieren limitiert dadurch den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern („Durchströmung“) deutlich. Der Einbau von stützendem Versatz stabilisiert das Salzgestein im Bereich der Einbauorte von Strömungsbarrieren und verhindert somit deren Umläufigkeit.

Durch den vorgesehenen Einbau von Mg-Depot wird – in Verbindung mit den Strömungsbarrieren (s.u.) – die Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern positiv und nachhaltig beeinflusst. Die veranschlagten Mengen stabilisieren das chemische Milieu langfristig im neutralen bis alkalischen Bereich (außer eventuell in ELK 2/750Na₂). Dadurch wird sowohl die Mobilisierung von Schadstoffen begrenzt als auch deren Rückhaltung begünstigt, wodurch letztlich die Konzentrationen relevanter Schadstoffe langfristig in relevantem Ausmaß begrenzt werden. Durch den Einbau von Mg-Depot werden auch die Gasbildung (durch entsprechende Änderung des chemischen Milieus) und die Konvergenz (durch die Stützwirkung des Materials) reduziert.

Die Strömungsbarrieren und das Mg-Depot zusammen verringern die Mobilisierung und die Ausbreitung von Schadstoffen. Die Strömungsbarrieren ermöglichen erst die zuverlässige Prognose der Transportpfade im Nahbereich der Einlagerungskammern. Beide Maßnahmen sind für die Einschränkung des Schadstofftransports notwendig.

Die vorgesehene Verfüllung noch offener Hohlräume mit unterschiedlichen Versatzstoffen unterstützt die o.g. Maßnahmen in geeigneter Art und Weise. Der Einbau von Sorelbeton stabilisiert das Grubengebäude und schränkt somit die Wirkung der Konvergenz ein. In der MAW-Einlagerungskammer wird durch den Einbau von Sorelbeton zudem das Eindringen von Schutzfluid und damit die Mobilisierung der Schadstoffe mit großer Wahrscheinlichkeit verhindert. Der Einbau von Schotter verstärkt die Kontraste von Strömungswiderständen,

unterstützt die Lenkung der Lösungsbewegung und sichert die stabile Druckentlastung im unteren Grubengebäude.

Durch den Einbau von Schachtverschlüssen in die Tagesschächte werden sowohl der Zutritt von Grundwasser in das Grubengebäude als auch der Austritt von Lösung und Schadstoffen über die Tagesschächte verhindert. Die Schachtverschlüsse verhindern eine schnelle Freisetzung von Schadstoffen in die Biosphäre.

Die grundsätzliche technische Machbarkeit der Grundelemente des Schließungskonzepts ist nachgewiesen. Ein Funktionsnachweis für die Strömungsbarrieren, die Mg-Depots und die Schachtverschlüsse wird im Zuge der Ausführungsplanung bzw. nach deren Einbau geführt.

Alternative Konzepte für eine sichere Schließung der Schachtanlage Asse II wurden untersucht; keines der alternativen Konzepte konnte als gleich erfolgversprechend bewertet werden. Bei dieser Bewertung wurden sowohl die technische Umsetzbarkeit alternativer Maßnahmen unter Standortbedingungen als auch ihr Einfluss auf den Erhalt der Resttragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes und die Prognosefähigkeit der Systementwicklung in der Betriebs- und Nachbetriebsphase berücksichtigt. Optionen innerhalb des Schließungskonzepts beschränken sich auf die Auslegung der technischen Bauwerke, auf die zeitlichen und technischen Abläufe sowie – in Einzelfällen – auf veranschlagte Baustoffe; jedoch bestehen hier enge Grenzen.

8.3 Ergänzende langzeitsicherheitsrelevante Aspekte

Die nachfolgend aufgeführten ergänzenden Aspekte unterstützen die Aussagen zur Langzeitsicherheit, die auf den Sicherheitsindikatoren – Senkung der Geländeoberfläche, Konzentration von wasserrechtlich relevanten Stoffen im oberflächennahen Grundwasser und jährliche effektive Individualdosis – und deren Vergleich mit den Schutzziele beruhen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den radiologischen Wirkungen von Radionukliden.

8.3.1 Vergleich von Radiotoxizitäten

In den Abbildungen 8.3-1 und 8.3-2 sind zunächst – als schwarze, einhüllende Kurve – die zeitlichen Entwicklungen der Radiotoxizität des Gesamtinventars der Grube dargestellt. In Abbildung 8.3-1 sind die Beiträge der kurzlebigen und in Abbildung 8.3-2 die Beiträge der langlebigen relevanten Radionuklide mit eingezeichnet. Es ist zu erkennen, dass bis ca. 1000 Jahre das relativ kurzlebige Am-241 (Halbwertszeit 432 Jahre) die Radiotoxizität des Gesamtinventars bestimmt, zu frühen Zeiten mit Beiträgen von noch kurzlebigeren Radionukliden. Nach ca. 1 000 Jahren werden die Plutonium-Isotope Pu-239 und Pu-240 (Halbwertszeiten 24 000, bzw. 6 600 Jahre) relevant, zu noch späteren Zeiten die Tochternuklide von Uran (U-238 und U-234) und Thorium (Th-232), d.h. Th-230, Ra-226 sowie Ra-228⁴⁸. Die Toxizität der Radionuklide berücksichtigt die Beiträge der jeweils nachfolgenden, zum Teil sehr kurzlebigen Nuklide.

⁴⁸ Ra-228 ist hier nicht mit abgebildet.

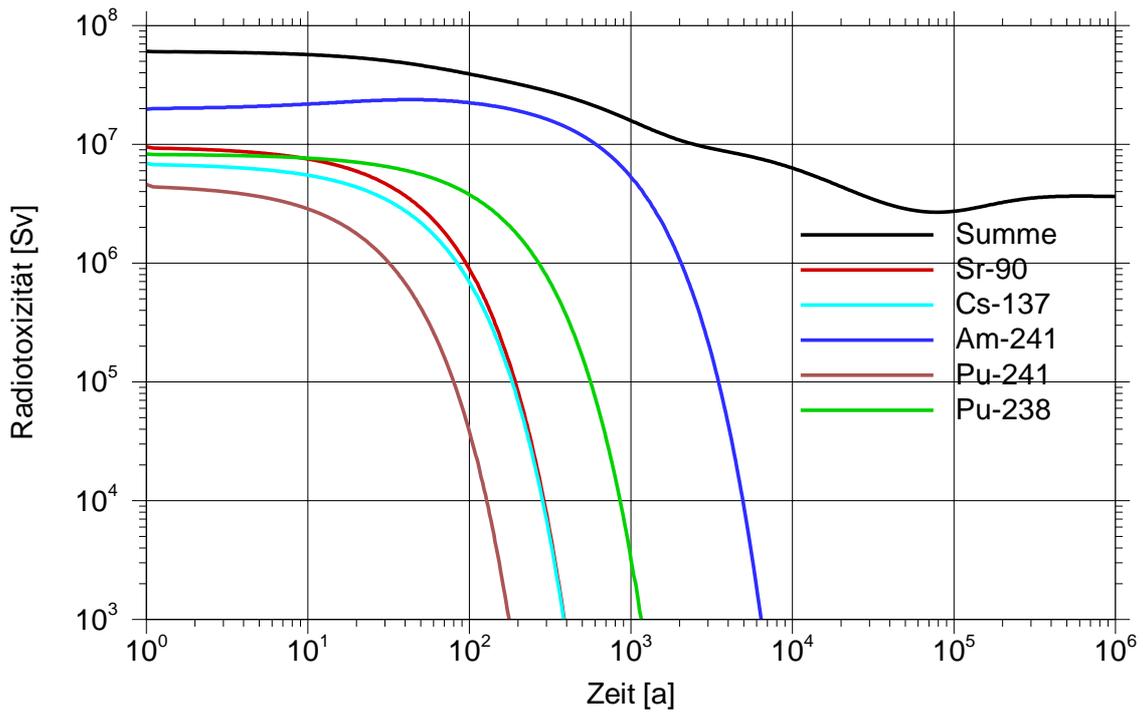


Abb. 8.3-1: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität mit Beiträgen relativ kurzlebiger Radionuklide, bezogen auf 01.01.2005

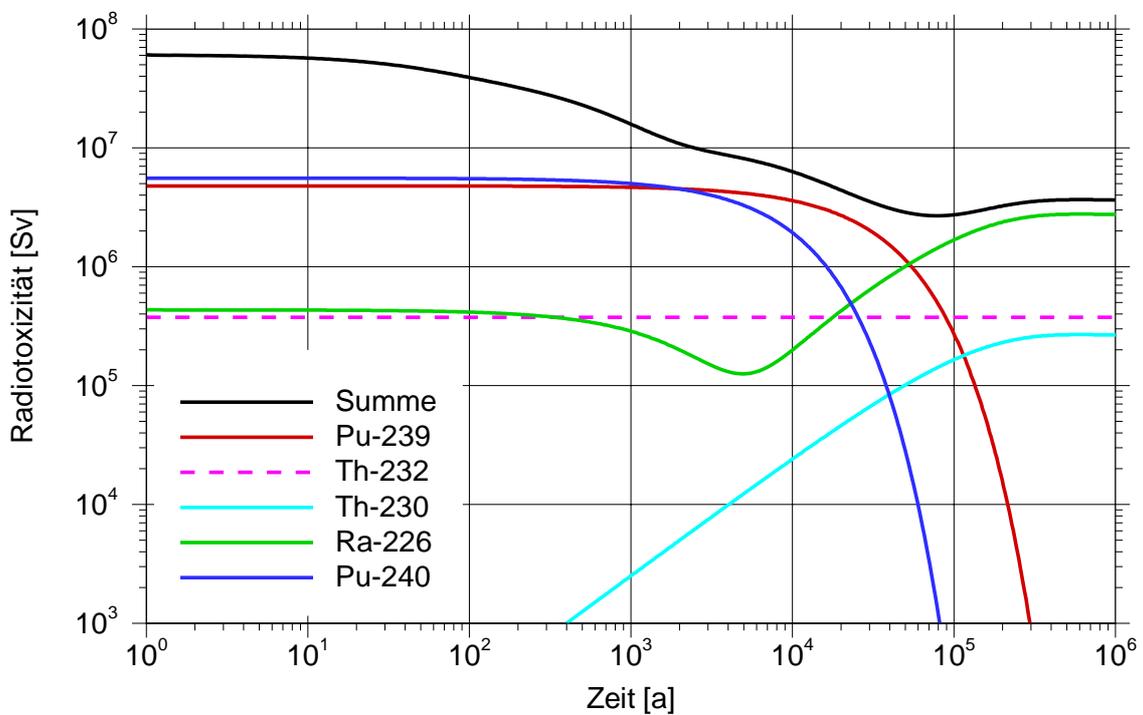


Abb. 8.3-2: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität mit Beiträgen langlebiger Radionuklide, bezogen auf 01.01.2005

Die Radionuklide mit den wesentlichen Beiträgen zur Radiotoxizität des Gesamtinventars (Am-241, Pu-239, Pu-240 und Ra-226) bestimmen auch die potenzielle Strahlenexposition in der Biosphäre, siehe die Ergebnisse in Kapitel 7.5. Das Ziel, die potenzielle Strahlenexposition zu verringern, ist daher nur möglich, wenn die oben genannten Radionuklide mit den größten eingelagerten Radiotoxizitäten effektiv zurückgehalten werden.

Insgesamt fällt die Radiotoxizität des eingelagerten Radionuklidinventars langfristig zwar „nur“ um gut eine Größenordnung ab. Die Radionuklide, welche nach sehr langen Zeiten die Radiotoxizität bestimmen, d.h. die Uran- und Thorium-Isotope, werden jedoch im Gesamtsystem aufgrund ihrer geringen Löslichkeiten wirksam zurückgehalten.

8.3.2 Robustheit des Systems

Unter der Robustheit eines Systems wird im Allgemeinen die geringe Variabilität seiner Eigenschaften bei externen oder internen Einflüssen, hier bei Veränderung von Parametern des Systems oder seiner Komponenten verstanden. Als Eigenschaften sind zum Beispiel die Volumenströme und Nuklidströme an der Austrittsstelle aus der Grube oder auch in einzelnen Grubenbauen zu verstehen.

Im Hinblick auf die Langzeitsicherheit ist insbesondere die potenzielle Strahlenexposition zu betrachten. Überträgt sich die Variabilität interner Eigenschaften, wie zum Beispiel die der Volumenströme innerhalb der Grube, nicht oder nur wenig auf die potenzielle Strahlenexposition, ist dies eine günstige Systemeigenschaft. In einem größeren Umfang beeinträchtigt die Variabilität interner Eigenschaften aber die Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Sicherheitsnachweises, so dass es lohnenswert ist, die diesbezügliche Robustheit zu betrachten.

In Abbildung 8.3-3 sind die potenziellen Strahlenexpositionen für den Referenzfall sowie für Varianten und Szenarien aus /ALSA 2005a/, /ALSA 2005b/ und /ALSA 2006c/ zusammengestellt. Die rote Linie kennzeichnet den Bewertungsmaßstab von 0,3 mSv/a. Es sind zwei Gruppen zu erkennen: Die blauen Balken charakterisieren Rechenfälle mit den Radionuklidquelltermen aus /ALSA 2005a/, die grünen und orangen Balken charakterisieren Rechenfälle mit aktualisierten Radionuklidquelltermen aus /ALSA 2006c/. Es ist deutlich zu erkennen, dass innerhalb einer Gruppe in den meisten Varianten und alternativen Szenarien die Bandbreite der berechneten Strahlenexpositionen gering ist. Das System verhält sich robust.

Szenariengruppe des Referenzszenarios

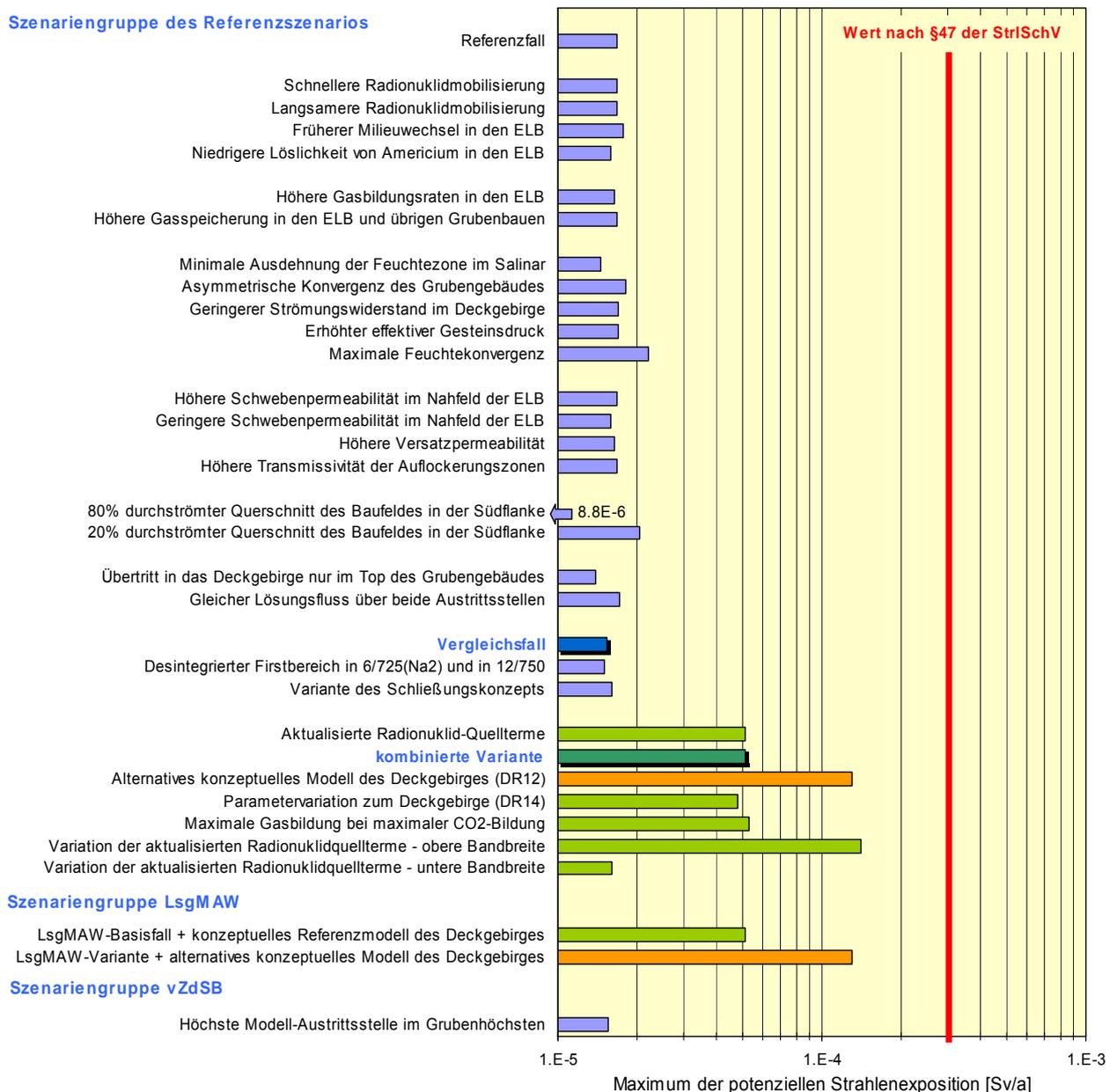


Abb. 8.3-3: Übersicht der berechneten globalen Maxima der potenziellen Strahlenexpositionen /ALSA 2006c/

In der ersten Gruppe ist in der Variante zur Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke die Bandbreite der berechneten Strahlenexpositionen größer als in den übrigen Fällen. Hier reagiert das System sensitiv. Die Reaktion des Systems ist eindeutig: bei starker Kanalisierung gelangen Schadstoffe beschleunigt und dadurch in höherer Rate in das Deckgebirge.

Die Varianten zur Konvergenz zeigen zwar eine relativ geringe Variabilität der potenziellen Strahlenexposition, sofern nur ein einzelner Parameter variiert wird. Da die Konvergenz aber von mehreren Parametern abhängt, ist dieser Effekt ebenfalls von großer Relevanz für die potenzielle Strahlenexposition, wie auch die probabilistischen Rechnungen gezeigt haben. Diese Relevanz ist dadurch gegeben, dass die Konvergenz der wesentliche Antriebsmecha-

nismus für das Auspressen von Fluiden und damit auch von Radionukliden aus der Grube darstellt.

In der zweiten Gruppe ist in den Varianten zum Radionuklid-Quellterm – untere und obere Bandbreite – die Bandbreite der berechneten Strahlenexpositionen am größten. Es zeigt sich, dass das geochemische Milieu und die damit zusammenhängenden maximalen Elementkonzentrationen einen großen Einfluss auf die potenzielle Strahlenexposition haben. Es ist daher von Vorteil, die Bandbreite des Quellterms durch das Einstellen und Stabilisieren des Milieus durch Einbringen von Mg-Depot sowie die Begrenzung des Lösungsaustausches durch Bau von Strömungsbarrieren einzuschränken und dadurch die Robustheit zu erhöhen.

Folgende Ursachen der Robustheit bezüglich der potenziellen Strahlenexposition lassen sich summarisch anführen:

1. Die Anordnung der Strömungsbarrieren behindert den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern („Durchströmung“) und sorgt somit für die Aufrechterhaltung stabiler chemischer Milieubedingungen.
2. Ein weitgehend stabiles alkalisches Milieu in den Einlagerungskammern bewirkt, dass die dosisrelevanten Radionuklide von Plutonium, Thorium und Uran, teilweise auch Americium, in den Einlagerungsbereichen effektiv zurückgehalten werden und dass sich die maximal möglichen Elementkonzentrationen nur gering unterscheiden. Somit wirken sich variierende Beiträge der Einlagerungsbereiche zur Strahlenexposition durch eine geänderte Ausbreitung im Nahfeld nur geringfügig aus.
3. Das Baufeld in der Südflanke, das ein großes Verdünnungsvolumen aufweist, wirkt auf dem Weg von den Einlagerungsbereichen zur Übertrittsstelle ins Deckgebirge in allen Fällen in ähnlicher Weise verdünnend.
4. Die Konvergenz, als wesentlicher Antrieb für die Ausbreitung kontaminierter Lösung, ist durch eine robuste Entwicklung in der Nachbetriebsphase gekennzeichnet (vgl. Kapitel 7.2). Nur bei sehr wenigen ungünstigen Annahmen für die Modellierung der Konvergenz, wie beispielsweise für die durchfeuchtete Zone im Salinar, ändern sich die potenziellen Strahlenexpositionen relevant. In den Unsicherheitsanalysen wurde eine realistische Bandbreite von ca. einer Größenordnung für die Konvergenzrate angesetzt, was bei der Ausbreitung zum Exfiltrationsgebiet im Tal von Wittmar zu nur geringen Auswirkungen, bei der Ausbreitung zu den Exfiltrationsgebieten im Tal der Ammerbeek aber zu großen Auswirkungen auf die berechneten Strahlenexpositionen führte. Da die potenzielle Strahlenexposition im Tal der Ammerbeek im Allgemeinen deutlich niedriger ist als im Tal von Wittmar, ist die Ungewissheit in Bezug auf die Konvergenzrate von beschränkter Bedeutung.

In Bezug auf den Radionuklidtransport durch das Deckgebirge ist das System weniger robust. Die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen unterscheiden sich für die betrachteten Modellvorstellungen teilweise deutlich. Gegenüber der Ausbreitung der Radionuklide mit hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten durch den Röttaquitard in den Muschelkalk (DR13 und DR14) ergeben sich für die Ausbreitung der Radionuklide bei hydraulisch wenig wirksa-

men Wegsamkeiten durch den Röttaquitard (DR12) höhere Strahlenexpositionen (Abbildung 8.3-3, vgl. grüne und orange Balken). Die Robustheit der Schadstoffausbreitung im Deckgebirge gegenüber Variationen von Parametern, welche die lokalen Fließsysteme in die Exfiltrationsgebiete mitbestimmen, wurde nicht untersucht.

Die Robustheit des Systems wurde auch bei der Herleitung des Schließungskonzepts berücksichtigt. Beispielsweise sind lange Ausbreitungswege in der Grube für eine langsame Ausbreitung der Schadstoffe von Vorteil. Daher wurden die Lösungsströme in der Grube in verschiedenen Varianten analysiert und die Strömungsbarrieren so angeordnet, dass ein geeignetes Strömungsfeld entsteht. Einer Optimierung der Anordnung sind dabei Grenzen gesetzt, weil die Strömungswiderstände von aufgelockerten Pfeilern und Schweben sowie einiger bereits versetzter Grubenbaue nicht mit vertretbarem Aufwand beeinflusst werden können.

Eine weitere Maßnahme zur Unterstützung der Robustheit enthält das Schutzfluidkonzept. Die Zusammensetzung des Schutzfluids begrenzt die Umlösungen am Carnallitit erheblich, so dass konvektive Lösungsbewegungen im Grubengebäude weitgehend ausgeschlossen werden können, die in der Modellierung anzusetzenden Volumina der Grubenbaue mit einer verlässlichen Bandbreite festgelegt werden können und sich die Ausbreitungswege in der Grube im Verlauf der Zeit nicht signifikant verändern.

Der Robustheit des Systems wurde bei der Ausarbeitung der technischen Maßnahmen des Schließungskonzepts insgesamt ein hoher Stellenwert zugewiesen.

8.3.3 Funktionsindikatoren

Funktionsindikatoren erlauben Rückschlüsse auf das Verhalten einzelner Teilsysteme des Endlagersystems, aber keinen direkten Rückschluss auf die Sicherheit insgesamt. Sie dienen unter Anderem dem Vergleich von Komponenten und sie fördern das Systemverständnis.

8.3.3.1 Rückhaltung in der Grube

Abbildung 8.3-4 zeigt für die kombinierte Variante die Lösungsströme aus der Grube und als Beispiel die Konzentrationen von Pu-239 an den beiden Austrittsstellen in 500 m und 574 m Teufe. Die Maxima der Lösungsströme treten nach ca. 10 Jahren auf, die Maxima der Konzentrationen liegen dagegen im Bereich zwischen 5 000 und 30 000 Jahren. Durch die Wechselwirkung dieser beiden Effekte treten die maximalen Schadstoffströme aus der Grube zwischen 1 000 und 10 000 Jahren auf. Die großen Lösungsströme zu frühen Zeiten setzen also nur geringe Radionuklidmengen frei, und das Maximum der Radionuklidkonzentrationen tritt erst zu späten Zeiten auf, wenn die Lösungsströme bereits abgefallen sind.

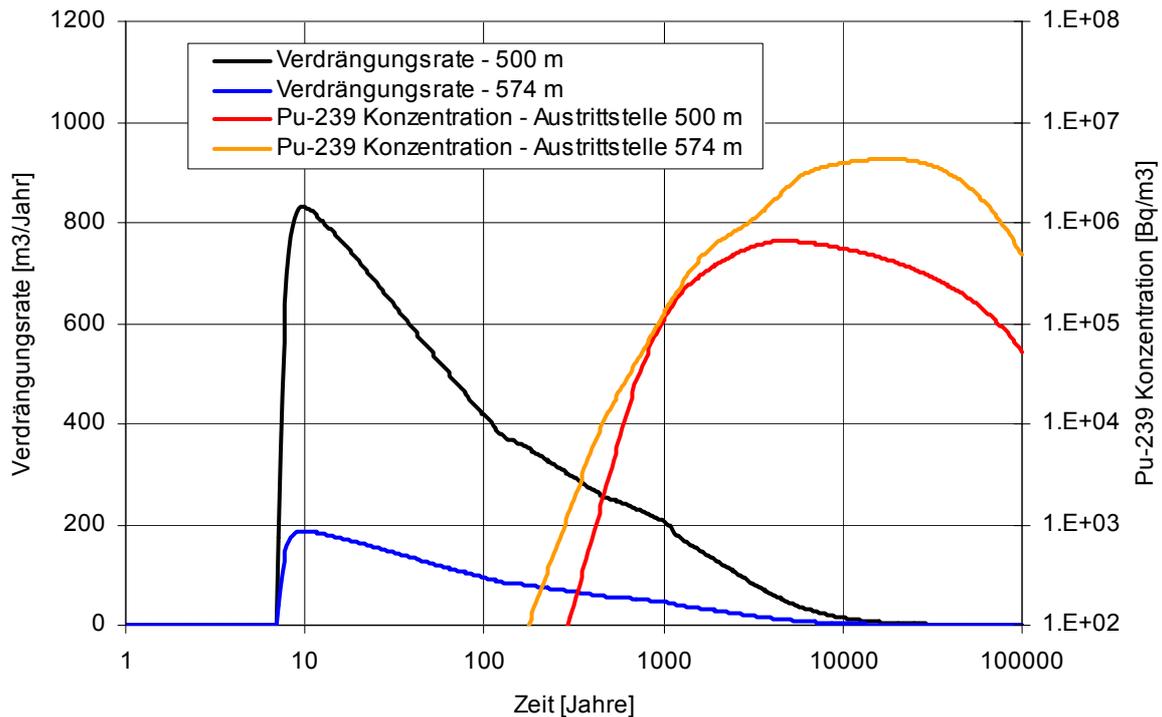


Abb. 8.3-4: Lösungsströme und Plutoniumkonzentrationen an den Austrittsstellen aus der Grube in 500 m und 574 m Teufe /ALSA 2006c/

Die folgenden Abbildungen 8.3-5 und 8.3-6 sollen veranschaulichen, wie die Radionuklide in der Grube zurückgehalten werden. Sie zeigen

- als gestrichelte Linie, in den Abbildungen mit „Grube“ bezeichnet, die zeitliche Entwicklung des eingelagerten Inventars (unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls),
- als durchgezogene Linie, in den Abbildungen mit „Deckgebirge“ bezeichnet, die zeitliche Entwicklung des aus der Grube ausgetretenen Inventars (unter Berücksichtigung des radioaktiven Zerfalls)

Der Unterschied zwischen den beiden Kurven ist das Maß der Rückhaltung im Grubengebäude. Bei Am-241 und Pu-240 beträgt das Maximum des ausgetretenen Inventars ca. 1 Promille des Maximums des eingelagerten Inventars, bei U-238 noch etwas weniger, jedoch ist dessen Maximum im ausgetretenen Inventar noch nicht erreicht. Bei Am-241 tritt das Maximum des ausgetretenen Inventars nach ca. 2000 Jahren, bei Pu-240 nach ca. 8000 Jahren und bei U-238 nach mehr als 100 000 Jahren auf. Aus den Maxima und den Zeitpunkten ihres Eintretens folgt, dass ca. 99,9 % des Anfangs-Aktivitätsinventars dieser Radionuklide im Betrachtungszeitraum in der Grube zurückgehalten werden bzw. durch radioaktiven Zerfall verschwinden. Beim Pu-240 und U-238 ist dies vor allem in der hohen Rückhaltung durch die maximal möglichen Elementkonzentrationen in den Einlagerungsbereichen begründet, beim relativ kurzlebigen Am-241 liegt dies vor allem an der Transportverzögerung in der Grube in Verbindung mit dem radioaktiven Zerfall.

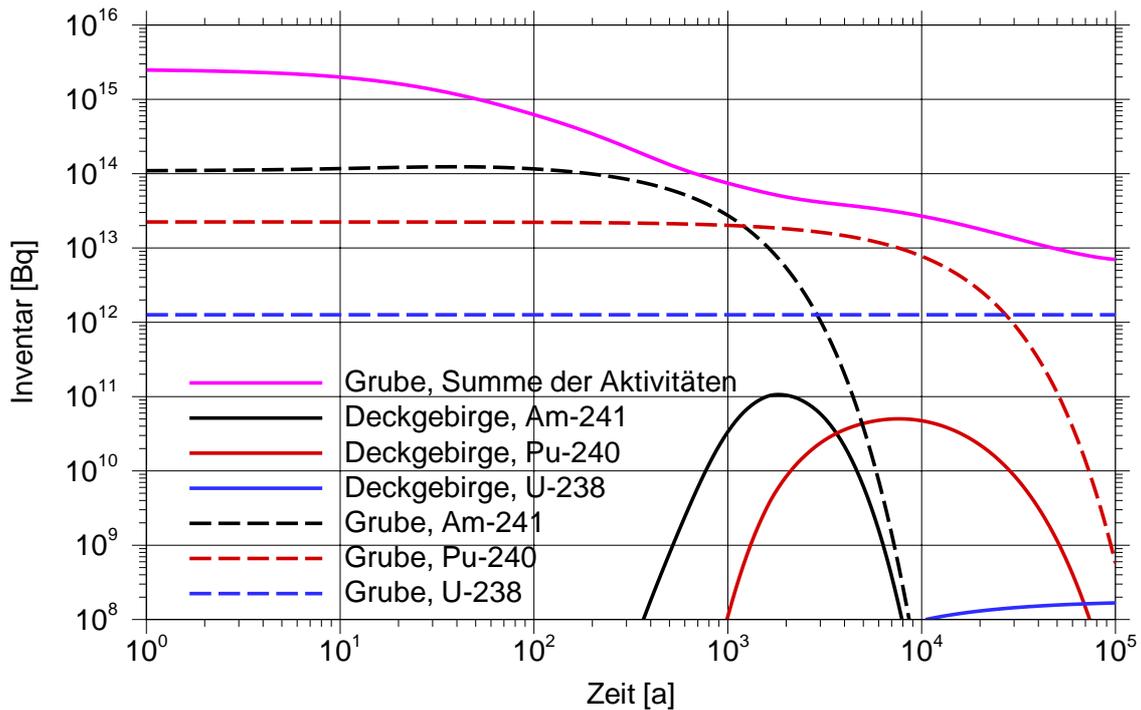


Abb. 8.3-5: Zeitlicher Verlauf der eingelagerten Inventare und der in das Deckgebirge ausgetretenen Inventare für Radionuklide mit teilweise begrenzenden, maximalen Elementkonzentrationen in den ELB

Bei Radionukliden mit inventarbestimmter Mobilisierung, deren Anfangskonzentrationen in den Einlagerungsbereichen also nicht durch maximal mögliche Elementkonzentrationen begrenzt sind, ist die Situation anders, siehe Abbildung 8.3-6. In diesen Fällen wird ein großer Teil des anfänglichen Radionuklidinventars ins Deckgebirge freigesetzt. Durch den radioaktiven Zerfall ist die Abnahme bei den kurzlebigeren Radionukliden etwas stärker, siehe z.B. C-14⁴⁹. Insgesamt werden die inventarbestimmten Radionuklide über lange Zeiten also kaum in der Grube zurückgehalten, ihr Übertritt in das Deckgebirge wird aber stark verzögert und erfolgt langsam.

⁴⁹ In den Modellrechnungen für den Lösungspfad wurde eine inventarbestimmte Konzentration für C-14 angenommen, obwohl durch die Ausfällung von Karbonaten und den bevorzugten Übergang von Methan in die Gasphase die Konzentration von C-14 in Lösung begrenzt ist (vgl. Kapitel 6.1 und 7.6).

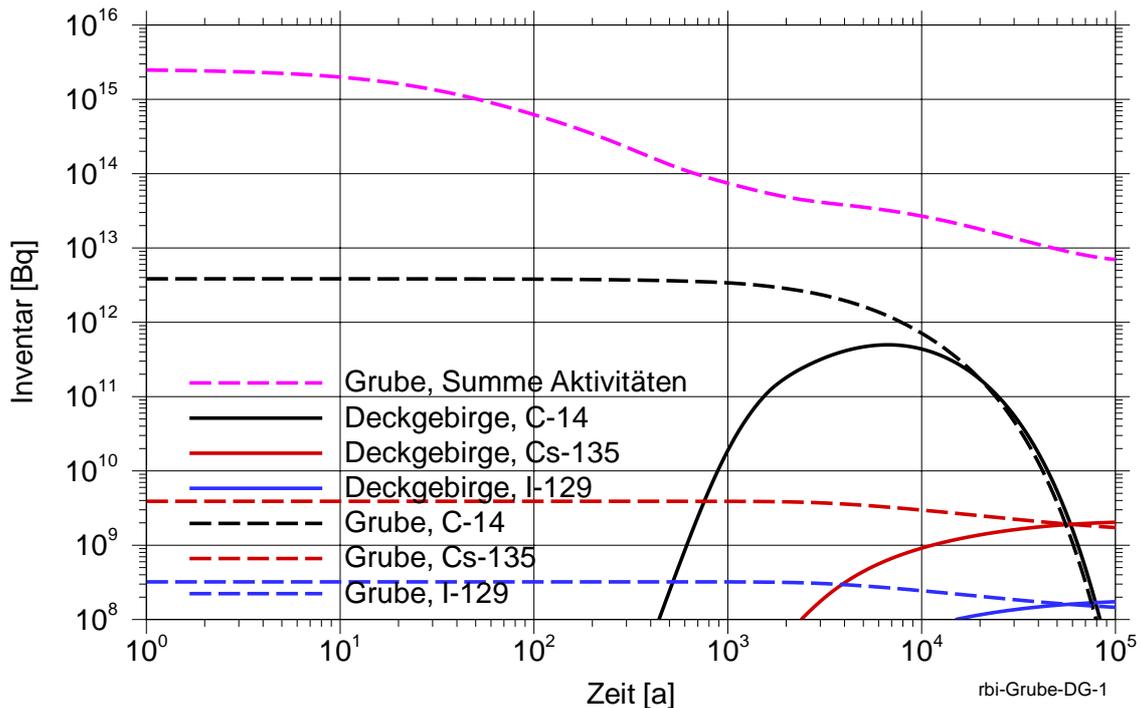


Abb. 8.3-6: Zeitlicher Verlauf der eingelagerten Inventare und der in das Deckgebirge ausgetretenen Inventare für inventarbestimmte Radionuklide

8.3.3.2 Integrierte Freisetzung aus Teilbereichen der Grube

Ein Indikator für die Wirksamkeit von Barrieren ist der über die Zeit integrierte Radiotoxizitätsfluss aus den Teilbereichen des Systems. Dabei bleibt der Zerfall nach der Freisetzung unberücksichtigt, so dass die Kurven für diesen Indikator immer monoton ansteigen. Da die Freisetzung aus jedem Teilbereich früher oder später zum Stillstand kommt, weil die Antriebsmechanismen für die Freisetzung zeitlich abnehmen, strebt der Wert des Indikators mit zunehmender Modellzeit im Allgemeinen gegen einen charakteristischen Grenzwert. Ein Vergleich dieses Wertes mit dem anfänglich in dem betreffenden Teilbereich vorhandenen Inventar zeigt, welcher Anteil davon insgesamt aus dem Teilbereich entweicht. Der Rest bleibt dauerhaft eingeschlossen oder zerfällt, bevor er den Teilbereich verlassen kann.

Abbildung 8.3-7 zeigt die integrierten Radiotoxizitätsflüsse, also das freigesetzte Radiotoxizitätsinventar, beim Austritt aus den Einlagerungsbereichen LAW1 bis LAW4, beim Zutritt in das Baufeld in der Südflanke, d.h. auf der 700-m-Sohle – als Summe der Flüsse im westlichen und im östlichen Strang – beim Austritt aus der Grube sowie beim Austritt aus dem Deckgebirge in die Exfiltrationsgebiete. Die Normierung der einzelnen Kurven erfolgt für die LAW-Einlagerungsbereiche mit der anfänglichen Toxizität im jeweiligen Bereich, für die übrigen Systembereiche mit der anfänglichen Gesamttoxizität in der Schachanlage (ohne MAW). Die Toxizität des MAW-Einlagerungsbereiches wird für das Referenzszenario wegen der hier trockenen MAW-Kammer nicht berücksichtigt.

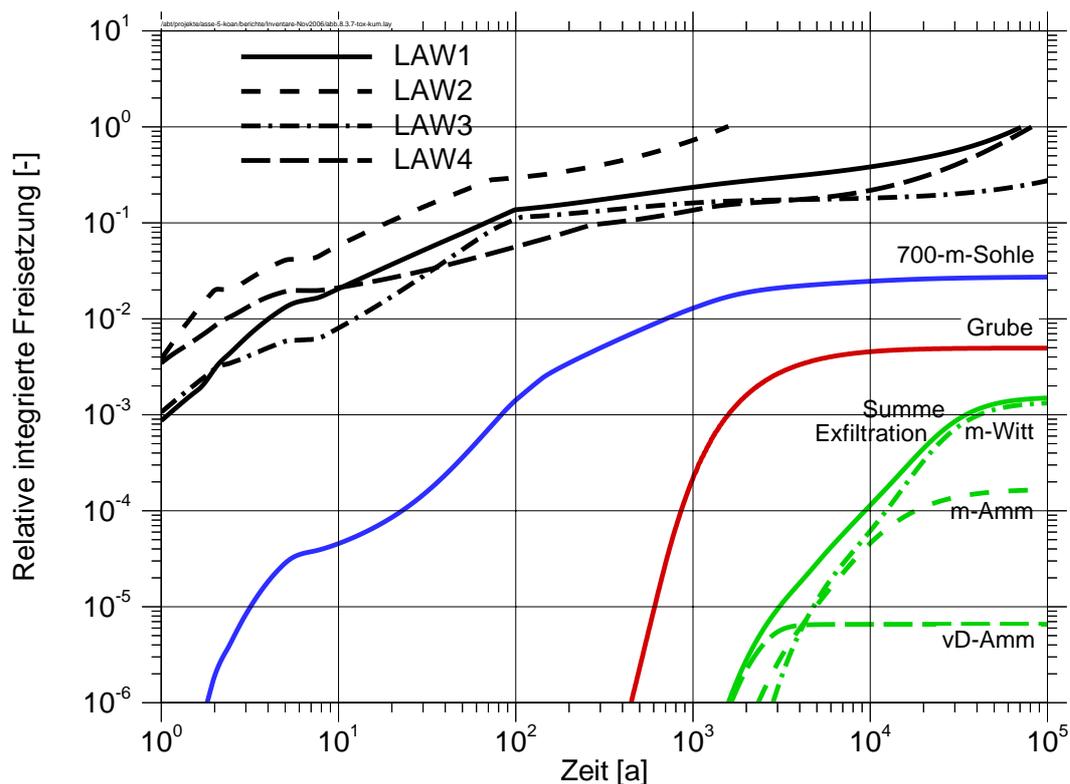


Abb. 8.3-7: Relative integrierte Radiotoxizitätsfreisetzung für das Referenzszenario

Man erkennt für die einzelnen dargestellten Grubenbereiche das folgende Verhalten:

- Der aus den LAW-Bereichen austretende kumulierte Anteil der Radiotoxizität steigt innerhalb von einigen hundert Jahren bis auf einen Wert zwischen 0,1 und 1 an. Dies verdeutlicht, dass ein Großteil des Inventars schnell aus den Einlagerungsbereichen austritt. Das dort verbleibende Inventar wird im Wesentlichen von den Actiniden gebildet, die durch die maximal möglichen Elementkonzentrationen zurückgehalten werden und in der Folge ständig Tochternuklide produzieren, deren Radiotoxizitätsflüsse zu einem weiteren Anstieg des Indikators führen⁵⁰.
- Die kumulierte Toxizität der aus den LAW-Bereichen in das Baufeld in der Südflanke zur 700-m-Sohle transportierten Radionuklide zeigt, dass das Inventar auf diesem Weg auf ca. 2,5% reduziert wird. Es gibt also eine Rückhaltung in den unteren Bereichen der Grube, die auf der Transportverzögerung bis zur 700-m-Sohle beruht.
- Die aus der Grube insgesamt freigesetzte Radiotoxizität beträgt nur noch 5 Promille der Anfangstoxizität, d.h. die Rückhaltung in der Grube bis zum Austritt in das Deckgebirge beträgt ca. 99,5 %. Verglichen mit der Rückhaltung des LAW-Inventars unterhalb der 700-m-Sohle ergibt sich eine weitere Rückhaltung im Baufeld in der Südflanke um einen Faktor 5.

⁵⁰ Die relative Freisetzung kann dadurch auf Werte über 1 steigen.

- Die Freisetzung aus dem Gesamtsystem, d.h. beim Übergang in die Biosphäre, beträgt ca. 1 Promille. Das bedeutet, dass die Rückhaltung im Deckgebirge langfristig nur einen Faktor 5 bewirkt, allerdings bei Vernachlässigung der Sorption im Deckgebirge. Die Freisetzung erfolgt hauptsächlich entlang des Haupttransportpfads zum Exfiltrationsgebiet im Tal von Wittmar (m-Witt).

Zusammenfassend lassen sich die Ergebnisse für diesen Indikator wie folgt interpretieren: Es gibt eine relevante Rückhaltung der Radionuklide im unteren Grubengebäude bis zum Eintritt in das Baufeld in der Südflanke auf der 700-m-Sohle, die etwa den Faktor 40 beträgt. Die berechnete Rückhaltung des gesamten Systems beläuft sich auf einen Faktor von rund 1000. Dies bedeutet, dass etwa 1 Tausendstel der anfänglichen Radiotoxizität in der Schachanlage bis in die Biosphäre gelangt, allerdings zeitlich verteilt über einige 10 000 Jahre. Die relativ geringe berechnete Rückhaltung im Deckgebirge ist dadurch begründet, dass dort keine Sorption berücksichtigt wurde.

8.3.3.3 *Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser*

Die Aktivitätskonzentration der Radionuklide im Grundwasser eines Exfiltrationsgebiets wird direkt zur Berechnung der potenziellen Strahlenexposition verwendet, wie in Kapitel 7.5.4 dargestellt wird. Für eine Bewertung, die unabhängig von der Biosphärenmodellierung für die Berechnung des Sicherheitsindikators „jährliche effektive Individualdosis“ ist, wird im Folgenden die Aktivitätskonzentration im Grundwasser als Funktionsindikator verwendet. Dieser kann durch die Vergleichsmöglichkeit mit Referenzwerten auch eingeschränkt als Sicherheitsindikator verwendet werden. Das Problem bei der Verwendung als Sicherheitsindikator ist die Ermittlung von Richtwerten für die Bewertung der berechneten Konzentrationen und die Einschränkung auf natürlich auftretende Radionuklide. Die in Grund- und Trinkwässern heutzutage auftretenden Konzentrationen von natürlichen Radionukliden weisen eine große Streubreite auf, aus denen hier keine Aussage bezüglich ihres Gefährdungspotenzials abgeleitet werden soll. In den Tabellen 8.3-1 und 8.3-2 sind in Deutschland ermittelte Aktivitätskonzentrationen von ausgewählten natürlichen Radionukliden im Trinkwasser und im Grundwasser zusammengestellt, wobei sich die unteren Werte der Bandbreite in einigen Fällen durch die analytische Nachweisgrenze ergeben.

Tab. 8.3-1: Radionuklidkonzentrationen in Trinkwasser in Deutschland /BMU 2003/ und /BfS 2006/ (in Klammern)

Radionuklid	Konzentration [Bq/m ³]	
	Median	Bereich
U-238	16 (16)	<0,5 – 310 (0,05 – 440)
U-234	18 (18)	<0,5 – 350 (0,8 – 386)
U-235	1 (1)	<0,2 – 16 (0,1 – 28)
Ra-226	5 (5)	<0,5 – 32 (0,4 – 260)
Ra-226 (Mineralwasser)	23	<0,5 – 310
Th-228	(1)	(0,2 – 22)
Th-230	(1,5)	(0,1 – 9)
Th-232	0,5 (0,5)	<0,1 – 4 (0,1 – 4)
Ra-228	12 (12)	<0,5 – 23 (4,5 – 130)
Rn-222	5900	<1000 – 160 000
Pb-210	7 (6)	<0,2 – 170 (1 – 620)

* außer für Ra-226 stammen die Messwerte des BfS aus Bergbaugebieten in Sachsen und Thüringen

Tab. 8.3-2: Radionuklidkonzentrationen in Grundwasser in Deutschland /BMU 2003/

Radionuklid	Konzentration [Bq/m ³]	
	Median	Bereich
U-238	Nicht angegeben	<1 – 200
Ra-226		<4 – 400
Th-232		<0,4 – 70
Rn-222		2000 – 1 500 000

Die Schwankungsbreite ist mit ca. zwei Größenordnungen sehr groß. In der Abbildung 8.3-8 sind die o.g. Bandbreiten der gemessenen Radionuklidkonzentrationen als Balken eingezeichnet. Als Vergleich sind, ebenfalls als Bandbreiten, die maximalen Konzentrationen in den drei betrachteten Exfiltrationsgebieten für die kombinierte Variante eingezeichnet.

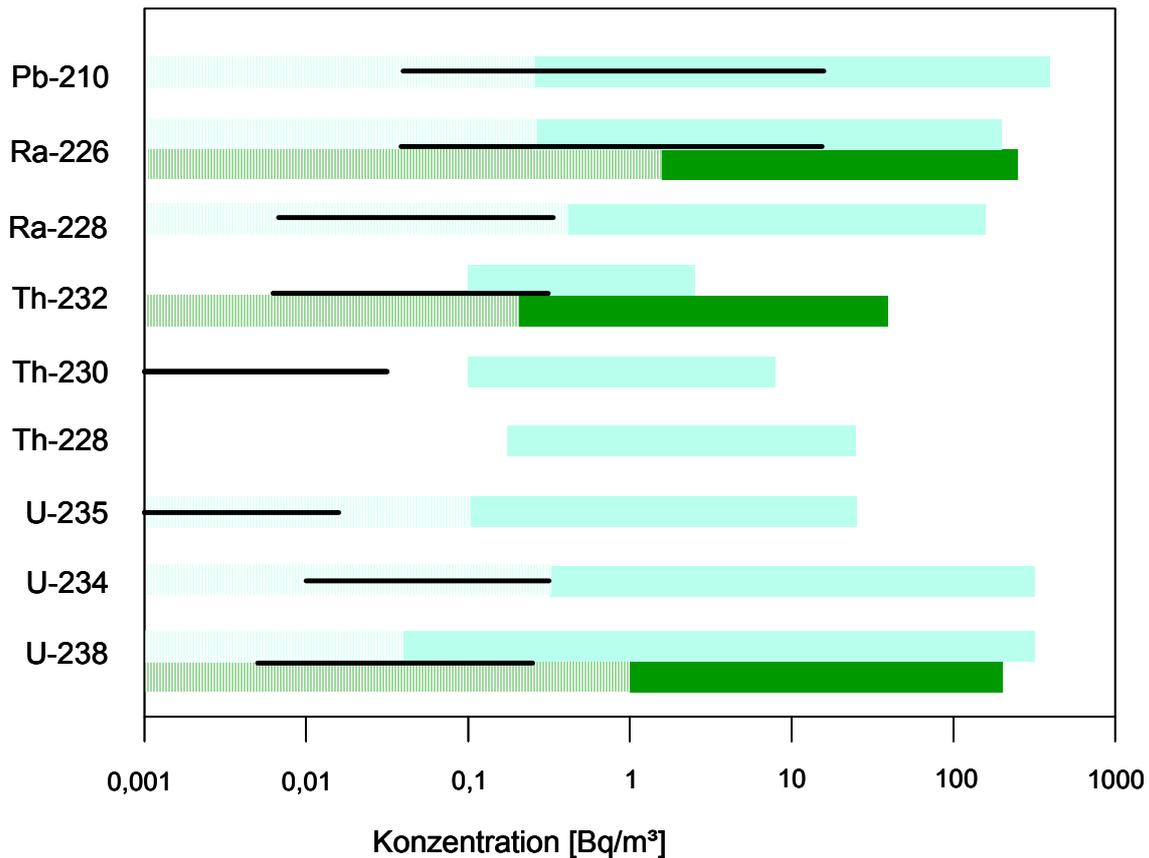


Abb. 8.3-8: Vergleich der gemessenen Radionuklidkonzentrationen in natürlichen Wässern mit berechneten Werten für die kombinierte Variante⁵¹
 Hellgrün: Trinkwasser; gestrichelt: unterhalb der analyt. Nachweisgrenze,
 dunkelgrün: Grundwasser; gestrichelt: unterhalb der analyt. Nachweisgrenze
 schwarz: Bandbreite der berechneten Werte

Es ist zu erkennen, dass die berechneten Aktivitätskonzentrationen unterhalb oder im unteren Bereich der in den Tabellen 8.3-1 und 8.3-2 angegebenen Bandbreite der gemessenen Konzentrationen liegen. Dieser Funktionsindikator illustriert für die ausgewählten Radionuklide, dass die potenzielle Freisetzung nur zu geringen Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser führt.

8.4 Bewertung der Sicherheitsanalyse

Im Folgenden wird zunächst auf den Aspekt der Vertrauenswürdigkeit des Nachweises eingegangen („confidence“), danach werden die Methoden und Ergebnisse der vorgenommenen Untersuchungen einzeln bewertet. Abschließend erfolgt eine Bewertung der Einhaltung der Schutzziele. Da alle Bewertungen bereits in den Kapiteln 6 und 7 angesprochen wurden, sind die folgenden Ausführungen knapp gehalten und auf die wesentlichen Aussagen beschränkt.

⁵¹ Für U-238 ist das Maximum der Konzentrationen in den Rechnungen noch nicht erreicht.

8.4.1 Vertrauenswürdigkeit und Verlässlichkeit des Nachweises (confidence)

Die Akzeptanz des Sicherheitsnachweises hängt stark von der Vertrauenswürdigkeit und Verlässlichkeit der durchgeführten Untersuchungen ab. Dies bezieht sich auf das Vertrauen in die beteiligten Institutionen, in die Entscheidungsprozesse bei der Entwicklung des technischen Konzeptes, in die Machbarkeit und Kontrolle des technischen Konzepts sowie in die Wirksamkeit des technischen Konzepts und der natürlichen Barrieren, die Umwelt vor unerwünschten Folgen der Anlage zu schützen /NEA 2006/. Im Folgenden werden nur der Aspekt des Vertrauens in das Nachweiskonzept und seine Bewertung vertieft.

Generell muss ein Sicherheitsnachweis auf bewährten wissenschaftlichen Methoden beruhen und die Analysen müssen stringent und transparent durchgeführt sein. Die verwendeten Methoden müssen der Aufgabenstellung angemessen, verifiziert und transparent dokumentiert sein. In diesem Sinn werden unterschiedliche Analysen bzw. Rechenverfahren angewendet, um unterschiedliche Zwecke zu verfolgen. Beispielsweise können bei den deterministischen Verfahren konservative Parameterwerte angewendet werden, um die Grenzen und die Robustheit des Systems zu untersuchen und beste Schätzwerte, um ein allgemeines Verständnis für das Systemverhalten zu bekommen. Hierauf wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

Wie bereits in Kapitel 8.1 zum Nachweiskonzept ausgeführt, ist für den Standort Asse die Entwicklung eines vollständigen „safety case“, wie international für ein neu zu errichtendes Endlager für radioaktive Abfälle gefordert, nicht möglich. Es handelt sich um ein ehemaliges Bergwerk, das für Forschungszwecke ausgewählt wurde und als Folge der ausgeführten Arbeiten radioaktive Abfälle enthält. Insofern ist die Schachtanlage Asse eine Altlast, für welche die Anforderungen eines „safety case“ nur eingeschränkt gelten. Trotzdem wurden im vorliegenden Bericht wesentliche Aspekte der Vorgehensweise für die Entwicklung eines „safety case“ berücksichtigt, beispielsweise durch die Struktur des Nachweiskonzepts, die Anwendung des Standes von Wissenschaft und Technik, wie sie bei Sicherheitsnachweisen für Endlager angewendet wird, oder die Analyse ergänzender sicherheitsrelevanter Aspekte (vgl. Kapitel 8.3). Diese Vorgehensweise dient der Erhöhung des Vertrauens in den Sicherheitsnachweis.

8.4.2 Bewertung der Nachweismodelle und Berechnungen

Die Langzeitsicherheit für den Standort Asse wurde unter Voraussetzung einer adäquaten Umsetzung des Schließungskonzepts in Bezug auf mehrere Schutzziele analysiert. Dazu wurden entsprechende konzeptionelle und numerische Modelle und Rechenprogramme eingesetzt. Die folgende Bewertung der Sicherheitsanalyse geht auf jeden dieser Aspekte und auf übergeordnete Ergebnisse ein. Zunächst werden die Modelle und die Berechnungen für Einzelprozesse und Teilsysteme bewertet, danach wird auf die Konsequenzenanalyse eingegangen.

8.4.2.1 Modelle und Berechnungen für Einzelprozesse und Teilsysteme

Den in Kapitel 6 diskutierten Rechnungen zu Einzelprozessen und Teilsystemen liegen durchweg Modelle und Rechenverfahren zu Grunde, die den gestellten Anforderungen genügen. Sie wurden jeweils mit Rechenprogrammen durchgeführt, die internationalem Standard entsprechen. Dies ist in Kapitel 6 jeweils dokumentiert und wird im Folgenden für die einzelnen Berechnungen bewertet.

Geochemische Modellrechnungen für die Einlagerungskammern

Zur Ermittlung des Radionuklid-Quellterms sind die langfristig zu erwartenden, maximal möglichen Konzentrationen von Americium, Neptunium, Plutonium, Radium, Strontium, Thorium und Uran in den Einlagerungskammern mittels thermodynamischer Modellrechnungen berechnet worden. Hierzu war die jeweils kammer-spezifische Entwicklung des geochemischen Milieus zu modellieren. Für die thermodynamischen Modellrechnungen wurde das anerkannte Programmpaket EQ3/6 eingesetzt, das bereits in anderen Sicherheitsanalysen für Endlager mit radioaktiven Abfällen verwendet wurde. Die validierte Datenbasis ist um standort-spezifisch relevante aquatische Spezies und Festphasen, z.B. für Actiniden, ergänzt worden. Die Ergänzungen der Datensätze basieren auf experimentellen Untersuchungen und aktuellen Veröffentlichungen. Die Ergebnisse der thermodynamischen Modellrechnungen wurden durch experimentelle Untersuchungen bestätigt.

Für die Modellrechnungen wird vorausgesetzt, dass sich langfristig ein Zustand einstellt, in dem sich Lösung, Gas und Festphasen im Gleichgewicht befinden und die Einlagerungskammern somit jeweils als quasi-geschlossenes System betrachtet werden können. Eine Überprüfung der Anwendbarkeit dieses Modellansatzes durch hydraulische und chemische Modellrechnungen ergab, dass über lange Zeiträume keine signifikanten Einflüsse auf die Radionuklidlöslichkeiten durch Austauschströme zu erwarten sind und dass die Ergebnisse der thermodynamischen Modellrechnungen die Verhältnisse im realen System hinreichend genau widerspiegeln.

Die Modellrechnungen und die Experimente zeigen, dass sich mit dem Umsetzen der Kammerinhaltsstoffe neutrale bis alkalische Milieubedingungen einstellen und die Konzentrationen von gelöstem anorganischem Kohlenstoff in den Einlagerungskammern begrenzt sind (außer in der Einlagerungskammer 2/750Na2). Die berechneten Elementlöslichkeiten stimmen zu-meist gut mit gemessenen Werten überein. Für einige Einlagerungskammern wurden Werte für die maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium und Americium ermittelt, bei denen neben Löslichkeiten auch Sorptionseffekte berücksichtigt werden. Diese wurden aus Experimenten mit spezifischen Lösung-Feststoff-Systemen abgeleitet. Die berechneten, maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium, Thorium, Uran und – in Einzelfällen auch – Americium zeigen in zahlreichen Einlagerungskammern eine wirksame geochemische Begrenzung der Mobilisierung dieser Radionuklide.

Die maximal möglichen Konzentrationen von Plutonium, Thorium und Uran zeigen in den Einlagerungskammern nur geringe Unterschiede. Das liegt an den langfristig stabilen, neutral bis schwach alkalischen, entweder MgCl₂- oder NaCl-betonten Lösungen in den Einlage-

rungskammern. In den Einlagerungskammern 6/750 und 11/750 in denen sich stärker alkalische, CaCl_2 -betonte Lösungen bilden werden, sowie in der Einlagerungskammer 2/750Na2, die evtl. schwach saure Bedingungen aufweisen kann, sind die o.g. maximal möglichen Konzentrationen höher und wirken dadurch teilweise nicht begrenzend auf die Mobilisierung.

Ermittlung von Radionuklid-Quelltermen für Einlagerungsbereiche

Radionuklid-Quellterme beschreiben die Konzentrationen der Radionuklide in Lösung, die aus den Abfällen mobilisiert und aus den Einlagerungsbereichen heraus transportiert werden. Diese Quellterme leiten sich jeweils aus den maximal möglichen Konzentrationen der entsprechenden Elemente unter Berücksichtigung der Isotopenverhältnisse oder – falls sich durch das Inventar eine geringere als die maximal mögliche Konzentration errechnet – aus den vorhandenen Inventaren der Radionuklide im Einlagerungsbereich ab.

Zur Ableitung der maximal möglichen Elementkonzentrationen für einen Einlagerungsbereich werden für jede seiner Einlagerungskammern auf der Basis von thermodynamischen Modellrechnungen oder experimentellen Befunden maximal mögliche Elementkonzentrationen, die beim jeweiligen geochemischen Milieu durch die Löslichkeit des Elementes und ggf. durch Sorptionseffekte bestimmt sind. Die mögliche zeitliche Veränderung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern durch Lösungsaustausch zwischen den Grubenbauen in einem Einlagerungsbereich sowie zwischen diesen und dem Nahbereich wird ebenso berücksichtigt wie die Lösungsmengen, die aus dem Einlagerungsbereich auf verschiedenen Wegen heraus transportiert werden. Die Lösungsbewegungen werden für jeweils einen Einlagerungsbereich anhand von detaillierten Strukturmodellen mit dem Programm KAFKA berechnet. Ungewissheiten, u.A. bezüglich der hydraulischen Eigenschaften in den Einlagerungsbereichen, wirken sich in einem gewissen Maß auf die maximal möglichen Elementkonzentrationen aus. Diese Ungewissheiten liegen jedoch innerhalb der Bandbreite der ermittelten maximalen Elementkonzentrationen, die in den meisten Fällen ca. zwei Größenordnungen betragen und sich aus den Ungewissheiten der thermodynamischen Daten und Berechnungen ergeben.

Das Verfahren zur Ermittlung der maximal möglichen Elementkonzentrationen führt zu realistischen Werten, die als Eingangsdaten für die Transportmodellierung verwendet werden können. Die der gewählten Vorgehensweise innewohnenden Ungewissheiten werden durch die oberen und unteren Bandbreiten der maximal möglichen Elementkonzentrationen angemessen berücksichtigt. Die Konsequenzen wurden in Parametervariationen und in der probabilistischen Unsicherheitsanalyse untersucht.

Gasbildung

Die Gasbildung ist ein transportbeeinflussender Prozess, der in den Modellrechnungen zur Fluidbewegung und Schadstoffausbreitung im Langzeitsicherheitsnachweis berücksichtigt wird. Die Inventare der Gas bildenden Stoffe sind umfassend dokumentiert und genügen den Anforderungen für den Langzeitsicherheitsnachweis. Außerhalb der Einlagerungskammern

befindliche Gas bildende Stoffe wurden gewürdigt, sind aber für den Sicherheitsnachweis wegen der geringen Mengen nicht relevant.

Zur Ermittlung einer umfassenden Bandbreite der Gasbildung wurde die Variationsbreite der erwarteten pH-Werte in den Modellrechnungen zu Grunde gelegt. Unter den Bedingungen im Grubengebäude dominiert die Gasbildung durch Metallkorrosion über den gesamten Betrachtungszeitraum. Korrosionsraten von Metallen unter salinen Bedingungen wurden in Laborexperimenten und an realen Abfallbinden untersucht und auf die Standortbedingungen angewandt. Die Abbauraten und Gasbildungspotenziale der organischen Substanzen wurden aus Analogiebetrachtungen und experimentellen Untersuchung abgeleitet. Es wurde eine Referenzentwicklung für die mikrobielle Gasbildung formuliert, die auf realistischen Annahmen beruht und ausführlich begründet ist. Über das radioaktive Inventar und eine konservative Annahme zur H₂-Bildung durch radiolytische Spaltung von Wasser mittels eines G(H₂)-Wertes für saline Lösungen wurde die radiolytische Gasbildung als maximale Obergrenze abgeschätzt und damit im Langzeitsicherheitsnachweis ausreichend berücksichtigt.

Konvektion

Aufgrund von Dichteänderungen durch Wechselwirkung des Schutzfluids mit Mg-Depot und Zementstein ist konvektive Lösungsbewegung im Grubengebäude während beschränkter Zeitperioden zwischen den Einlagerungsbereichen auf der 750-m-Sohle im Jüngeren Steinsalz und den Abbauen auf der 725-m-Sohle bzw. dem Abbau 12 Ost des Carnallit-Baufeldes zu erwarten. In anderen Bereichen der Grube ist konvektive Lösungsbewegung auszuschließen. In den Modellrechnungen zur Schadstoffausbreitung im Grubengebäude werden die Auswirkungen der konvektiven Lösungsbewegungen durch erhöhte Werte für die Porendiffusivität näherungsweise berücksichtigt.

Die Berechnung der erhöhten Werte der Porendiffusivität erfolgt durch Auswertung der gleichen Modellergebnisse zur Lösungsbewegung in und um die Einlagerungsbereiche, die auch für die Berechnung der maximal möglichen Elementkonzentrationen für die Einlagerungsbereiche verwendet werden, siehe oben. Diese mit Detailmodellen des Grubengebäudes unter Berücksichtigung von Dichteunterschieden ermittelten Ergebnisse beinhalten Ungewissheiten, die in erster Linie auf Datenunsicherheiten bezüglich Permeabilitäten innerhalb der Einlagerungsbereiche und auf die vorgenommene Diskretisierung in den Detailmodellen zurückgehen. Die resultierende Ungewissheit der erhöhten Porendiffusivität ist angesichts der relativ geringen Bedeutung, die dieser Parameter bei durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen in Bezug auf die Schadstofffreisetzung zeigte, ohne Einfluss auf den Langzeitsicherheitsnachweis.

Gebirgsmechanische Modellrechnungen

Mit gebirgsmechanischen Modellrechnungen wurde auf Grundlage der Standortdaten analysiert, ob die Resttragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes während der Durchführung der Schließungsmaßnahmen erhalten bleibt. Auf Grund der in streichender Richtung etwa symmetrischen Anordnung der Hohlräume wurde für die Modellrechnungen ein vertikales

les in Südwest-Nordost-Richtung durch den Asse-Sattel angeordnetes 2D-Modell mit 6,3 km Länge und ca. 2,4 km Höhe genutzt. Zur Modellkalibrierung und Überprüfung kamen zusätzlich 3D-Modelle zum Einsatz. Die Modelle berücksichtigen die Gesteinseigenschaften, die Gebirgsspannungssituation, den Ablauf und die Geometrie der Hohlraumerstellung, Qualität und Zeitpunkt der Versatzeinbringung, die messtechnisch erfassten Verformungen sowie die Erwärmung des Gesteins mit zunehmender Tiefe.

Durch Vergleich der Modellrechnungen für die jüngere Vergangenheit mit den geotechnischen und markscheiderischen Messungen konnten die Modelle erfolgreich kalibriert werden, diese bilden deshalb ein verlässliches Werkzeug für die Prognose der gebirgsmechanischen Entwicklung in der zukünftigen Betriebs- und Nachbetriebsphase.

Die Modellrechnungen zeigten, dass die Konvergenz der Grubenbaue auch während des Einleitens von Schutzfluid gleich bleibend bis degressiv verläuft und die Resttragfähigkeit der Tragelemente des Grubengebäudes erhalten bleibt. Die Analyse zeigte weiter, dass durch die erfolgten Verformungen im Deckgebirge Gebirgsbereiche mit markanten Scherdeformationen entstanden sind, die von der oberen Abbaukante des Grubengebäudes nach Süden ansteigend durch den Rötakitard reichen.

Detailrechnungen zu Fluidbewegungen im Grubengebäude

Mit Detailrechnungen zu Fluidbewegungen im Grubengebäude wurde untersucht, ob und ggf. unter welchen Bedingungen Lösung in den Fasskegel der MAW-Kammer, d.h. unter die Sorelbetonglocke, zutreten kann. Dazu wurde ein gekoppeltes Zweiphasen-Modell des MAW-Fasskegels, des MAW-Nahbereichs und des angrenzenden Baufelds in der Südflanke entwickelt. Die numerischen Berechnungen erfolgten mit einem international genutzten und verifizierten Rechenprogramm entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Die Modellrechnungen zeigen, dass die relevanten Ergebnisse vorwiegend von belastbar bekannten Sachverhalten und nur untergeordnet von Daten mit erheblichen Ungewissheiten abhängen. Zu den ersteren zählen die Permeabilität von Salzversatz und die geometrischen Abmessungen von Grubenbauen, die letzteren umfassen Zweiphasen-Parameter und die Leitfähigkeit von postulierten Wegsamkeiten durch desintegrierte Bereiche von Schweben und Pfeilern. Keine der durchgeführten Modellrechnungen ergab einen Anstieg des Lösungspegels bis in den Fasskegel. Für die Referenzentwicklung konnte deshalb angesetzt werden, dass kein Lösungszutritt zu den MAW erfolgt. Um den verbleibenden Ungewissheiten gerecht zu werden, wurden ein Lösungszutritt in einer alternativen Szenariengruppe mit geringer bis mäßiger Eintretenswahrscheinlichkeit unterstellt und die Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit quantitativ ermittelt. Damit gehen qualitative, jedoch keine quantitativen Ergebnisse der Zweiphasenrechnung zum Lösungsanstieg in den MAW-Fasskegel in den Langzeitsicherheitsnachweis ein. Dies erfolgt in einer Weise, die der Belastbarkeit der Ergebnisse gerecht wird.

Hydrogeologische Modellrechnungen

In den hydrogeologischen Modellrechnungen zum Deckgebirge werden die folgenden Themen behandelt: Ausbreitung der Schadstoffe in der Nachbetriebsphase, integraler hydraulischer Widerstand des Deckgebirges gegen das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude und – für die Betriebsphase – der aus hydraulischer Sicht zulässige maximale pneumatische Stützdruck während des Einleitens des Schutzfluids in das Baufeld in der Südflanke. Die Modellrechnungen wurden nach dem Stand von Wissenschaft und Technik mit einem dreidimensionalen Modell und unter Berücksichtigung von variabler Dichte und Viskosität der Lösung im Deckgebirge durchgeführt. Zum Einsatz gelangte dabei ein Rechenprogramm, das international für vergleichbare Aufgabenstellungen genutzt wird und mehrfach verifiziert wurde.

Die Datenlage ist – im Hinblick auf die Zielsetzung der Modellrechnungen – im Allgemeinen als befriedigend bis gut einzustufen. Ungewissheiten konnten mit pessimistischen Annahmen oder Parametervariationen angemessen berücksichtigt werden. Ausnahmen bilden einzelne Parameter, welche die lokalen, durch die Taleinschnitte der Ammerbeek und des Rothebachs erzeugten Fließsysteme im Muschelkalk mitbestimmen.

Die Modellergebnisse, die Eingang in den Langzeitsicherheitsnachweis gefunden haben, sind das Produkt einer längeren Reihe von Modellrechnungen mit einem stufenweise weiterentwickelten Modell, die zur Überprüfung von vereinfachten numerischen Modellrechnungen und analytischen Abschätzungen begleitet waren. Der Vergleich mit beobachtbaren Größen ergab befriedigende Übereinstimmungen, jedoch keine Qualifizierung der Datenbasis. Die Belastbarkeit der Modellergebnisse entspricht damit im Wesentlichen jener der Eingangsdaten. Neben den durch die Modellrechnungen aufgespannten Bandbreiten bestimmt nach Einschätzung der Autoren hauptsächlich die oben angesprochene Ungewissheit zu Parametern der lokalen Fließsysteme im Muschelkalk die Belastbarkeit der Ergebnisse. Das mit den Modellrechnungen entwickelte Systemverständnis ist gut, und die Ergebnisse sind angesichts beobachtbarer Größen plausibel. Die Ergebnisse lassen sich ohne zusätzliche Erkundungen nicht weiter eingrenzen.

Modellrechnungen zur Biosphäre

Das Biosphärenmodell basiert auf Berechnungsvorschriften, die sich an die aktuelle Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) und die geplante Neufassung der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift (AVV) hierzu anlehnen. Es entspricht damit in der Grundlage dem derzeit akzeptierten Stand von Wissenschaft und Technik. Standortspezifische Besonderheiten, wie das Fehlen der Beregnung von landwirtschaftlich genutzten Flächen, werden berücksichtigt und führen zu Abweichungen von der AVV. Dosisumwandlungsfaktoren wurden für Erwachsene und gesondert für Radionuklidfreisetzungen auf dem Lösungspfad und auf dem Gaspfad (für letzteren bei einer Freisetzung in eine Landwirtschaftsfläche) ermittelt und im Langzeitsicherheitsnachweis verwendet.

Das Biosphärenmodell ist für die Berechnung potenzieller Strahlenexpositionen für den Standort Asse geeignet, da sich das Berechnungsverfahren eng an die AVV anlehnt und

standortspezifische Gegebenheiten berücksichtigt. Die Parameter werden in realistischer Weise angesetzt.

8.4.2.2 Modelle und Berechnungen für die Konsequenzenanalyse

Gebirgsmechanische Langzeitprognose

In der gebirgsmechanischen Langzeitprognose wird von der Umsetzung der im Schließungskonzept vorgesehenen technischen Maßnahmen ausgegangen. Dies ist für eine ausreichende Stabilisierung des Tragsystems und somit für die Schaffung prognosefähiger Ausgangsbedingungen erforderlich. Auf Grundlage der durch Laboruntersuchungen ermittelten Festigkeitseigenschaften der anstehenden Gesteine und Versatzmaterialien im trockenen und mit Schutzfluid getränkten Zustand sowie unter Berücksichtigung der in der Vergangenheit festgestellten Verformungen wurde die Konvergenzentwicklung für den Betrachtungszeitraum mit einem 2D-Modell prognostiziert. Die Berechnungsverfahren entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die Plausibilität der Berechnungsergebnisse wurde durch die laufenden geotechnischen und markscheiderischen Messungen und durch Analogiebetrachtungen zu gefluteten Salzbergwerken belegt. Um die Konsistenz zu den Transportmodellierungen zu gewährleisten, wurde die Fluiddruckentwicklung an der Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge aus den Transportrechnungen übernommen.

Die Berechnungen ergeben, dass durch die eingebrachten Versatzstoffe und den Fluidinnendruck des Schutzfluids die Tragelemente des Grubengebäudes stabilisiert werden und die gegenwärtigen Konvergenzraten um mehr als eine Größenordnung zurückgehen. Der dominierende Einfluss des Fluidinnendrucks bewirkt, dass die Bandbreite der prognostizierten Konvergenzraten sich deutlich verkleinert. Durch die zunehmende Kompaktierung des Versatzes nimmt dessen Widerstand gegen die Konvergenz langsam zu und es ergibt sich eine degressive Entwicklung der Konvergenzraten. Der hydraulische Widerstand des Deckgebirges gegen die Auspressung des Schutzfluids aus dem Grubengebäude führt in der frühen und mittleren Nachbetriebsphase zu einem über dem hydrostatischen Niveau liegenden Fluiddruck im Grubengebäude, der die Verformung im Grubengebäude weiter reduziert. Mit der langfristig insgesamt sinkenden Lösungsverdrängung durch Konvergenz und Gasspeicherung verliert dieser Effekt aber an Bedeutung.

Die Berechnungen zu den Auswirkungen eines Bemessungserdbebens der Intensität MSK VI $\frac{1}{2}$ in der frühen Nachbetriebsphase ergaben, dass ein solches Ereignis den Erhalt der Resttragfähigkeit des Grubengebäudes nicht beeinträchtigen würde und sich auch nicht signifikant auf die Konvergenzentwicklung auswirkt.

Die Auswirkungen einer Eiszeit mit 600 m Eisauflast sowie eine asymmetrische Eisüberschiebung am Standort wurden im Hinblick auf die Konvergenzentwicklung untersucht. Aufgrund der mäßigen Erhöhung der Lösungsauspressrate, die von der Vergletscherung verursacht wird, und der deutlich niedrigeren Radiotoxizität in der Schachanlage zum Zeitpunkt der Vergletscherung sind die radiologischen Auswirkungen einer Vergletscherung gering.

Bergschadenkundliche Senkungsvorausberechnung

Die Senkungsvorausberechnung wurde auf der Basis eines anerkannten Rechenverfahrens durchgeführt. Die Berechnung und Prognose der durch den Bergbau verursachten Senkungen der Erdoberfläche basieren auf dem beobachteten Zusammenhang zwischen den untertägigen Verformungen und den Oberflächenabsenkungen. Derartige Prognoserechnungen sind Stand von Wissenschaft und Technik bei der Schließung von Bergwerken. Für die Berechnung wurden die Kennwerte der Funktionen unter Verwendung der gemessenen übertägigen Senkungen und der aktuellen Verformungsdaten angepasst. Hierbei ergab sich, dass das jährlich durch die Senkungen entstandene Volumen der Senkungsmulde praktisch identisch mit der untertägigen Konvergenz der Hohlräume ist. Die Prognoserechnungen erstrecken sich über einen Zeitraum von 100 000 Jahren. Zur Prognose der maximal zu erwartenden Gesamtsenkung wurde die Berechnung unter Berücksichtigung der Konvergenz des gesamten Porenraums bis 1 000 000 Jahre fortgesetzt. Weiterhin wurden die Zerrungen und Pressungen nach dem Verfahren von Knothe bestimmt.

Die derzeit etwa konstanten Senkungsgeschwindigkeiten von maximal 11 mm/a reduzieren sich nach Einstellung des vollen hydrostatischen Druckes im Grubengebäude analog zum Rückgang der Konvergenzen im Grubengebäude. Nach etwa 100 Jahren liegen die berechneten Senkungsraten bei maximal 0,7 mm/a, die messtechnisch kaum noch nachweisbar sind, da sie von Höhenänderungen, die z. B. durch natürliche Veränderungen des Grundwasserspiegels, entstehen, überdeckt werden. Kumulativ kommt es im Zentrum der Senkungsmulde während eines Zeitraums von 100 000 Jahren zu einer maximalen Oberflächenabsenkung von 1,26 m. Berücksichtigt man die bis heute aufgetretene Senkung sowie die Prognoseunsicherheiten von 10 %, sind langfristig maximale Gesamtsenkungen von insgesamt ca. 1,5 bis 1,65 m zu erwarten.

Nach den Beobachtungen der bisherigen Auswirkungen der Senkungen und da es sich um eine kleinräumige und sehr langsam absinkende Mulde handelt, ist auch langfristig nur von minimalen lokalen Auswirkungen auf die Grundwasserverhältnisse, die Oberfläche und andere Schutzgüter auszugehen. Die oberflächlichen Deformationen werden keine Gefährdung für Bauwerke darstellen. An der Tagesoberfläche werden die bergbaubedingten Senkungen im Prognosezeitraum durch die Auswirkungen von Erosions- und Subrosionsprozessen sowie klimatischen Veränderungen überprägt werden.

Potenzielle Freisetzung wasserrechtlich relevanter Stoffe

Die Modellrechnungen verwenden einfache Methoden zur Ableitung des Quellterms aus dem Schadstoffinventar in den Einlagerungsbereichen und – zur Berücksichtigung der Transportprozesse – Verdünnungsfaktoren, die aus den Modellrechnungen zur Ausbreitung von Radionukliden auf dem Lösungspfad ermittelt wurden.

Für die Ermittlung des Quellterms wurden alle wasserrechtlich relevanten Stoffe in den Abfällen, Abfallbehältern und Abfallmatrizes sowie in den noch einzubringenden Versatzstoffen erfasst. Bei der Mobilisierung der Stoffe sind die spezifischen Milieubedingungen berücksichtigt worden. Diese Vorgehensweise führt zu einem abdeckenden Quellterm, dessen maxima-

le Stoffkonzentrationen entweder inventarbestimmt sind oder durch Löslichkeiten begrenzt werden.

Die mögliche Verunreinigung des Grundwassers durch wasserrechtlich relevante Stoffe wird über eine Verdünnung der einzelnen Stoffkonzentrationen im Gesamtsystem bis hin zu einem angenommenen Übertritt in das oberflächennahe Grundwasser berechnet. Dabei bleibt die Rückhaltung durch Ausfällungen und Sorption außerhalb der Einlagerungsbereiche unberücksichtigt. Die so ermittelten Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser werden mit den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung bzw. mit den Prüfwerten der einschlägigen Regelwerke verglichen. Es wurde nachgewiesen, dass die künftige Gefahr einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität bzw. eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Das wasserrechtliche Schutzziel wird deshalb bei anforderungsgerechter Umsetzung der Schließungsmaßnahmen eingehalten.

Potenzielle Strahlenexposition über den Lösungspfad

Die Berechnungen für den Lösungspfad wurden unter Anwendung erprobter Rechenverfahren und Rechenprogramme durchgeführt, und es kamen deterministische und probabilistische Verfahren zum Einsatz. Die zugrunde gelegten Modelle und Methoden sind der Problemstellung angemessen und entsprechen dem Stand von Wissenschaft und Technik; die eingesetzten Rechenprogramme wurden verifiziert und sind dokumentiert.

Durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Rechenprogrammen gab es teilweise Überschneidungen in den berechneten Ergebnissen, beispielsweise bei der Freisetzung von Lösungen und Schadstoffen aus dem Grubengebäude. Der Vergleich der mit den beiden Programmen berechneten Ergebnisse zeigte stets eine gute Übereinstimmung, so dass der Zuverlässigkeit der berechneten potenziellen Strahlenexpositionen Vertrauen geschenkt wird. Die beiden Rechenprogramme wurden von Colenco und GRS entwickelt, d.h. von Organisationen, die an dem Projekt Langzeitsicherheit Asse direkt beteiligt sind.

Als wesentliche Einflussgrößen für den Schadstofftransport und bezüglich der Einhaltung des Schutzziels haben sich der Quellterm, die Kanalisierung im Baufeld in der Südflanke, die Konvergenz und der Transport im Deckgebirge herausgestellt. Die Unsicherheiten in allen Einflussgrößen wurden durch Variation in einer großen Bandbreite in den deterministischen und probabilistischen Rechnungen berücksichtigt.

In allen deterministischen Analysen wurde der Bewertungsmaßstab von 0,3 mSv/a eingehalten, wobei die Rückhaltung der Radionuklide im Deckgebirge durch Sorption nicht berücksichtigt wurde. In den Rechnungen zu einer als wahrscheinlich eingestuften Realisierung des Referenzszenarios (kombinierte Variante) liegt die berechnete maximale Strahlenexposition etwa einen Faktor 6 unter diesem Wert. In den probabilistischen Rechnungen wurden separate Auswertungen für die drei Exfiltrationsgebiete „verstärktes Deckgebirge – Ammerbeek“ (vD-Amm), „Muschelkalk – Ammerbeek“ (m-Amm) und „Muschelkalk – Tal von Wittmar“ (m-Witt) durchgeführt. Dabei liegen für die Exfiltrationsgebiete m-Amm und m-Witt alle Simulationen unter dem Bewertungsmaßstab von 0,3 mSv/a, für das Exfiltrationsgebiet vD-Amm

liegen 8 von 300 Simulationen über diesem Wert. Die radiologischen Schutzziele für die Ausbreitung über den Lösungspfad werden in allen deterministischen und probabilistischen Rechnungen eingehalten.

Potenzielle Strahlenexposition über den Gaspfad

Die Berechnungen für den Gaspfad wurden unter Verwendung von Modellergebnissen für den Lösungspfad hinsichtlich des Gasaustritts aus der Grube und zusätzlichen, eher ungünstigen Annahmen zur Entstehung und Verteilung von gasförmigen Radionuklidverbindungen im Grubengebäude durchgeführt. Dem Deckgebirge wurde für diesen Freisetzungspfad keine Barrierenwirkung zugeschrieben. Die potenzielle Strahlenexposition wurde für drei sehr verschiedene, in der Kombination abdeckende Ausbreitungs- und Expositionswege in der Biosphäre ermittelt. Für die Berechnungen wurden keine speziellen Rechenprogramme eingesetzt, sondern robuste Modellansätze entwickelt und angewendet, die auf analytischen Berechnungsmethoden beruhen und deshalb direkt verifiziert werden konnten.

Als wichtige Einflussgrößen für die berechnete Strahlenexposition erweisen sich – je nach Biosphärenszenario – die Austrittsrate von gasförmigem ^{14}C aus der Grube oder dessen Konzentration in der Gasphase beim Austritt aus dem Grubengebäude. Mit dem betrachteten Spektrum an Nahfeld-Rechenfällen und in Anbetracht der vernachlässigten Barrierewirkung des Deckgebirges konnten diese Größen ausreichend zuverlässig ermittelt werden. In allen Analysen wurde der Bewertungsmaßstab von 0,3 mSv/a eingehalten. Für wahrscheinliche Verhältnisse im Grubengebäude und in der Biosphäre liegt die berechnete potenzielle Strahlenexposition um fast drei Größenordnungen unterhalb dieses Werts, in der ungünstigsten Kombination von Nahfeldszenario und Biosphäre im Bereich dieses Werts, rechnerisch knapp darunter. In Anbetracht der konservativen Vereinfachungen, mit denen der zuletzt angesprochene Wert ermittelt wurde, wird das Schutzziel für die Ausbreitung über den Gaspfad als eingehalten bewertet.

Kritikalitätssicherheit

Der Aspekt des Erreichens eventuell kritischer Anordnungen von spaltbarem Material (Kritikalitätsprüfung) wurde mit zwei unterschiedlichen Methoden entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik untersucht. Es zeigte sich, dass es in keinem Bereich der Grube zu kritischen Anordnungen kommen kann.

8.4.3 Bewertung der Konsistenz zwischen den Modellrechnungen

Für die Modellrechnungen zur Konsequenzenanalyse (vgl. Kapitel 7 und 8.4.2.2) ist die Übernahme von Daten und Modellen aus Berechnungen für Einzelprozesse und Teilsysteme (vgl. Kapitel 6 und 8.4.2.1) erforderlich. Dies ist jeweils ausführlich dokumentiert und die Vorgehensweise ist nachvollziehbar und transparent. Jedoch lassen sich einige Modelle für die Einzelprozesse und Teilsysteme – u.A. aus numerischen Gründen – nicht direkt in die Modellrechnungen zur Konsequenzenanalyse integrieren, ihre Ergebnisse müssen deshalb in

geeigneter Parametrisierung (vereinfacht) übernommen werden. Das Vorgehen ist in den Modellrechnungen zur Konsequenzenanalyse je nach Einzelprozess oder Teilsystem unterschiedlich, z.B. wenn unterschiedliche numerische Verfahren angewendet werden. Zudem ist sicherzustellen, dass bei der Analyse alternativer Szenarien oder generell bei Parametervariationen die Modellrechnungen zu den verschiedenen Einzelprozessen und Teilsystemen abgestimmt werden. Dies ist in Abbildung 8.4-1 dargestellt.

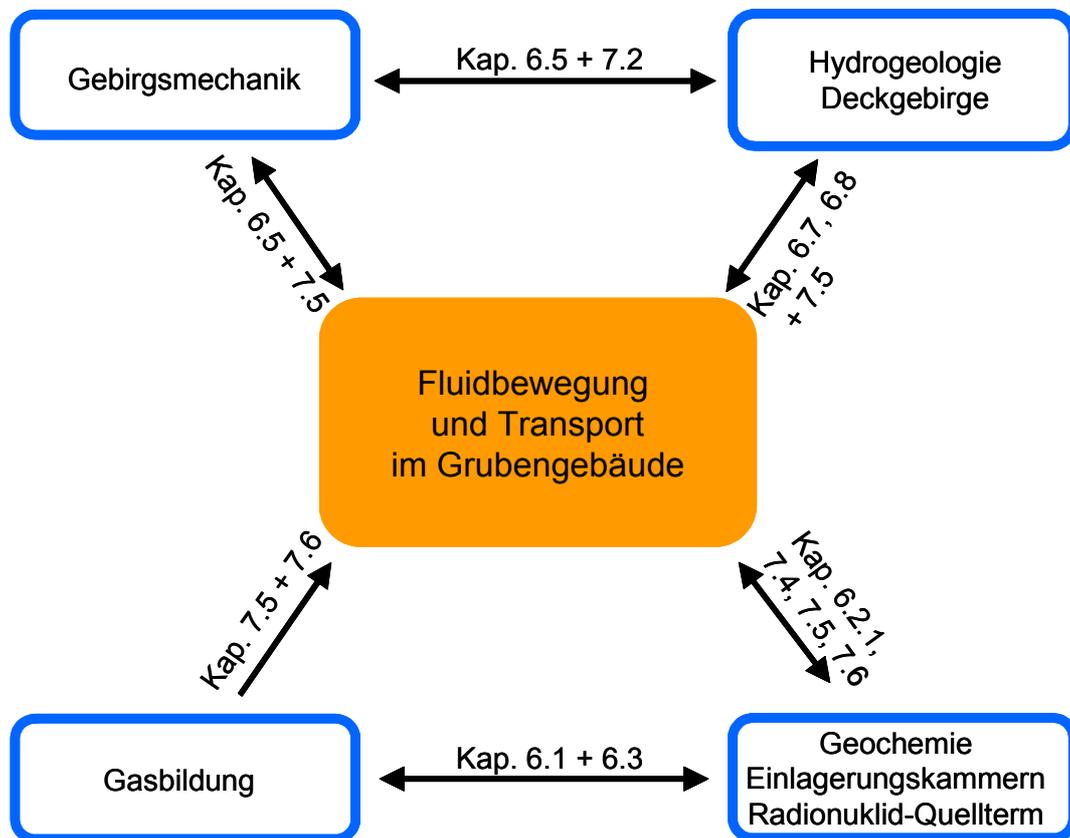


Abb. 8.4-1: Abstimmung der Schnittstellen für Modellrechnungen

Im Folgenden werden die Schnittstellen zwischen den Modellrechnungen bewertet, bei denen wichtige Übergabegrößen bereitgestellt werden. Die hier nicht diskutierten Schnittstellen werden als unproblematisch betrachtet.

Radionuklid-Quellterm: Aus den Modellrechnungen zum geochemischen Milieu in den Einlagerungskammern werden maximal mögliche Elementkonzentrationen für die Einlagerungskammern abgeleitet. Diese Konzentrationen können in den Modellrechnungen zum Schadstofftransport nicht direkt verwendet werden, sondern müssen zu maximal möglichen Elementkonzentrationen für Einlagerungsbereiche zusammengefasst werden. Diese Schnittstelle von den maximal möglichen Elementkonzentrationen zu den Transportrechnungen lässt sich gut realisieren; die Unsicherheiten liegen primär in der Ermittlung der bereichsspezifischen maximal möglichen Elementkonzentrationen. Umgekehrt hängen sowohl die Stabilität des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern als auch die bereichsspezifischen maximal möglichen Elementkonzentrationen von der Lösungsbewegung in den

Einlagerungsbereichen ab. Diese wurde mit speziellen Modellrechnungen für eine als wahrscheinlich eingestufte Realisierung des Referenzszenarios ermittelt, gilt also im engeren Sinn nur für eine Referenzentwicklung, weitere Rechnungen zum geochemischen Milieu für Parametervariationen erfolgten nicht. Veränderungen des geochemischen Milieus und die Ungewissheiten zu den Lösungsbewegungen werden durch die große Bandbreite der bereichsspezifischen maximal möglichen Elementkonzentrationen berücksichtigt.

Konvergenz: Aus gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden sohlenspezifische Konvergenzverläufe für die Grubenbaue ermittelt. Diese Konvergenzverläufe werden in den beiden Rechenprogrammen (KAFKA und LOPOS), die für die Modellrechnungen zum Schadstofftransport eingesetzt werden, übernommen. Die beiden Programme verwenden teilweise unterschiedliche Modellansätze zur Berücksichtigung der Konvergenz, so dass die ermittelten Parameterwerte unterschiedlich sind. Beide Programme geben die gebirgsmechanisch ermittelten Konvergenzverläufe für die dort angesetzten Randbedingungen gut wieder. Es gibt jedoch Abweichungen in den Rechenergebnissen zwischen KAFKA und LOPOS, wenn die Randbedingungen geändert sind. Dies ist in allen Rechnungen u.A. deswegen der Fall, weil in den Modellrechnungen mit KAFKA und LOPOS die Grube feiner diskretisiert ist als in den gebirgsmechanischen Rechnungen, und da die in den Segmenten auftretenden Drücke stark vom hydrostatischen Druck abweichen. In zahlreichen Untersuchungen wurde bestätigt, dass die Abweichungen zwischen den Rechenergebnissen akzeptiert werden können und beide Rechenprogramme die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellrechnungen in einer Weise übernehmen, die für die Transportrechnungen geeignet ist.

Gasbildung: Mit Detailuntersuchungen zu eingelagerten gasbildenden Stoffen und den möglichen Umsetzungen zu Gasen wurden kammer-spezifische Gasbildungsparameter (Gasbildungsrate und gesamt gebildete Gasmenge) ermittelt. Die hieraus abgeleiteten zeitlichen Verläufe der Gasbildung in den Einlagerungsbereichen wurden in den Modellrechnungen zum Schadstofftransport durch geeignete Parametrisierung übernommen. Die so angepassten Kurvenverläufe stimmen sehr gut mit den vorgegebenen Verläufen überein, so dass die Unsicherheiten bezüglich der Gasbildung durch jene der Detailuntersuchungen und nicht durch die Schnittstelle zu den Modellrechnungen bestimmt sind. Der zeitliche Verlauf der Gasbildung und deren Auswirkungen auf die Lösungszusammensetzung können nicht mit der geochemischen Modellierung eines quasi-geschlossenen Systems gekoppelt werden. Daher wurden Ergebnisse der geochemischen Modellierung als konstante Parameter zur Berechnung der Gasbildung übernommen, bzw. die geochemische Modellierung erfolgte unter der Annahme einer festgelegten CO₂-Bildung.

Hydraulische Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge: Der integrale hydraulische Widerstand des Deckgebirges gegen das Auspressen von Lösung aus dem Grubengebäude und dessen zeitliche Änderung wurden für die verschiedenen betrachteten hydrogeologischen Verhältnisse mit hydrogeologischen Modellrechnungen ermittelt. Aus den Ergebnissen wurde eine Parametrisierung der Schnittstelle abgeleitet, die relativ unempfindlich gegen mäßige Änderungen der Auspressrate ist. Die Parametrisierung der Schnittstelle diente den Modellrechnungen zur Fluidbewegung und zum Schadstofftransport im Grubengebäude als Randbedingung. Dadurch sind die Modellrechnungen für die beiden Systemteile

gut aufeinander abgestimmt, und die Ergebnisse der Deckgebirgsmodellierung flossen mit angemessener Genauigkeit in die Modellrechnungen zum Schadstofftransport ein.

Ausbreitung von Schadstoffen im Deckgebirge: Die Ausbreitung von Schadstoffen im Deckgebirge wurde für verschiedene unterstellte hydrogeologische Verhältnisse und gestützt auf darauf abgestimmte Auspressraten aus dem Grubengebäude für zeitlich begrenzte, normierte Schadstoffübertritte aus dem Grubengebäude ermittelt. Die Ergebnisse sind die Transferfunktionen. Mit speziell entwickelten und verifizierten Algorithmen in den Rechenprogrammen für den Schadstofftransport erlaubten die Transferfunktionen, die sich zeitlich ändernde Ausbreitung von Schadstoffen im Deckgebirge für die ebenfalls zeitlich variablen Schadstoffübertritte in das Deckgebirge näherungsweise zu berechnen. Das Vorgehen, mit dem die Ergebnisse der hydrogeologischen Modellrechnungen in die Modellrechnungen zum Schadstofftransport übernommen werden, wird als angemessen und ausreichend genau bewertet.

9 Schlussfolgerungen

Der Nachweis der Langzeitsicherheit des Gesamtsystems Asse folgt dem Vorgehen beim Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager für radioaktive Abfälle. Als Elemente des Nachweises dienen eine Standortbeschreibung mit zugehörigen Modellvorstellungen, das Sicherheits- und Schließungskonzept, Langzeitprognosen, die Szenarienentwicklung, Analysen und Modellrechnungen zu Teilsystemen und Einzeleffekten, Synthese und Modellrechnungen zum Schadstofftransport sowie ergänzende Argumente. Entsprechend ist die Struktur des vorliegenden Berichts angelegt. Innerhalb der Elemente wurden konzeptuelle und – sofern quantitative Auswertungen erfolgen – numerische Modelle entwickelt, Daten für die Modellierung der potenziellen Schadstoffausbreitung und der Senkung der Geländeoberfläche bereitgestellt, Rechnungen durchgeführt sowie Rechenergebnisse bewertet.

Modellrechnungen zum Gesamtsystem Asse erfolgten sowohl in Bezug auf die Ausbreitung von Radionukliden und wasserrechtlich relevanten Schadstoffen als auch in Bezug auf die gebirgsmechanische Entwicklung des Systems und den Schutz der Tagesoberfläche. Für die Simulation der Schadstoffausbreitung wurde ein spezielles vereinfachtes Strukturmodell für die Schachanlage Asse II entwickelt und mit zwei verschiedenen Rechenprogrammen ausgewertet. Die beiden Rechenprogramme (KAFKA und LOPOS) bilden einzelne Prozesse in unterschiedlichem Detaillierungsgrad ab, sie überprüfen und ergänzen sich deshalb gegenseitig. Für die Simulation der gebirgsmechanischen Entwicklung am Standort wurden 2D- und 3D-Modelle und das Rechenprogramm FLAC eingesetzt. Für die Senkungsprognose wurde das auf dem Berechnungsverfahren von Kochmanski beruhende und speziell an den Standort angepasste Programm SubCalc-Asse verwendet. Die Schnittstellen zwischen den verschiedenen Modellen und Modellrechnungen wurden angemessen berücksichtigt. Die Modellrechnungen zum Gesamtsystem, zu Teilsystemen und zu Einzeleffekten führten zu einem guten Systemverständnis.

Es ist hervorzuheben, dass die Langzeitsicherheit der verfüllten und verschlossenen Schachanlage Asse II in Bezug auf die radiologischen und wasserrechtlichen Schutzziele nicht in gleicher Weise, d.h. durch die gleichen Sachverhalte und Prozesse, sichergestellt wird wie bei einem Endlager für radioaktive Abfälle nach international verfolgten Strategien: Es sind nicht gering durchlässige technische Barrieren und geologische Schutzschichten, die eine Schadstofffreisetzung verhindern oder niedrig halten. Die Langzeitsicherheit am Standort beruht auf anderen Sachverhalten und Prozessen. Dies wird nachfolgend dargelegt.

Aufgrund der standortspezifischen Verhältnisse, insbesondere des stattfindenden Lösungszutritts in die Schachanlage, des hohen Durchbauungsgrades der Schachanlage und der erfolgten gebirgsmechanischen Verformungen ist ein vollständiger trockener Einschluss der Abfälle nicht möglich. Ausgehend von diesen Gegebenheiten wurden, nach Evaluation verschiedener Alternativen, ein Sicherheits- und Schließungskonzept entwickelt, die auf einer Nassverwahrung der Abfälle, der Schaffung günstiger geochemischer Verhältnisse und der Vermeidung von hohen Druckunterschieden beruhen.

In der Konsequenz beruht die langzeitige Einhaltung der radiologischen und wasserrechtlichen Schutzziele nach der Schließung der Schachanlage Asse II hauptsächlich auf den nachfolgend aufgeführten Sachverhalten und Prozessen:

- dem Verschließen der Schachanlage in einer Weise, die zu einem wohldefinierten Zustand zu Beginn der Nachbetriebsphase führt
- der beschränkten Mobilisierung von Schadstoffen in den Einlagerungskammern durch Löslichkeitsgrenzen und/oder durch Sorption, letzteres nur im Fall von Radionukliden

Dieser Rückhalteeffekt hängt vom geochemischen Milieu in den Einlagerungskammern und damit von der Wirksamkeit der Strömungsbarrieren und des Mg-Depots ab.

- dem beschränkten Inventar der Schadstoffe, deren Mobilisierung nicht durch Löslichkeit oder Sorption begrenzt wird
- der Transportverzögerung in der Grube von wenigstens 1000 – 3000 Jahren

Dieser Rückhalteeffekt ist wesentlich in Verbindung mit dem nachfolgend aufgeführten „raschen Rückgang der Lösungsauspressung aus der Grube“, denn er führt dazu, dass Schadstoffe höchstens mit geringer Rate in das Deckgebirge übertreten und dadurch zum größten Teil über lange Zeit in der Grube zurückgehalten werden. Die Transportverzögerung in der Grube hängt von den lösungsverdrängenden Prozessen (Konvergenz, Gasspeicherung), der Lenkung der Lösungsbewegung im Nahbereich der Einlagerungskammern durch die technischen Maßnahmen und von der Kanalisierung der Schadstoffausbreitung im Grubengebäude ab.

- der Verdünnung im Grubengebäude

Dieser Effekt ist durch das in der Grube vorhandene Schutzfluid und den örtlich begrenzten Übertritt von Lösung und Schadstoffen in das Deckgebirge gesichert.

- dem markanten Rückgang der Lösungsauspressung aus der Grube innerhalb von einigen 100 Jahren

Der rasche Rückgang der Lösungsauspressung aus der Grube bewirkt in Verbindung mit der o.g. „Transportverzögerung im Grubengebäude“, dass der Schadstoffübertritt in das Deckgebirge mit geringer Rate erfolgt. Die beiden Effekte haben gemeinsam zur Folge, dass Lösung mit dosisrelevanten Schadstoffkonzentrationen nur mit mäßigen und weiter abfallenden Raten in das Deckgebirge ausgepresst wird und deshalb aus hydraulischen Gründen höchstens begrenzt in das verstückte Deckgebirge gelangt. Die technischen Maßnahmen führen zum raschen Rückgang der Konvergenz und zur schnellen Abnahme der Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung. Die Konvergenzraten nehmen zeitlich kontinuierlich ab und lassen sich auch nach einigen 100 Jahren mit guter Zuverlässigkeit vorhersagen.

- der durch Dichteschichtung behinderten Schadstoffausbreitung im Deckgebirge, für einige Pfade zusätzlich auf der Transportverzögerung im Deckgebirge

Allen Ausbreitungspfaden gemeinsam ist, dass die oberflächennahen Schadstoffkonzentrationen von lokalen Fließsystemen in die betreffenden Geländeeinschnitte und deren Potential abhängen, Wasser mit erhöhter Dichte zur Geländeoberfläche transportieren zu können. Da die Schadstoffe in schwerer Grubenlösung in das Deckgebirge übertreten und dort auf ebenfalls schwere Deckgebirgslösung mit hoher Salinität treffen, bewirkt dies eine gesicherte Mindestverdünnung im Deckgebirge vom Übertritt aus dem Grubengebäude bis in Oberflächennähe.

Die Schadstoffausbreitung in oberflächennahes Wasser im Tal von Wittmar ist – auch ohne Sorption – mit einer erheblichen Transportverzögerung verbunden.

Da im Langzeitsicherheitsnachweis die Transportverzögerung im Deckgebirge durch Sorption nicht belastet wird, besteht auch keine Abhängigkeit von Kenntnissen zu kleinräumigen hydraulischen und geochemischen Verhältnissen in den hydrogeologischen Einheiten.

- der Gasspeicherung im Grubengebäude (speziell für die Radionuklidenausbreitung auf dem Gaspfad)

Die geomechanische Langzeitsicherheit der Schachanlage und der Schutz der Tagesoberfläche beruhen hauptsächlich auf

- der weitgehenden Verfüllung der Schachanlage mit Salzversatz und stützendem Versatz,
- dem Schutzfluid, das kein nennenswertes Umlösepotenzial gegen anstehende Salzgesteine aufweist und das oberhalb der 700-m-Sohle zudem temporär unter pneumatischem Stützdruck steht.

Die Kenntnis der Standortbedingungen, d.h. der geologischen, hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Situation des Gesamtsystems Asse mit den eingelagerten Inventaren und der Situation an der Tagesoberfläche ist für das Führen des Sicherheitsnachweises ausreichend. Die geowissenschaftlichen und gebirgsmechanischen Langzeitprognosen ergeben mit genügender Zuverlässigkeit, dass auch über lange Zeiten keine sicherheitsrelevanten ungünstigen Veränderungen der bestehenden Verhältnisse eintreten werden.

Das Gesamtsystem Asse ist relativ robust, neben der im Nachweis aufgezeigten Langzeitsicherheit bestehen noch Sicherheitsreserven:

- Die Robustheit des Systems Asse zeigt sich darin, dass sowohl die deterministischen Modellrechnungen zu Parametersensitivitäten und alternativen Szenarien als auch die probabilistische Unsicherheitsanalyse eine geringe Variabilität der berechneten potenziellen Schadstoffkonzentrationen in der Biosphäre ergeben. Die Robustheit ist nur eingeschränkt, falls entgegen den wahrscheinlichen Verhältnissen im Deckgebirge keine hydraulisch wirksamen Wegsamkeiten von der Flanke der Salzstruktur in den Muschelkalk der Südflanke bestehen.

- Die Rückhaltung von Schadstoffen im Deckgebirge durch Sorption wurde im Nachweis der Langzeitsicherheit nicht in Anspruch genommen und stellt eine zusätzliche Sicherheitsreserve dar.

Es können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Fazit (1) für das radiologische Schutzziel
 - Der Schutz der Bevölkerung vor unzulässiger Strahlenexposition ist für die Ausbreitung von Radionukliden über den Lösungspfad nachgewiesen. Für wahrscheinliche Verhältnisse liegt die berechnete Strahlenexposition bei 0,05 mSv/a. Der Wert von 0,3 mSv/a wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % bei einem Vertrauensgrad von 95 % eingehalten.
 - Der Schutz der Bevölkerung vor unzulässiger Strahlenexposition ist auch für die Ausbreitung von Radionukliden über den Gaspfad nachgewiesen. Für wahrscheinliche Verhältnisse liegt die berechnete Strahlenexposition im Bereich von wenigen tausendstel mSv/a, für ungünstige Annahmen und mit pessimistischen Vereinfachungen werden 0,23 mSv/a berechnet.
- Fazit (2) für das wasserrechtliche Schutzziel
 - Der Schutz des oberflächennahen Grundwassers vor unzulässigen Verunreinigungen durch die Ausbreitung von wasserrechtlich relevanten Stoffen in den Abfällen und im Schutzfluid ist nachgewiesen. Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung werden eingehalten.
- Fazit (3) für das Schutzziel bezüglich der Tagesoberfläche
 - Der Schutz der Tagesoberfläche ist nachgewiesen. Negative Auswirkungen durch bergbaubedingte Senkungen der Tagesoberfläche sind ausgeschlossen.
- Fazit (4) für das Schließungskonzept
 - Es wurde gezeigt, dass das Schließungskonzept die Langzeitsicherheit hinreichend sicherstellt.
 - Es wurde ebenfalls gezeigt, dass das Schließungskonzept eine notwendige Voraussetzung für die Langzeitsicherheit ist.

Das Sicherheitskonzept wurde speziell für die Schließung der Schachanlage Asse II entwickelt. Es basiert auf international empfohlenen Vorgehensweisen und ist geeignet, die Sicherheit des Standorts zu gewährleisten. Das Schließungskonzept wurde in einem iterativen Prozess entwickelt. Es basiert auf den Erfahrungen aus sicherheitstechnischen Bewertungen des Standorts, bergmännischen Erfahrungen und ingenieurtechnischem Wissen.

10 Literatur

- /ALSA 2005a/ Transportmodellierung: Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse. Bericht ALSA-C-1.5B-NR145, Version 02, NRG Petten / Colenco Power Engineering AG / GRS Braunschweig, Juli 2005.
- /ALSA 2005b/ Transportmodellierung: Ergänzende Rechnungen mit LOPOS zur Konvergenz. Bericht ALSA-C-6.1B-GR063, Version 01, NRG Petten / Colenco Power Engineering AG / GRS Braunschweig, November 2005.
- /ALSA 2006b/ Transportmodellierung: Ableitung des Radionuklid-Quellterms für die Einlagerungsbereiche. Bericht ALSA-C-8.3B-GR074, GRS-A-3342, GRS Braunschweig, 2006.
- /ALSA 2006c/ Transportmodellierung: Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse (Ergänzungsbericht). Bericht ALSA-C-10.4B-NR227, NRG Petten / Colenco Power Engineering AG / GRS Braunschweig, 2006.
- /ALSA 2006d/ Detaillierte Modellrechnungen zum Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern für den Referenzfall. Bericht ALSA-C-8.2B-CO148, Colenco Power Engineering AG, 2006.
- /Asse-Datenbank/ Datenbank der GSF (unterliegt der kontinuierlichen Fortschreibung durch GSF).
- /BAF 2005a/ Stellungnahme zur geochemischen Langzeitstabilität der Schachtverschlüsse, Bergakademie Freiberg, Februar 2005.
- /BAF 2005b/ Stellungnahme zur Beständigkeit von Sorelphasen und Sorelbeton gegenüber Salzlösungen. Voigt, W.; Bergakademie Freiberg, Dezember 2005.
- /BER 2003/ Berest, P., Brouard, B. & Feuga, B.: Dry Mine Abandonment. Tech. Conf. Pap. SMRI Conference, Chester, United Kingdom, 5-8 October 2003.
- /BfS 2005/ Entwurf zur Novellierung der AVV zu § 47 Strahlenschutzverordnung, Entwurf, Bundesamt für Strahlenschutz, Stand 21.01.2005.
- /BfS 2006/ Natürliche Radioaktivität in Nahrungsmitteln. Internet: www.bfs.de/ion/nahrungsmittel/trinkwasser.html. Stand: 28.04.2006.
- /BMI 1983/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. GMBI. 1983, S. 220, RdSchr. des BMI vom 20.04.1983, RS – AGK 3 – 515 790/2
- /BMU 1990/ Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kern-

technischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bundesanzeiger 42, Nr. 64a, 1990.

- /BMU 2003/ Umweltradioaktivität und Strahlenbelastung. Jahresbericht 2002. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Bonn, November 2003.
- /BRA 2003/ Bracke, G., Müller, W.: Modelling the Gas Generation of Intermediate and Low Level Radioactive Wastes, Proceedings of ICEM '03: The 9th International Conference on Radioactive Waste Management and Environmental Remediation, September 21 – 25, Examination School, Oxford, England, 2003.
- /BRE 2002a/ Breidung, K.: Verwahrung von Kali- und Steinsalzbergwerken einschließlich langzeitsicherer Schachtabdichtungen. Kali und Steinsalz 02/2002, S. 28-39, Kassel 2002.
- /BRE 2002b/ Breidung, K.: Schachtverschlüsse für untertägige Deponien in Salzbergwerken. Forschungsvorhaben Schachtverschluss Salzdetfurth des BMBF, Kennz.: 02C0516, Kali & Salz GmbH, Kassel 2002.
- /BRO 1964/ Brooks, R.H.; Corey, A.J.: Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Paper 3, Colo. State Univ., Fort Collins, Co, 1964.
- /BUC 2004/ Bestimmung des Inventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den eingelagerten Abfällen der Schachtanlage Asse. Abschlussbericht, Buchheim Engineering / GSF FB Asse, März 2004.
- /BUC 2006a/ Bestimmung eines Quellterms für chemische und chemotoxische Stoffe in den Einlagerungsbereichen der Schachtanlage Asse mit radioaktiven Abfällen und Versatzstoffen. Bericht, Buchheim Engineering / GSF FB Asse, 2006.
- /BUC 2006b/ Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen von chemischen und chemotoxischen Stoffen der eingelagerten Abfälle und Versatzstoffe in der Schachtanlage Asse. Bericht, Buchheim Engineering / GSF FB Asse, 2006.
- /CAR 1976/ R. D. Carter, G. R. Kiel, and K. R. Ridgway, „Criticality Handbook, ARH-600“, <http://ncsp.Hnl.gov/ARH-600/index.htm>, 1968, with updates up to 1976.
- /COL 2005b/ Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Rev.03, Bericht 4927/01, Colenco Power Engineering AG, Juni 2005.
- /COL 2005e/ Funktion der Strömungsbarrieren hinsichtlich der Begrenzung der Schadstoffausbreitung in der Schachtanlage Asse sowie der hydraulischen Anforderungen an die Bauwerke. Bericht 3331/59, Colenco Power Engineering AG, Juni 2005.
- /COL 2006a/ Szenarientwicklung Asse. Rev. 01, Bericht 3331/99, Colenco Power Engineering AG, Oktober 2006.
- /COL 2006b/ Schachtanlage Asse - Szenarientwicklung Nahfeld. Bericht 3331/98, Colenco Power Engineering AG, Oktober 2006.

- /COL 2006c/ Hydrogeologische Modellvorstellungen. Rev. 01, Bericht 4956/07, Colenco Power Engineering AG, (Revision 2006), Oktober 2006.
- /COL 2006d/ Deckgebirgsmodellierung Phase IV, Grundwasserbewegung im Deckgebirge des Standortes Asse. Abschlussbericht 3331/71, Colenco Power Engineering AG, September 2006.
- /COL 2006e/ Lösungs- und Gasbewegung beim Einlagerungsbereich MAW in der Betriebs- und frühen Nachbetriebsphase. Bericht 3331/76 (Rev. 3), Colenco Power Engineering AG, Juli 2006.
- /COL 2006f/ Schachtanlage Asse. Freisetzung volatiler Radionuklide auf dem Gaspfad. Bericht 3331/108, Colenco Power Engineering AG, Oktober 2006.
- /COL 2006h/ Modellbeschreibung KAFKA, Strömungs- und Radionuklidtransport, Bericht 3165/47 Rev. 3; ALSA-C-3.11B-CO047, Colenco Power Engineering AG, 2006.
- /DBE 2006b/ Konzeptplanung Verfüllung und Verschluss der Schächte 2 und 4 des Bergwerks Asse, Rev. 00, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, DBE Tec / GSF FB Asse, Stand: August 2006.
- /DOR 1993/ J. Y. Doriath, C.W. McCallien, E. Kiefhaber, U. Wehmann, and J. M. Rieunier, „ERANOS 1: The Advanced European System of Codes for Reactor Physics Calculations,“ presented at Joint Internat. Conf. on Mathematical Methods and Supercomputing in Nuclear Applications, Karlsruhe, April 19-23, 1993.
- /ERC 2000/ Untersuchungen zum Löseverhalten der in der Schachtanlage Asse anstehenden Salzgesteine. Bericht EBG-060-98, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, April 2000.
- /ERC 2004/ Geochemische Bewertung der Salzlösungszutritte im Bergwerk Asse II. Studie zum Projekt Langzeitsicherheit, Rev. 01, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH / TU Bergakademie Freiberg, Oktober 2004.
- /ERC 2004a/ Zusammenfassung der geologischen Grundlagen für die Langzeitsicherheitsbewertung des FB Asse, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH / TU Clausthal, Juni 2004.
- /ERC 2005/ Quantifizierung der Carnallitit-Auflösung für unterschiedliche Zusammensetzungen des Schutzfluides, Teilberichte B, C und D; ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH, Januar 2005.
- /FDG 1991/ Die Nationale Verzehrstudie. Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 1991.
- /GIL 2001/ Gillow J.B., Francis A.J., Re-evaluation of Microbial Gas Generation Under Expected Waste Isolation Pilot Plant Conditions, Data Summary and Progress Report, Brookhaven National Laboratory, 2001.

- /GRS 1999a/ Das Programmpaket EMOS. Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern. Bericht GRS-159, Braunschweig, Juli 1999.
- /GRS 1999b/ LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. Bericht GRS-157, Braunschweig, Juni 1999.
- /GRS 2005b/ Beschreibung der LOPOS-spezifischen Anpassungen für das Strukturmodell D4. Bericht ALSA-C-4.3B-GR036 (GRS-A-3175), Version 03. GRS Braunschweig, 30.03.2005.
- /GRS 2006a/ LOPOS AS6: Programmanpassungen und Verifikation für den Standort Asse. Bericht ALSA-C-6.5B-GR072 (GRS-A-3338), GRS Braunschweig, 2006.
- /GRS 2006c/ Beschreibung der LOPOS-spezifischen Anpassungen für das Strukturmodell D5. Bericht ALSA-C-9.1B-GR071 (GRS-A-3333), Version 02. GRS Braunschweig, 2006.
- /GRU 1999/ Grupa, J.B.: The PROSA methodology for scenario development. Paper presented at the NEA Workshop on Scenario Development, Madrid, 1999 (in /OECD 2001/).
- /GSF 1989/ Untersuchungen zur Bestimmung der Rückhalteeigenschaften von Gesteinen über der Schachanlage Asse II gegenüber gelösten Radionukliden. GSF Institut für Tief Lagerung, GSF-Bericht 16/89, November 1989.
- /GSF 2002a/ Bestimmung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars der Schachanlage Asse. Abschlussbericht, GSF FB Asse, Stand: August 2002.
- /GSF 2003a/ Zusammenstellung und Bewertung der vor 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase. Bericht, Rev. 02; GSF FB Asse, Mai 2003.
- /GSF 2003b/ Abschätzung der Massen von in der Schachanlage Asse außerhalb der Einlagerungskammern verbleibenden Baustoffen und Materialien. Bericht; Rev. 00; GSF FB Asse, Mai 2003.
- /GSF 2006a/ Einfluss der Schachanlagen Asse I und Asse III auf den Nachweis der Langzeitsicherheit, GSF FB Asse, Oktober 2006.
- /GSF 2006b/ Risswerk der Schachanlage Asse II. GSF FB Asse.
- /GSF 2006c/ Herleitung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachanlage Asse. Rev. 05, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, GSF FB Asse / DBE Tec, Stand: Oktober 2006.
- /GSF 2006d/ Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase. Bericht, Rev. 03; GSF FB Asse, Januar 2006.

- /GSF 2006e/ Konzeptionelles Modell für die Verfüllung der Einlagerungsbereiche. Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, GSF FB Asse, Stand: März 2006.
- /GSF 2006f/ Einbauorte von Strömungsbarrieren. Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, Rev. 04; GSF FB Asse / DBE Tec, Oktober 2006.
- /GSF 2006g/ Seismologische Verhältnisse und seismische Ereignisse am Standort. Abschlussbericht, Rev. 03, GSF FB Asse, März 2006.
- /GSF 2006h/ Schließung der Schachtanlage ASSE II, Sicherheitsbericht; GSF 2006.
- /GSF 2006i/ Normierte Rechnungen zur Ermittlung der potentiellen Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase der Schachtanlage Asse. Abschlussbericht, Rev. 02, GSF Institut für Strahlenschutz, 2006.
- /GSF 2006k/ Beschreibung der Lagerbereiche. Rev. 02; Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, GSF FB Asse, Mai 2006.
- /GWVO 1997/ Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12. 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (Grundwasserverordnung) vom 18.03.1997. BGBl. Jg.1997, I, Nr. 18, S.542-544.
- /HAR 1984/ Harvie C. E., Møller N. and Weare J. H.: The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system from zero to high concentration at 25°C. Geochim. Cosmochim. Acta 48, 723-751 (1984).
- /HEI 1985/ W. Heinicke, H. Krug, W. Thomas, W. Weber, and B. Gmal, „Handbuch zur Kritikalität“. GRS, Garching 1985.
- /IAEA 2005/ IAEA-Glossar; [//www-ns.iaea.org/downloads/standards/glossary/m.pdf](http://www-ns.iaea.org/downloads/standards/glossary/m.pdf)
- /IBE 2004/ Bestimmung der Gaspermeabilität und des Gaseindringdruckes eines Magnesiabinders aus einer Strömungsbarriere in der Schachtanlage Asse. Bericht, IBeWa Freiberg, Mai 2004.
- /ICRP 1998/ Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. International Commission of Radiological Protection, Ann. of ICRP Publ. Nr. 81, Pergamon Press, Oxford New York 1998.
- /ICRP 1999/ Protection of the public in situations of prolonged radiation exposure. International Commission of Radiological Protection, Ann. of ICRP Publ. Nr. 82, Pergamon Press, Oxford, New York 1999.
- /IfG 2005c/ Tragfähigkeitsbewertung des Carnallititbaufeldes der Schachtanlage Asse. Bericht, Rev. 01, IfG Leipzig, Juli 2005.

- /IfG 2005d/ Ergebnisbericht zum Kompaktionsverhalten und den mechanischen Eigenschaften von Brucit-Granulat. Bericht, IfG Leipzig, April 2005.
- /IfG 2006a/ Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachtanlage Asse in der Betriebsphase. Bericht, Rev. 02, IfG Leipzig, Oktober 2006.
- /IfG 2006b/ Gebirgsmechanische Langzeitprognose für die Schachtanlage Asse. Bericht, Rev. 02, IfG Leipzig, Oktober 2006.
- /INE 2002/ Stellungnahme zur Beständigkeit von Baustoffen auf der Basis von Sorel-Phasen und Salzbeton gegenüber den im Grubengebäude des FB Asse auftretenden Lösungen. Kienzler, B.; Metz, V.; FZK-INE, November 2002.
- /INE 2004a/ Nachweis der geochemischen Wirksamkeit von Versatzstoffen aus Mg-Hydroxid / Mg-Oxychlorid in Q – Lösung. Abschlussbericht, FZK-INE 006/04, November 2004.
- /INE 2004b/ Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachtanlage Asse. Teil 4: Standortsspezifische Sorptionsdaten, FZK-INE 015/03, April 2004.
- /INE 2005a/ Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachtanlage Asse. Teil 6: Experimentelle Untersuchungen und thermodynamische Modellrechnungen zur Entwicklung des geochemischen Milieus und der daraus resultierenden Radionuklidkonzentrationen. Zusammenfassender Abschlussbericht, FZK-INE 001/05, Februar 2005.
- /INE 2005b/ Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachtanlage Asse. Teil 12: Geochemische Modellrechnungen zu Einlagerungskammern der Schachtanlage Asse ohne Mg-Depot auf Grundlage einer reduzierten Bildung von anorganischem Kohlenstoff. Abschlussbericht, FZK-INE 002/04, März 2005.
- /INE 2006a/ Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachtanlage Asse: Berechnung des Radionuklidquellterms auf Grundlage der Verfüllkonzepte G und MAW. FZK-INE 008/05. Forschungszentrum Karlsruhe, 2006.
- /INE 2006b/ Experimentelles Programm zur Bestätigung der Ergebnisse von standortspezifischen Modellrechnungen für die Schachtanlage Asse: Überprüfung der Gültigkeit thermodynamischer Rechnungen für die Einlagerungskammern bei Lösungsaustausch. Abschlussbericht FZK-INE 007/06. Forschungszentrum Karlsruhe, 2006.
- /INE 2006c/ Stellungnahme zur langfristigen Kritikalitätssicherheit der in das FB Asse eingelagerten kernbrennstoffhaltigen Abfälle unter Berücksichtigung der Anwesenheit von Schutzfluid. FZK-INE 008/06, 23.10.2006.

- /IST 2004/ Langfristige Gasbildung in der Einlagerungskammer 8a/511 unter der Annahme trockener Verhältnisse. Bericht ISTec-A-914, ISTec Köln, Dezember 2004.
- /IST 2005a/ Abbaubarkeit von organischem Kohlenstoff unter salinaren Bedingungen. Bericht ISTec-A-947, ISTec Köln, Februar 2005.
- /IST 2005b/ Realistische und maximale Gasbildung in der Schachtanlage Asse. Bericht ISTec-A-979, ISTec Köln, Juli 2005.
- /KAN 1999/ Kannen, H.; Müller, W.: Gas Generation of Radioactive Wastes – Comparison between Laboratory Experiments and Measurements on Real Waste, ICEM '99, Nagoya, 1999.
- /KIE 2000/ Kienzler, B., Vejmelka, P., Herbert, H.J., Meyer, H. & Altenhein-Haese, C.: Long-term leaching experiments of full-scale cemented waste forms: experiments and modelling. Nucl. Tech., 129, 101-118, 2000.
- /KIE 2004/ Kienzler, B., Schlieker, M., Bauer, A., Metz, V. & Meyer, H.: Langzeit Auslaug- und Korrosionsexperimente an zementierten 1:1-Gebinden in der Schachtanlage Asse. FZK Wiss. Ber. FZKA 7059, 38, Karlsruhe 2004.
- /KNO 1984/ Knothe, S.: Die Prognose der abbaubedingten Einwirkungen (poln.).- Verlag Slask, 1984.
- /KOC 1959/ Kochmanski, T.: Integral-Theorie der Bodenbewegungen unter Einwirkungen des Abbaus. - Freiburger Forschungsheft, A118, Freiberg, 1959.
- /LEY 1999/ Leydecker, G.: Earthquake Catalogue for the Federal Republik of Germany and adjacent areas for the Years 800-1994 (for damaging earthquakes till 1998). Datafile, Bundesanst. f. Geowissensch. und Rohstoffe (BGR) Hannover, 1999.
- /LEY 2004/ Leydecker, G.: Earthquake Catalogue for the Federal Republik of Germany and adjacent areas for the Years 800-2003. Datafile. www.bgr.de/quakecat; Bundesanstalt .für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2004.
- /MIL 2000/ Miller, W.; Alexander, R.; Chapman, N.; McKinley, I.; Smellie, J.: Geological Disposal of Radioactive Wastes & Natural Analogues. Waste Management Series, Vol. 2. Pergamon Press, 2000.
- /MIN 2001a/ Minkley, W. (2001): Untersuchungen (Stoffgesetz-Entwicklung, Modellierung) zum Spröbruchverhalten von Carnallit und seine Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit von UTD. BMBF 02 C 0264, Wissenschaftlicher Bericht FZKA-PTE Nr. 7.
- /MIN 2001b/ Minkley, W. et al. (2001): A visco-elasto-plastic softening model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining.- Proceedings 2nd Int. FLAC Symposium Lyon, 29-31 October 2001.

- /NEA 1999/ Confidence in the Long-term Safety of Deep Geological Repositories. OECD/NEA, 1999.
- /NEA 2002/ Establishing and Communicating Confidence in the Safety of Deep Geological Disposal. OECD/NEA, 2002.
- /NEA 2006/ Discussion paper on Long-Term Safety Criteria for Disposal of Spent Fuel and Long-Lived Radioactive Waste. NEA/RWMC Initiative, Nuclear Energy Agency, Issy-les-Moulineaux, 23-Feb-2006.
- /OECD 2001/ Scenario Development Methods and Practice. An Evaluation based on the NEA Workshop on Scenario Development (Madrid 1999). OECD Paris, 2001.
- /OLD 1975/ Oldekop, W.: Einführung in die Kernreaktor- und Kernkraftwerkstechnik. München, 1975.
- /PLA 2005b/ Technisches Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren basierend auf Erfahrungen aus dem Bau der Pilotströmungsbarriere. Rev.03, Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, DBE Tec / GSF FB Asse, Stand: Dez. 2005.
- /PLA 2006b/ Schutzfluidkonzept, Rev. 02; Bericht zum Projekt Langzeitsicherheit, DBE Tec / GSF FB Asse, Oktober 2006.
- /PRIJ 1993/ Prij, J.; et al.: PROSA. Probabilistic Safety Assessment. Final Report. Petten, November 1993.
- /ROD 1999/ Rodwell, W.R.; A.W. Harris, S.T. Horseman, P. Lalieux, W. Müller, L. Ortiz Amaya, and K. Pruess. Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste. Status Report EUR 19122 EN, Brussels, Belgium. 1999.
- /SCH 1997/ Schon, T.; Heidendael, M.: Wasserstoffbildung durch Metallkorrosion, FZJ JUEL – 3495, Jülich, 1997.
- /PRU 1999/ Pruess et al.: TOUGH2 Version 2.0, User's Guide, LBNL43134, 1999.
- /SITZ 2004/ Sitz, P., Gruner, M., Rumphorst, K. (2004): Bentonitdichtelemente für langzeitsichere Schachtverschlüsse im Salinar. Kali und Steinsalz 01/2004, S. 7-13, Kassel 2004.
- /SRO 2006/ Bergschadenkundliches Senkungsvorausrechnungsmodell für die Schachanlage Asse, Rev.01, Bergakademie Freiberg, 2006.
- /StriSchV 2002/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen vom 20.07.2001: Verordnung für die Umsetzung von EURATOM-Richtlinien zum Strahlenschutz, BGBl. I, Nr. 38, S.1714 ff., geändert durch Art. 2 der Verordnung zur Änderung der Röntgenverordnung und anderer atomrechtlicher Verordnungen vom 18. Juni 2002, BGBl. I Nr. 36, S. 1869-1907, Bonn, Juni 2002.

- /SUT 1998/ Suter, D.; Biehler, D.; Blaser, P.; Hollmann, A.: Derivation of a Sorption Data Set for the Gorleben Overburden. Proc. DISTEC '98, Hamburg, September 1998.
- /TRA 2006/ Berechnung der Radionuklidenausbreitung im Deckgebirge mittels Transferfunktionen. Gemeinsamer Bericht: GRS-A-3329, Colenco 3331/94; Colenco Power Engineering AG, Baden (Schweiz), und Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig, November 2006.
- /TUC 2006a/ Qualitative mineralogische und quantitative geochemische Analyse von zwei Spilit-Schotterproben; Schmidt, K.H., TU Clausthal, Dezember 2005. Sowie: Stellungnahme zu den Anforderungen an Schottermaterial zum Bau von setzungsstabilen Füllsäulen in vertikalen Grubenbauen der Schachanlage Asse unter Berücksichtigung der Durchströmbarkeit. Schmidt, K.H., TU Clausthal, Juli 2006.
- /TUC 2006b/ Geochemische Untersuchungen zur Herkunft salinärer Lösungen – Sr- und Pb-Isotope als Tracer in Lösungen der Schachanlage Asse, Abschlussbericht, Technische Universität Clausthal, Fachgebiet Mineralogie – Geochemie - Salzlagerstätten, Januar 2006.
- /TWVO 2001/ Verordnung zur Novellierung der Trinkwasserverordnung vom 21.05.2001, BGBl. Jg.2001, I, Nr. 24, S.959-980.
- /USA 2006/ Probabilistische Unsicherheitsanalyse für den Standort Asse auf Basis der kombinierten Variante. GRS-A-3347; GRS Braunschweig, 2006.
- /UVP 1990/ Verordnung über die Umweltverträglichkeitsprüfung bergbaulicher Maßnahmen vom 13.07.1990, BGBl. I 1990, S. 1420; 1998, S. 2093.
- /WHG 2005/ Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushaltes (Wasserhaushaltsgesetz) i.d.F. vom 19.09.2002 (BGBl. I, S. 3245), zuletzt geändert durch Art. 2 des Gesetzes vom 25.06.2005 (BGBl. I, S. 1746).
- /WOL 1992a/ Wolery, T.J.: EQ 3/6, a software package for geochemical modelling of aqueous systems: package overview and installation guide. UCRL-MA-110662 PT I, 1992.
- /WOL 1992b/ Wolery, T.J.: EQ3NR, a computer program for geochemical aqueous speciation-solubility calculations: theoretical manual. UCRL-MA-110662 PT III, 1992.
- /WOL 1992c/ Wolery, T.J. & Daveler, S.A.: EQ6, a computer program for reaction path modelling of aqueous systems: theoretical manual, user's guide, a related documentation. UCRL-MA-110662 PT IV, 1992.
- /WRAY 1995/ Wray, D.S.: Origin of clay-rich beds in Turonian chalks from Lower Saxony, Germany – a rare-earth element study. Chem. Geol., 119, 161-178, London, 1995.

/ZIM 1989/ Zimmerle, W. (1989): Vestiges of volcanic activity in Cretaceous sediments in the western Tethys. In: Wiedmann, J. (Hrsg.): Proc. 3rd Int. Cret. Symp. (Tübingen), Seiten 951-987, Stuttgart, 1987.