Schachtanlage Asse II

Beschreibung und Bewertung der Stilllegungsoption Vollverfüllung

Stand: 01. Oktober 2009

Dieser Bericht wurde im Auftrag und unter Mitarbeit des BfS erstellt durch:

AF-Colenco AG, Baden, Schweiz	1764/01
Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig	GRS-A-3494
IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig	8681-9

Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz (BfS) erstellt. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf der Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden. Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Auftragnehmer wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 7

2. Aktueller Zustand des Gesamtsystems 10

2.1 Salzstruktur und Deckgebirge 10
2.1.1 Regionalgeologische Übersicht und Entstehung der Salzstruktur 10
2.1.2 Aufbau der Salzstruktur 11
2.1.3 Aufbau von Hutgestein und Deckgebirge 14
2.1.4 Hydrogeologische Verhältnisse 17
2.1.5 Zusammenfassung zu den Verhältnissen in der Salzstruktur und im Deckgebirge 22
2.2 Grubengebäude 24
2.2.1 Allgemeine Beschreibung des Grubengebäudes 24
2.2.2 Einlagerungskammern und -bereiche 27
2.2.3 Schweben und Pfeiler 30
2.2.4 Auflockerungszonen 33
2.2.5 Hydraulische Verbindungen zwischen Grubengebäude und Deckgebirge 34
2.3 Inventar 34
2.4 Durchgeführte Stilllegungsmaßnahmen und Vorsorgemaßnahmen 38
2.4.1 Bereits von HMGU durchgeführte Einzelmaßnahmen zur Stilllegung 38
2.4.2 Durchgeführte Vorsorgemaßnahmen 39
2.4.3 Weitere vorgeschlagene Vorsorgemaßnahmen und Notfallkonzepte 40
2.5 Standsicherheit 41
2.5.1 Bewertung der Baufelder und Identifizierung der wesentlichen gebirgsmechanischen Einwirkungen und Prozesse 41
2.5.2 Einschätzung der gegenwärtigen Situation 44
2.6 Zutritt von Lösungen in die Schachtanlage 46

3. Beschreibung des Stilllegungskonzepts 49

3.1 Charakterisierung des Stilllegungskonzepts 49
3.2 Sicherheitskonzept für die Phase nach Stilllegung 51
3.3 Maßnahmen im Überblick 53

4. Technische Maßnahmen und deren Umsetzung 56

4.1 Einbau der Sorelbetonbarrieren 56
4.1.1 Sorelbetonbarrieren um Einlagerungskammern 58
4.1.2 Sorelbetonbarrieren vor aufgeschlossenem Carnallitit 59
4.1.3 Sorelbetonbarrieren in bzw. im Bereich von potenziellen vertikalen Wegsamkeiten 60
4.1.4 Sorelbetonbarrieren an einigen weiteren Orten 60
4.2 Einbringen von Brucitmörtel in Einlagerungskammern LAW 61
4.3 Verfüllen der MAW-Kammer und ausgewählter Grubenbaue darüber 63
4.4 Verfüllen von ausgewählten Grubenbauen mit Schotter 64
4.5 Verfüllen der verbleibenden Hohlräume mit Sorelbeton 65

4.6 Einbringen einer technischen $MgCl_2$-Lösung bis in das Firstniveau der 700-m-Sohle 67
4.7 Verschluss der Tagesschächte 68
4.8 Überwachung während der Phase nach Stilllegung 69

5. Vorteile und Risiken während der Stilllegungsphase 70

5.1 Merkmale der Stilllegungsoption für die Stilllegungsphase 70
5.2 Risiken aus bereits vorliegenden Verhältnissen 72

6. Systementwicklung in der Phase nach Stilllegung und Bewertung der Langzeitsicherheit 74

6.1 Mögliche Systementwicklungen 74
6.1.1 Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke 74
6.1.2 Mögliche Um- und Auflöseprozesse am Gestein und Versatz 77
6.1.3 Chemisches Milieu in den verschiedenen Grubenbereichen 81
6.1.4 Gasbildung 86
6.1.5 Gebirgsmechanische Entwicklung und Konvergenz der Grubenbaue 87
6.1.6 Fluidbewegung im Grubengebäude sowie Übertritte in das Deckgebirge 89
6.1.7 Rückhaltung und Mobilisierung von Radionukliden in den Einlagerungskammern 94
6.1.8 Radionuklidrückhaltung und -ausbreitung in der Grube und Übertritt in das Deckgebirge in Lösung 96
6.1.9 Radionuklidrückhaltung und -transport im Deckgebirge in Lösung 101
6.1.10 Radionuklidtransport in der Gasphase 105
6.1.11 Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen von chemischen und chemotoxischen Stoffen 107
6.2 Bewertung des Gesamtsystems 109
6.2.1 Langzeitsicherheit 109
6.2.2 Prognostizierbarkeit 114
6.2.3 Robustheit 116

7. Zusammenfassung und sicherheitstechnische Bewertung 117

8. Literaturverzeichnis 119

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Geologischer Südwest-Nordost-Schnitt durch die Salzstruktur Asse (Quelle: Risswerk /bfS 2009a/) 12

Abb. 2: Vereinfachter Seigerriss und Längsschnitt mit Salzversatz und Schwebendurchbrüchen. blau: Salzversatz. rot umrandet: Einlagerungskammern. grün umrandet: Schwebendurchbrüche (Stand der Abbildung: 2007) 26

Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des LAW-Inventars 37

Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des MAW-Inventars 37

Abb. 5: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des Abfallinventars in den Einlagerungsbereichen 38

Abb. 6: Mikroseismik Asse im Zeitraum 10/2007 bis 9/2008 (links) und für die Gegenwart berechnete Scherdeformationen (rechts) im Schnitt 2, aus /IfG 2009/ 46

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Grubenbaue der LAW-Einlagerungsbereiche auf der 750-m- und 725-m-Sohle 28

Tab. 2: Kennzahlen der Einlagerungskammern nach /BfS 2009c/ 29

Tab. 3: Inventar ausgewählter Radionuklide und Gesamt-Aktivität in den Einlagerungsbereichen [Bq] (Bezugszeitpunkt 01.01.2005) 36

Tab. 4: Mögliche Umlösungen bei den in der Schachtanlage Asse II auftretenden relevanten Kombinationen von anstehendem Gestein bzw. eingebrachtem Salzversatz und Lösungen 80

Tab. 5: Zusammenfassung der Bewertung des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung im Vergleich mit dem Bezugskonzept /HMGU 2007/ hinsichtlich Langzeitsicherheit in Kapitel 6.1 111

1. Einleitung

Die Schachtanlage Asse II diente von 1908 bis 1964 der Salzgewinnung. Dadurch entstanden 176 Abbaukammern im Staßfurt- und Leine-Salinar mit einem Gesamtvolumen von ca. 4 800 000 m^3. Die Kammern liegen in der Nordflanke (Kalisalz), im Kern (Staßfurt-Steinsalz) und in der Südflanke (Leine-Steinsalz) der Sattelstruktur. Sie befinden sich in einer Teufe von 490 m bis 775 m.

Im Jahr 1965 wurde die GSF Eigentümerin des Bergwerks Asse II und von der Bundesregierung beauftragt, „Forschungen auf dem Gebiet der Tieflagerung radioaktiver Abfälle" durchzuführen. Mittels verschiedener Techniken wurden zwischen 1967 und 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Die schwachradioaktiven Abfälle (LAW) lagern in elf Abbaukammern auf der 750-m-Sohle und in einer Abbaukammer auf der 725-m-Sohle. Die mittelradioaktiven Abfälle (MAW) lagern in einer Abbaukammer auf der 511-m-Sohle.

Seit 1979 wird das Bergwerk ohne weiteres Einbringen von Abfällen als Forschungsanlage für die Entwicklung von Technologien zur Endlagerung toxischer Abfälle genutzt. Dazu wurden Sohlen zwischen 800 m und 975 m Teufe aufgefahren (der sog. Tiefenaufschluss) sowie Tages- und Blindschächte erweitert bzw. neu geteuft. Das dabei anfallende Salzhaufwerk wurde zur Verfüllung alter Abbaue genutzt. Bereits früher, während der Nutzung der Schachtanlage zur Salzgewinnung, wurden Abbaue mit dem Rückstand aus der Salzaufbereitung versetzt. Im Dezember 1989 waren insgesamt 850 000 m^3 der ursprünglichen 4 800 000 m^3 Hohlraum aus der Salzgewinnung und der von GSF im Rahmen ihrer Forschungstätigkeit vorgenommenen Auffahrungen von 240 000 m^3 verfüllt. Seit 1990 wurden keine größeren Auffahrungen mehr durchgeführt. Das während der gesamten bisherigen Betriebszeit der Schachtanlage aufgefahrene Hohlraumvolumen von rund 5,0 Mio. m^3 verringerte sich durch Kriechvorgänge bis heute (Stand 04/2009) auf rund 4,7 Mio. m^3. Davon waren Ende 2008 ca. 4,0 Mio. m^3 mit Salzgrus und 0,08 Mio. m^3 mit Sorelbeton verfüllt, die restlichen rund 0,6 Mio. m^3 sind noch unverfüllt. Die Arbeiten im Hinblick auf die Schließung der Schachtanlage Asse II wurden unter der Leitung von GSF 1995 aufgenommen.

Zum 01. Januar 2009 ging die Betreiberschaft der Schachtanlage Asse II auf das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) über. Dieses bereitet nun mit hohem Druck eine zügige Stilllegung der Schachtanlage vor. In die Verfahrensevaluation einbezogen werden dabei Stilllegungsoptionen, bei denen die Abfälle aus der Schachtanlage entfernt, in der Schachtanlage umgelagert werden bzw. am Ort der bisherigen Einlagerung verbleiben. Konkret werden drei Stilllegungsoptionen hinsichtlich Machbarkeit und Auswirkungen untersucht. Ziel des BfS ist es, die sicherste Möglichkeit für eine Stilllegung der Schachtanlage unter Einbezug der Langzeitsicherheit und der Risiken bei der Umsetzung der Maßnahmen für die Bevölkerung und das Personal zu finden.

Gegenstand des vorliegenden Berichts ist die umfassende sicherheitstechnische Beschreibung der Stilllegungsoption Vollverfüllung als Grundlage für die Wahl der Stilllegungsoption bzw. das weitere Vorgehen. Diese Stilllegungsoption ist dadurch gekennzeichnet, dass die Abfälle an den Orten verbleiben, an denen sie eingelagert wurden und sich heute befinden. Die mit dieser Stilllegungsoption verbundenen Maßnahmen werden in Kapitel 4 beschrieben, sie entsprechen durchweg dem Stand von Wissenschaft und Technik. Es kann deshalb da-

von ausgegangen werden, dass die Machbarkeit der einzelnen Maßnahmen der Stilllegungsoption gegeben ist.

Die Beschreibung der sicherheitstechnischen Konsequenzen erfolgt verbal-argumentativ. Sie betrifft zum einen die Phase der Stilllegung, d.h. die Sicherheit während der Phase, während der die Maßnahmen zur Stilllegung umgesetzt werden, und zum anderen die Phase nach Abschluss der Arbeiten zur Stilllegung, d.h. die Langzeitsicherheit. Die Bewertung der Langzeitsicherheit ist auf zwei Fragestellungen ausgerichtet:

1. Führt das Stilllegungskonzept insgesamt bzw. die betrachtete Maßnahme auf ein prognostizierbares, robustes System, dessen Kennzahlen bekannt sind oder ermittelt werden können?
2. Ist zu erwarten, dass mit einer Analyse der Langzeitsicherheit die Einhaltung der radiologischen Schutzziele für die Stilllegung der Schachtanlage Asse II gezeigt werden kann?

Die Bewertung in Bezug auf die zweitgenannte Fragestellung ist absolut und kann – wenn man auf spezielle Modellrechnungen verzichtet – nur durch Analogieschluss oder Extrapolation mit Bezug auf ein vergleichbares, modellmäßig untersuchtes System erfolgen. Für diesen Bezug wird hier ein Konzept gewählt, für das umfangreiche Untersuchungen und Modellrechnungen durchgeführt worden sind /HMGU 2007/. Für die Bewertung des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung wird dabei davon ausgegangen, dass mit einer Stilllegung gemäß dem Bezugskonzept der Langzeitsicherheitsnachweis zu potenziellen Strahlenexpositionen führt, die unter 0,3 mSv/a (dem Wert von § 47 StrlSchV /BMU 2001b/ für die effektive Dosis) liegen.

Die Bewertung der Stilllegungsoption hinsichtlich der Ausbreitung von Radionukliden gilt sinngemäß auch für die Ausbreitung von chemotoxischen Stoffen aus den Abfällen. Bei der Bewertung der Langzeitsicherheit werden die möglichen Auswirkungen einer eventuellen Freisetzung von (nicht radioaktiven) chemotoxischen Stoffen aus Bereichen der Schachtanlage außerhalb der Einlagerungskammern nicht explizit angesprochen. Der Grund besteht darin, dass zum Inventar dieser Stoffe außerhalb der Abbaue, in denen die radioaktiven Abfälle eingelagert sind, nur unzureichende Informationen vorliegen, und dass die mögliche Freisetzung von solchen chemotoxischen Stoffen alle Stilllegungsoptionen gleichermaßen betrifft und somit für den Entscheid zur Stilllegungsoption nicht ausschlaggebend ist.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt aufgebaut:

- In Kapitel 2 wird der aktuelle Zustand des Gesamtsystems beschrieben. Dies schließt auch die durchgeführten und die geplanten vorgezogenen Stilllegungsmaßnahmen und Vorsorgemaßnahmen ein. Diese Maßnahmen werden unabhängig vom kommenden Entscheid zur Stilllegungsoption bzw. zum künftigen Vorgehen umgesetzt.
- Kapitel 3 beschreibt das Stilllegungskonzept. Dies umfasst eine Darlegung der charakteristischen Eigenschaften des Konzepts, des zugrunde liegenden Sicherheitskonzepts und eine Auflistung der Maßnahmen im Überblick.

- In Kapitel 4 werden die technischen Maßnahmen für die Umsetzung des Stilllegungskonzepts und die Realisierung dieser Maßnahmen beschrieben und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Langzeitsicherheit und die Risiken bewertet.
- Gegenstand von Kapitel 5 sind die günstigen und weniger günstigen Merkmale der Stilllegungsoption im Hinblick auf die Sicherheit während der Stilllegungsphase[1]. Dies schließt insbesondere auch die durch die vorliegenden Verhältnisse und die Stilllegungsmaßnahmen verursachten Risiken ein.
- In Kapitel 6 erfolgt die Bewertung hinsichtlich der Langzeitsicherheit. Dazu werden zunächst die möglichen Entwicklungen der Schachtanlage Asse II nach der Stilllegung und deren Auswirkungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit gegliedert nach den möglichen sicherheitsrelevanten Prozessen diskutiert und bewertet. Anschließend erfolgt eine Bewertung des Gesamtsystems beim Zusammenwirken aller Prozesse hinsichtlich der potenziellen Langzeitauswirkungen, der Prognostizierbarkeit und der Robustheit. Wie oben ausgeführt, beruht die Bewertung auf Analogieschlüssen und Extrapolationen ausgehend von Analyseergebnissen für das Bezugskonzept /HMGU 2007/.
- Kapitel 7 enthält eine kurze zusammenfassende Bewertung, welche auf den Ergebnissen der Kapitel 5 und 6 abstützt.

[1] Unter der Stilllegungsphase wird diejenige Zeitphase verstanden, in der während der Betriebsphase die Stilllegungsmaßnahmen umgesetzt werden. Sie endet damit zeitgleich mit der Betriebsphase.

2. Aktueller Zustand des Gesamtsystems

Das Gesamtsystem umfasst das Grubengebäude der Schachtanlage Asse II sowie die Salzstruktur und das Deckgebirge. Im Folgenden wird dieses Gesamtsystem kurz charakterisiert, um Grundlagen für die Bewertung der Stilllegungsoption Vollverfüllung zu schaffen.

Die Charakterisierung des Gesamtsystems basiert auf dem aktuellen Zustand des Systems im Jahr 2009. Die bis zum Jahr 2008 umgesetzten Schließungsmaßnahmen des alten Betreibers sowie die bereits durchgeführten Vorsorgemaßnahmen für den bestimmungsgemäßen Betrieb und die Störfallvorsorge der Schachtanlage Asse II werden berücksichtigt. Dadurch unterscheidet sich der aktuelle Zustand des Gesamtsystems gegenüber dem aus dem Jahr 2006, welcher in den Antragsunterlagen von HMGU /HMGU 2007/ beschrieben ist.

Geplante Vorsorgemaßnahmen, die unabhängig vom Entscheid über das Stilllegungskonzept durchgeführt werden sollen, werden in Kapitel 2.4 genannt und ihre Auswirkungen auf den Zustand des Gesamtsystems – soweit diese für die Bewertung der Stilllegungsoption der Vollverfüllung von Bedeutung sein können – angesprochen.

2.1 Salzstruktur und Deckgebirge

2.1.1 Regionalgeologische Übersicht und Entstehung der Salzstruktur

In regionalgeologischer Hinsicht liegt die Asse im Subherzynen Becken nördlich des Harzes. Der strukturelle Bau dieses Beckens ist durch mehrere NW-SE-orientierte Hebungsstrukturen gekennzeichnet, die durch salinartektonische Prozesse entstanden sind. Die etwa 25 km lange Salzstruktur Asse-Heeseberg ist eine dieser Hebungsstrukturen. Sie befindet sich eingefasst zwischen Schöppenstedter und Remlinger Kreidemulde am westlichen Rand des Subherzynen Beckens. Dort grenzt sie an die Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone, welche selbst Teil des Niedersächsischen Beckens ist. Die Salzstruktur Asse bildet den NW-Abschnitt der Salzstruktur Asse-Heeseberg und ist als Schmalsattel ausgebildet.

Die Bildung der Salzstruktur Asse-Heeseberg erfolgte in mehreren Phasen. Die ersten sicher nachweisbaren Bewegungen des Zechstein-Salinars fanden bereits im Jura statt. Salzbewegungen erfolgten weiter in der Unterkreide, in der Oberkreide und nachweislich bis in das Tertiär. Tektonische Bewegungen sind auch noch dem Quartär zuzuweisen. Das Reservoir für eine weitere Salzbewegung aus der nördlich gelegenen Schöppenstedter Mulde ist heute jedoch weitgehend erschöpft, jenes für eine Bewegung aus der südlich gelegenen Remlinger Mulde ist gering.

Durch die Bildung der Salzstruktur wurden die Gebirgsschichten, die nach dem Zechstein sedimentierten und über dem Zechstein-Salzgestein lagen, aufgewölbt. Ab der Kreide war die Struktur reliefwirksam, d.h. die aufgewölbten Gebirgsschichten ragten über den Meeresspiegel hinaus. Dadurch gelangten sie oberhalb der Salzstruktur in den Einfluss der Erosion, und die Sedimentationsräume der Remlinger Mulde und der Schöppenstedter Mulde wurden getrennt. In der weiteren Folge wurden die Deckgebirgsschichten an den Flanken der Salzstruktur steil aufgerichtet. Während der Bildung der Salzstruktur fanden auch Salzbewegun-

gen längs der Struktur statt. Durch die Salzbewegung im Rahmen der Strukturbildung und durch tektonische Bewegungen im subsalinaren Untergrund entstand im Deckgebirge oberhalb der Achse der Salzstruktur und in den beiden Flanken ein System von größeren und kleineren Störungen.

Eine Besonderheit der Salzstruktur Asse ist, dass bei der Strukturbildung das Salzgestein zwischen die Schichten des Oberen und des Mittleren Buntsandstein der Südflanke eindrang. Dadurch wurden in der Südflanke „nur“ die Schichten des Oberen Buntsandstein und die darüber liegenden Deckgebirgsschichten aufgerichtet und steilgestellt. Die Schichten des Mittleren und Unteren Buntsandstein blieben im Wesentlichen in unveränderter Lage. In der Nordflanke der Salzstruktur wurde das gesamte Deckgebirge oberhalb des Zechstein aufgewölbt. Abb. 1 zeigt einen geologischen Schnitt durch die Salzstruktur Asse.

2.1.2 Aufbau der Salzstruktur

Die Salzstruktur Asse, d.h. der als Schmalsattel ausgebildete NW-Abschnitt der Salzstruktur Asse-Heeseberg, erstreckt sich gegen Osten bis zum Geländeeinschnitt östlich der Schachtanlage Asse II und weist damit eine Ausdehnung längs der Salzstruktur von etwas mehr als 4 km auf. Beim Schacht Asse 2 liegt die Obergrenze des nicht durch Lösungsprozesse zersetzten Zechstein-Salinars bei rund -100 mNN, d.h. in knapp 300 m Teufe[2]. Der relativ flach verlaufende Bereich dieser Obergrenze wird als Salzspiegel bezeichnet. Über dem nicht zersetzten Salinar liegt das Hutgestein, das in der Vergangenheit durch Lösungs- und Umwandlungsprozesse aus dem Salinar entstanden ist. Das Hutgestein ist – zusammen mit dem Deckgebirge – Gegenstand von Kapitel 2.1.3.

Die Breite der Salzstruktur in der Teufe des Salzspiegels beträgt beim Schacht Asse 2 lediglich etwa 150 m. An den Flanken, und besonders an der Südflanke, fällt die Grenze der Salzstruktur steil ab. In rund 800 m Teufe, auf -600 mNN, beträgt die Breite der Salzstruktur rund 800 m. Die Basis des Zechstein liegt im Bereich der Asse tiefer als -2000 mNN.

Bei der Bildung der Salzstruktur sind die salinaren Schichtenfolgen der Staßfurt-Serie, der Leine-Serie und der Aller-Serie aufgestiegen. Basale, nichtchloridische Schichtenglieder der Staßfurt-Serie sowie die im Bereich der Asse chloridfreie Werra-Serie wurden nicht in die halotektonische Bildung der Sattelstruktur einbezogen. Der Innenaufbau der Salzstruktur ist durch eine ausgeprägte Sattel-Mulden-Sattel-Struktur der Staßfurt- und Leine-Serie gekennzeichnet, wobei im nördlich gelegenen Hauptsattel und im schmalen, südlich gelegenen Nebensattel das Staßfurt-Salinar bis in eine Tiefe von etwa -300 mNN aufgestiegen ist (Werte für den Schnitt durch die Salzstruktur im Bereich des Schachtes Asse 2). In der dazwischen liegenden Mulde reicht das Leine-Salinar bis in eine Tiefe von etwa -800 mNN. Das Salinar der Aller-Serie liegt in der Nordflanke der Salzstruktur auf dem Leine-Salinar auf. In der Südflanke liegt kein Aller-Salinar vor, dort grenzen Staßfurt-Salinar (in größeren Teufen) und Leine-Salinar (in geringeren Teufen) direkt an das Deckgebirge.

---

[2] Die Teufenangaben im Grubengebäude, in der Salzstruktur und im Deckgebirge beziehen sich auf das Niveau der Rasenhängebank von Schacht Asse 2 von +192,5 mNN.

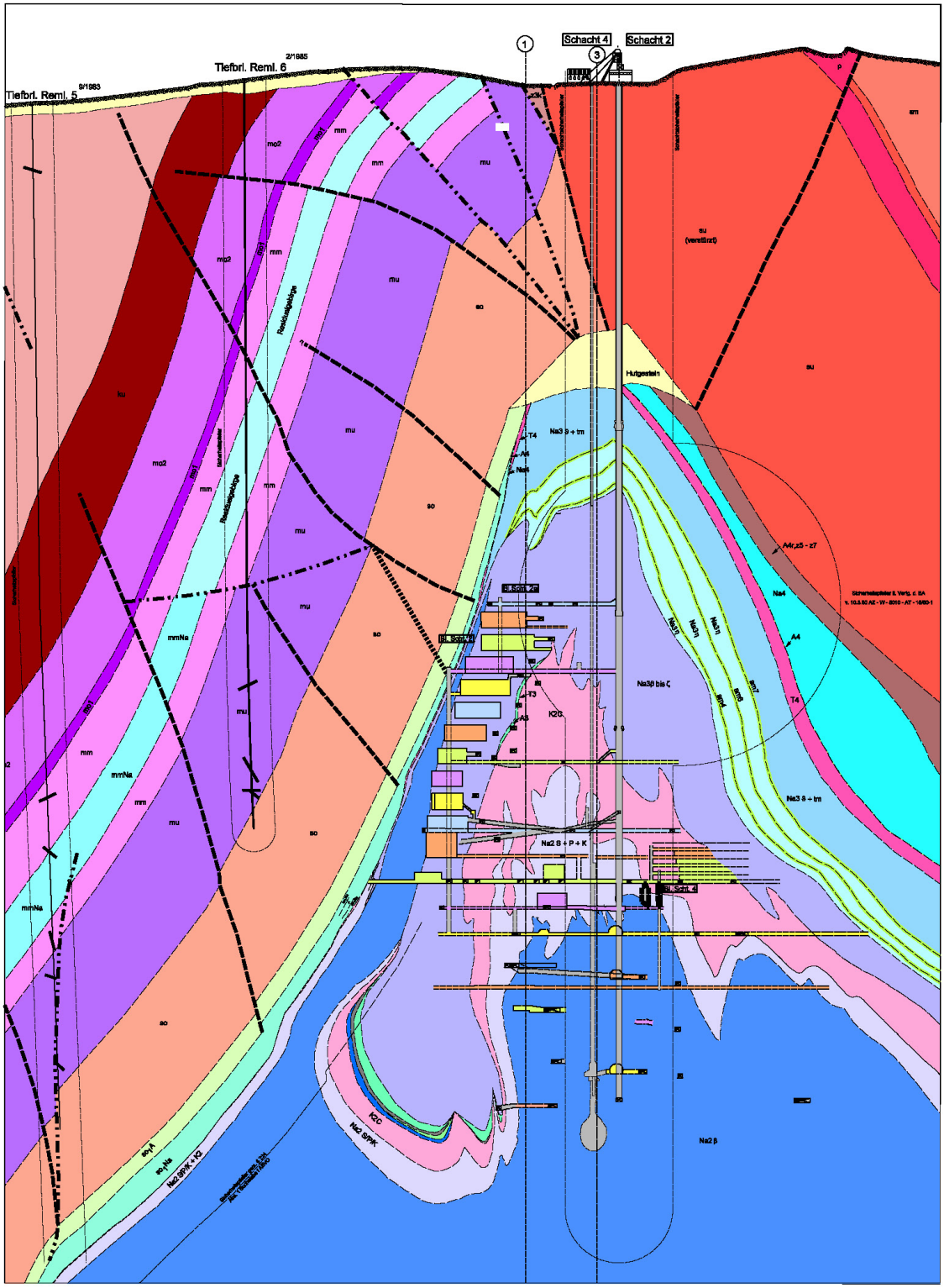

Abb. 1: Geologischer Südwest-Nordost-Schnitt durch die Salzstruktur Asse (Quelle: Risswerk /bfS 2009a/)

Das Staßfurt-Salinar ist im Bereich der Schachtanlage Asse II sehr gut untersucht. Es setzt sich aus dem mächtigen Hauptsalz, einer ca. 50 m mächtigen Folge von Speisesalz bis zum kieseritischen Übergangssalz, dem ca. 40 m mächtigen Kaliflöz Staßfurt und dem Gebänderten Deckanhydrit zusammen[3]. Das Kaliflöz Staßfurt ist carnallitisch ausgebildet und im Kontakt mit Magnesium-armer Lösung leicht löslich. Der Carnallitit ist in der Schachtanlage vom Grubentiefsten bis in 532 m Teufe aufgeschlossen.

Die geomechanisch bruchhaft reagierenden Schichtenglieder im Übergang zwischen der Staßfurt- und der Leine-Serie, d.h. der Gebänderte Deckanhydrit (Staßfurt-Serie), der Graue Salzton (Leine-Serie), das Leine-Karbonat und der Hauptanhydrit (Leine-Serie), liegen nur als tektonisch isolierte Brocken oder kleine Schollen vor. Sie können zwar lösungs- und gasführend sein, stellen aber keine hydraulischen Wegsamkeiten über größere, potenziell sicherheitsrelevante Entfernungen dar.

Das Leine-Salinar ist aus Untersuchungen im Bereich der Schachtanlage Asse II ebenfalls gut bekannt. Es besteht, neben den oben erwähnten, nur isoliert vorkommenden nichtchloridischen Schichten, aus einer mächtigen Abfolge verschiedener Steinsalze. Ein Kaliflöz dieser Serie gibt es am Standort Asse nicht. Im Anhydritmittelsalz der Leine-Serie wurden einige lösungsführende Anhydritbänke erbohrt, die Mächtigkeiten von 1 m bis 3 m erreichen. In der Südflanke keilt das Anhydritmittelsalz mit zunehmender Teufe aus. Im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II ist das Anhydritmittelsalz nicht aufgeschlossen.

Die Anhydritbänke sind als Folge der Fließverformung der mächtigen Steinsalzpakete mechanisch beansprucht und teilweise zerrissen (boudiniert). Gleichwohl können Anhydritbänke des Anhydritmittelsalzes hydraulische Wegsamkeiten über größere Entfernungen im Leine-Salinar darstellen. Es ist möglich, aber nicht gesichert, dass das Anhydritmittelsalz westlich der Schachtanlage Asse II am Salzspiegel ausstreicht und dort mit wasserführenden Bereichen des Hutgesteins in hydraulischem Kontakt steht /HMGU 2007/. Ein hydraulischer Kontakt des Anhydritmittelsalzes ist zudem mit dem Deckgebirge in der Südflanke oberhalb der obersten Abbaue des Grubengebäudes möglich.

Der Salzspiegel befindet sich am Standort mindestens 250 m unter der Geländeoberfläche und zeigt längs der Salzstruktur deutliche morphologische Unterschiede, wobei der Bereich um die Schachtanlage Asse II nicht die höchste Aufragung ist. Während der Salzspiegel beim Schacht Asse 2 (Schachtanlage Asse II) in der Tiefe von -92,5 mNN liegt, verläuft er beim 1,4 km weiter westlich gelegenen Schacht Asse 1 (Schachtanlage Asse I) in der Tiefe von -53,6 mNN und beim 3,4 km weiter östlich gelegenen Schacht Asse 3 (Schachtanlage Asse III) in der Tiefe von -227,8 mNN. Die Hochlagen des Salzspiegels befinden sich im Bereich der Remlinger Herse zwischen den Schachtanlagen Asse I und Asse II sowie im Bereich der Klein Vahlberger Buchen westlich der Schachtanlage Asse III (HMGU 2007/).

[3] Angabe der Mächtigkeiten vor salzkinetischer Akkumulation und Ausdünnung

2.1.3 Aufbau von Hutgestein und Deckgebirge

Das Deckgebirge ist an den Flanken der Salzstruktur aufgerichtet, wobei das Deckgebirge der Nordflanke mittelsteil (30° – 50°), jenes der Südflanke steil (> 65°), vereinzelt sogar überkippt gelagert ist[4]. An der Geländeoberfläche (bzw. unter der quartären Überdeckung) verlaufen die Ausbisse der aufgerichteten Deckgebirgsschichten längs der Salzstruktur (NW-SE). An deren westlichem Ende vereinigen sich die Streichlinien der Gesteinsschichten von Nord- und Südflanke[5].

An der Nordflanke der Salzstruktur Asse liegt das Deckgebirge in der ursprünglichen Sedimentationsabfolge (d.h. konkordant) auf den salinaren Schichten des Zechstein auf. Die Basis bildet der ca. 300 m mächtige Untere Buntsandstein, gefolgt von den rund 100 m mächtigen Schichten des Mittleren Buntsandstein. Beide weisen hohe Ton- und Schluffanteile auf und sind deswegen hydraulisch gering durchlässig. Auch in den oberen 100 Metern des rund 150 m mächtigen Oberen Buntsandstein (Röt) sind die Ton- und Schluffanteile hoch, der untere Abschnitt (*so1*) hingegen besteht vorwiegend aus Anhydrit, Steinsalz und Mergel.

Auf den Oberen Buntsandstein folgen Unterer, Mittlerer und Oberer Muschelkalk mit Mächtigkeiten von 100 m, 100 m und 60 m. Charakteristisch für den Unteren und den Oberen Muschelkalk sind mächtige Kalksteinbänke, wohingegen im Mittleren Muschelkalk Mergel- und Tonsteine, Anhydrit und Steinsalz dominieren. Die Schichten des Unteren (Ton- und Schluffsteine), des Mittleren (Tonsteine) und des Oberen Keuper (Sandstein) mit insgesamt bis zu 360 m Mächtigkeit bilden den Abschluss der triassischen Sedimente im Deckgebirge der Asse.

Die Gesteinsschichten des Jura, eine Wechselfolge aus Ton-, Mergel und Sandsteinen, erreichen eine Gesamtmächtigkeit von bis zu 400 m. Unmittelbar an den Flanken der Salzstruktur Asse tritt lediglich der Untere Jura auf, in den angrenzenden Mulden sind auch Schichten des Mittleren Jura belegt

Die Sedimente der Kreide[6] erreichen in den Mulden Mächtigkeiten bis zu 500 m. Sie werden überlagert von geringmächtigen Sedimenten aus dem Tertiär und von etwa 40 m mächtigen glazialen und fluvioglazialen Ablagerungen aus dem Quartär.

An der Südflanke der Salzstruktur Asse liegen das Rötsalz (*so1Na*) und der Rötanhydrit (*so1A*) des Oberen Buntsandstein direkt, d.h. nicht entsprechend der Sedimentationsabfolge (diskordant) auf dem Zechstein (vgl. auch Kapitel 2.1.1). Die anschließende Schichtenfolge entspricht jener der Nordflanke.

Der zu Spröddeformation neigende Rötanhydrit (*so1A*) wurde bei der Sattelbildung in der Südflanke tektonisch überprägt und durch die Auffahrung des Baufeldes in der Südflanke lokal zusätzlich gebirgsmechanisch beansprucht. In diesem Bereich südlich des oberen Gru-

---

[4] Es liegt eine südvergente Überschiebung vor.

[5] umlaufendes Streichen

[6] Am Standort Asse liegt die Kreide diskordant auf den Schichten des Jura auf.

bengebäudes ist auch das übrige Röt (*so2-so4*) durch Scherbeanspruchungen durchgehend bis zum Unteren Muschelkalk deformiert worden (/HMGU 2007/).

Bei der Subrosion werden die leicht löslichen Mineralbestandteile des Salinargesteins im Grundwasser aufgelöst und abtransportiert oder aber umgelöst. Zurück bleiben unlösliche und schwer lösliche Komponenten, wie z.B. Tone, Silte und Anhydrit, oder Umwandlungsprodukte, wie Gips. Diese bilden das sogenannte Residualgebirge. Der Abtransport von gelöstem Material führt zu einer lokalen Volumenreduktion des Gebirges, welche Verformungen und Lastumlagerungen im benachbarten Gebirge zur Folge hat. Wichtige Subrosionsvorgänge am Standort Asse sind bzw. waren:

- die Lösung von Zechsteinsalzen an der Oberseite des Salzsattels. Das zugehörige Residualgebirge wird als Hutgestein bezeichnet. Es besteht aus anhydritisch-tonigen Rückstandsbrekzien mit vereinzelten Gipslagen oder –knollen, ist nach den Beobachtungen in Bohrungen und Schächten typischerweise rund 10 bis 20 m mächtig und erreicht lokal Mächtigkeiten bis ca. 60 m. Oberhalb des Hutgesteins entstand durch die Volumenreduktion in Verbindung mit den salztektonischen Verformungen eine grabenartige Struktur mit gegeneinander verkippten Schollen, welche als verstürztes Deckgebirge bezeichnet wird.
- die Bildung von hochdurchlässigen, untereinander vernetzten Wegsamkeiten mit kleinem Querschnitt an der Basis des Hutgesteins westlich der Remlinger Herse. Diese werden als Subrosionsgerinne bezeichnet. Ihr genauer Verlauf ist wegen ihrer geringen Querausdehnung im Detail nicht erkundbar. Nach allen durchgeführten Untersuchungen erstrecken sie sich nicht bis in den Bereich des Salzspiegels oberhalb der Schachtanlage Asse II.
- die Lösung von Steinsalz in den Flanken der Salzstruktur. Die Subrosion in der Südflanke wird durch die Wasserbewegung im angrenzenden Rötanhydrit bestimmt, dessen hydraulische Leitfähigkeit Folge der gebirgsmechanischen Beanspruchung dieser Schicht ist. Aus den Salzfrachten von Quellen und Vorflutern im Süden des Asse-Höhenzugs wurde abgeleitet, dass die Subrosionsrate in der Südflanke der Salzstruktur relativ niedrig ist (flächengemittelt im Bereich von 0,1 mm/Jahr oder weniger) /COL 2005a/. In der Nordflanke ist die Salzstruktur vom mächtigen und gering durchlässigen Unteren Buntsandstein überlagert. Die Subrosion ist dort um ein mehrfaches geringer als in der Südflanke.
- die Lösung der halitischen Schichten des Mittleren Muschelkalk (*mmNa*). In der Südflanke liegt die Grenze zwischen dem entstandenen Residualgebirge und dem primären Salinargestein des Mittleren Muschelkalk nach Interpretation der seismischen Profile quer zur Salzstruktur zwischen -200 mNN und -300 mNN. Im Bereich der Schachtanlage Asse II bestehen zusätzliche Informationen aus Tiefbohrungen: Die Grenze verläuft dort auf etwa -300 mNN. In der Nordflanke wird eine tiefer reichende Subrosion der halitischen Schichten des Mittleren Muschelkalk (*mmNa*) bis rund -400 mNN vermutet.
- die Lösung der halitischen Schichten des Oberen Buntsandsteins (*so1Na*). In der Südflanke liegt das Rötsalinar *so1Na* direkt dem Zechsteinsalinar auf, seine Subrosion ist daher an jene des Zechstein gekoppelt. Die Subrosion des Rötsalinars in der Nordflanke wird nachfolgend angesprochen.

Auch Anhydrit ist anfällig für Lösungsprozesse. Je nach den herrschenden Bedingungen entsteht dabei Gips, was zu einer Abdichtung der bestehenden Wasserwegsamkeiten führt, oder die Lösungshohlräume bleiben offen, ohne dass Gips auskristallisiert. Letzteres wird als Verkarstung bezeichnet. Die Beobachtungen in der Bohrung Remlingen 1 zeigen Verkarstungserscheinungen im Anhydrit des Oberen Buntsandstein (Rötanhydrit, *so1A*) in der Südflanke. Dies lässt vermuten, dass der Rötanhydrit in der Südflanke in diesem Bereich bis auf etwa -150 mNN, d.h. bis etwa 50 m unterhalb des Salzspiegels verkarstet und seine hydraulische Durchlässigkeit deshalb erhöht ist. In der Nordflanke verlaufen der Rötanhydrit und das angrenzende Rötsalinar (*so1Na*) zwischen den gering durchlässigen Schichten des Oberen Buntsandstein (*so2-so4*) und jenen des Mittleren Buntsandstein. Durch Lösungsprozesse im Rötsalinar und im Rötanhydrit entstand hier ein Grundwasserleiter mit begrenzter Tiefenerstreckung. Diese ist größer als in der Südflanke und erreicht im zentralen Teil der Asse bis -500 mNN /HMGU 2007/.

Das Deckgebirge ist durch Störungen überprägt, die im Zuge der salztektonischen Prozesse mit unterschiedlicher Kinematik reaktiviert oder neu angelegt wurden. Zusätzlich entstanden Brüche durch Verformungen im Deckgebirge als Folge der Subrosion (s.o.). Die Häufigkeit der Störungen ist in der Südflanke der Salzstruktur Asse deutlich höher als in dessen Nordflanke.

Je nach Art und Intensität der aufgetretenen Beanspruchung und der Art des Gesteins können Störungen grundsätzlich sowohl Bereiche mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit als auch solche mit erniedrigter Durchlässigkeit, d.h. Sperrzonen sein. Am Standort Asse hat keine der abgeteuften Tiefbohrungen in erkennbarer Weise eine Störungszone angetroffen. Die Tiefbohrung R6 liegt in der Nähe einer Störung und zeigt im Unteren Muschelkalk und im Oberen Buntsandstein überdurchschnittlich hohe Permeabilitätswerte (was auf eine Störung mit erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit hinweist), jedoch auch abnormal niedrige Grundwasserdrücke (was im Widerspruch zu einer Störung mit hoher Durchlässigkeit bis in oberflächennahe Grundwasserbereiche steht). Für Überlegungen zur Langzeitsicherheit werden i.A. und auch im vorliegenden Bericht erhöhte hydraulische Durchlässigkeiten der Störungen unterstellt.

An Störungen können die einzelnen Gesteinsschichten beidseits der Störung gegeneinander versetzt sein. Dadurch kann eine grundwasserführende Schicht an der Störung stirnseitig an einen Grundwassergeringleiter grenzen, wodurch der Grundwasserfluss an der Störung unterbrochen wird. Möglich ist auch, dass ein Grundwasserleiter an einer Störung durch das Versetzen in hydraulischen Kontakt mit einem andern Grundwasserleiter gerät, von dem er sonst durch einen dazwischen liegenden Grundwassergeringleiter getrennt ist. Störungen können dadurch lokale hydraulische Kurzschlüsse zwischen Grundwasserleitern bewirken.

Die Störungen verlaufen in Streichrichtung (d.h. SE-NW), diagonal (ENE-WSW bzw. SSE-NNW) oder quer (SW-NE) zur Salzstruktur und fallen sowohl steil als auch flach ein. Für die Bewertung der Langzeitsicherheit des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung sind von potenziell besonderer Bedeutung:

- die Diagonalstörung Groß Vahlberg in der Nordflanke,
- die Diagonal- und Querstörung der Ammerbeek in der Südflanke sowie

- die Querstörungen von Wittmar in der Südflanke.

Die Querstörung der Ammerbeek durchschlägt das Röt im Bereich der Schachtanlage Asse II, die Diagonalstörung Ammerbeek in geringem Abstand östlich davon und die Querstörungen von Wittmar südlich der Schachtanlage Asse I. Alle diese Störungen stellen nach Ermessen von HMGU bevorzugte hydraulische Wegsamkeiten zwischen dem verstürzten Deckgebirge und dem Rötanhydrit (*so1A*) einerseits und dem Muschelkalk andererseits dar. Die Diagonalstörung Groß Vahlberg bildet potenzielle Wegsamkeiten zwischen dem verstürzten Deckgebirge und grundwasserleitenden Schichten in der Nordflanke.

Die gebirgsmechanische Beanspruchung der Schichteinheiten hatte auch außerhalb von Störungen Auswirkungen, denn sie führte – je nach Gesteinseigenschaften – zu Rissen und Klüften im Gestein. Spröd reagierendes Gestein (z.B. Kalk) ist deshalb relativ wasserdurchlässig, Gesteine mit einem hohen Tonanteil reagierten hingegen weniger spröd und dennoch auftretende Sprödstrukturen (Risse, Klüfte) sind geringer durchlässig.

Das Deckgebirge der Asse lässt sich nach der hydraulischen Durchlässigkeit seiner Gesteinseinheiten in Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter unterteilen. Bedeutende regionale Grundwasserleiter sind der Obere und Untere Muschelkalk (*mo* und *mu*), der Rhätsandstein im Oberen Keuper (*ko*) sowie der Rogenstein des Unteren Buntsandstein (*suRG*), letzterer nur in der Nordflanke der Salzstruktur. Lokal von Bedeutung sind zusätzlich das verstürzte Deckgebirge inklusive Hutgestein, der Rötanhydrit (*so1A*) in der Südflanke sowie die durch Lösungsprozesse beeinflussten Bereiche im Mittleren Muschelkalk und – in der Nordflanke – im Röt. Wichtige lokale Grundwassergeringleiter sind in der Südflanke die tonig-mergeligen Schichten des Oberen Buntsandstein (*so2-so4*), die gering durchlässigen Schichten des Unteren Keuper (*ku*) und in der Nordflanke der Mittlere und der Untere Buntsandstein (*sm* und *su*).

Die geometrische Anordnung von Grundwasserleitern, Grundwassergeringleitern und hydraulisch relevanten Störungen bildet die Basis für das hydraulische Grundwassersystem am Standort Asse. Die Funktionsweise dieses Systems wird nachfolgend beschrieben.

2.1.4 Hydrogeologische Verhältnisse

Die hydrogeologische Situation am Standort Asse ist gegeben durch den Aufbau des Deckgebirges (und des Hutgesteins) über der Salzstruktur hinsichtlich der hydraulisch relevanten Einheiten und Strukturen, deren hydraulischen Eigenschaften wie Permeabilität und Porosität sowie der Rate und der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung und der Exfiltration. Einen weiteren Bestandteil der hydrogeologischen Situation bildet die Salinität des Grundwassers in tieferen Gebirgsbereichen, welche die dortigen Fließbewegungen durch Dichteeffekte deutlich beeinflusst.

Die regionalen Infiltrationszonen der Muschkalk-Aquifere befinden sich im Norden des Asse-Höhenzuges, auf dem Elm, auf einer Höhe von 270 mNN (*mu*) bzw. 220 – 250 mNN (*mo*), und im Süden am Großen Fallstein auf einer Höhe von 170 – 180 mNN (*mo*). Sie liegen höher als die zugehörigen Ausbisse im Asse-Höhenzug, die in der Nordflanke eine Höhenlage

von 100 – 120 mNN und in der Südflanke eine solche von 120 – 135 mNN aufweisen. Die regionalen Muschelkalk-Exfiltrationszonen befinden sich im Westen der Asse und liegen tiefer. Der Kontakt des Oberen Keuper (*ko*) mit Oberflächenwasser liegt an der Asse in der Nordflanke mit 95 mNN tiefer als am Südrand des Elms (120 – 130 mNN), in der Südflanke mit 120 – 135 mNN höher als ein regionales Keuper-Exfiltrationsgebiet nördlich des Fallsteins mit einer Höhe von 90 – 100 mNN.

Die Asse ist von den regionalen Infiltrations- und Exfiltrationszonen durch tiefe Muldenstrukturen getrennt. Da die hydraulische Durchlässigkeit der regionalen Aquifere mit der Tiefe deutlich abnimmt, ist sie 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 den regionalen Aquiferen. Der regionale Grundwasserumsatz ist im Vergleich zur Grundwasserneubildung am Standort Asse nach Einschätzung von HMGU daher sehr gering.

Bei einer Bewertung der radiologischen Langzeitsicherheit können die regionalen Grundwasserbewegungen nach Überzeugung der Autoren somit vernachlässigt werden. Der relative Anteil der potentiell aus der Grube austretenden Menge radioaktiver Stoffe, welcher in die regionalen Systeme der Grundwasserbewegung gelangen kann, ist gering, und die Transportzeiten zu den regionalen Exfiltrationsgebieten sind überdies lang im Vergleich zu jenen in die lokalen Exfiltrationsgebiete im näheren Umfeld der Asse.

Die lokale hydrogeologische Situation am Standort Asse präsentiert sich als ausgeprägte Wechselfolge von Grundwasserleitern und Grundwassergeringleitern, welche beidseits der Salzstruktur steil aufgerichtet sind und NW-SE streichen (vgl. Kapitel 2.1.3).

Neben den in Kapitel 2.1.3 schon erwähnten Störungszonen, der Diagonalstörung Groß Vahlberg in der Nordflanke, der Quer- und der Diagonalstörung Ammerbeek in der Südflanke sowie der Querstörungen Wittmar in der Südflanke, existiert eine Vielzahl kleinerer Störungen, welche in ihrer Gesamtwirkung die hydraulische Durchlässigkeit der Grundwassergeringleiter quer zur Struktur, d.h. deren Leckagevermögen, beeinflussen.

Östlich der Schachtanlage 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 verlaufen nach Einschätzung von HMGU ebenfalls in diesem Bereich, so dass die Grundwasserbewegungen um die Schachtanlage Asse II gegen jene östlich der Klein Vahlberger Buchen abgegrenzt sind.

Das Gebiet der Asse westlich dieser Grundwasserscheiden zerfällt in die hydrogeologischen Teilgebiete Nordflanke, zentraler Teil (südliches Längstal) und Südflanke. Für die beiden letztgenannten Teilgebiete sind hydraulische Wechselwirkungen nachgewiesen.

Das Teilgebiet Nordflanke 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 Rötanhydrit[7] der Nordflanke und stellt somit eine mögliche hydraulische Verbindung zwischen dem zentralen Teil und der Nordflanke her.

Das für die radiologische Langzeitsicherheit relevante Gebiet kann dadurch folgendermaßen eingegrenzt werden: Es beschränkt sich auf den zentralen Teil und die Südflanke, jeweils westlich der Grundwasserscheide im Bereich der Klein Vahlberger Buchen. Der hydrogeologische Aufbau dieses Gebietes ist von N nach S wie folgt (vgl. geologischer Aufbau in Kapitel 2.1.3):

- 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 Schachtanlage 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 Schachtanlage Asse II.
- Rötanhydrit (*so1A*): Der Rötanhydrit der Südflanke wurde bei der Strukturbildung geogen erheblich beeinflusst und zudem in der Flanke der Schachtanlage Asse II als Folge der bergbaubedingten Verformungen im Deckgebirge aufgelockert. Er ist deshalb als Kluftgrundwasserleiter mit deutlich abnehmender Klüftung und Permeabilität bei zunehmender Tiefe sowie mit lokal erhöhter Permeabilität in der Flanke der Schachtanlage zu betrachten. Im obersten Bereich, bis ca. 50 m unterhalb des Zechstein-Salzspiegels, dürfte der Rötanhydrit gemäß den Beobachtungen in der Bohrung Remlingen 1 zusätzlich lokal verkarstet sein. Entlang der Südflanke kann der Rötanhydrit durch Versetzen an Störungen quer zur Salzstruktur teilweise oder vollständig unterbrochen sein, was die Grundwasserbewegung 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 (vgl. Kapitel 2.1.2).
- Rötaquitard (*so2-so4*): Im stratigraphisch Hangenden des Rötanhydrits 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 aufgrund seiner Klüftung insgesamt als guter Grundwasserleiter eingestuft werden.

[7] Der Rötanhydrit der Nordflanke (*so1Ay*) ist bis in nennenswerte Teufe subrodiert und besitzt daher grundwasserleitenden Charakter (vgl. Kapitel 2.1.3).

- Mergelige Schichten des Mittleren Muschelkalk (*mm-m*): Diese sind ca. 25 m mächtig und trennen hydraulisch den Oberen vom Unteren Muschelkalk. Ein vollständiges Versetzen an Störungen ist möglich, so dass ihre Barrierewirkung 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. Unterhalb des subrodierten 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 mit dem Unteren Muschelkalk in erster Näherung zum hydraulischen Teilsystem „Muschelkalk“ zusammengefasst werden kann.

Gegen Süden begrenzen – mit Ausnahme quartärer Rinnen in den Tälern des Rothebachs und der Ammerbeek – die gering durchlässigen Schichten des Mittleren und Unteren Keuper das für die radiologische Sicherheit zu betrachtende Gebiet.

Für alle diese hydrogeologischen Einheiten gilt, dass ihre hydraulische Durchlässigkeit mit zunehmender Tiefe deutlich abnimmt und dass das Grundwasser in der Tiefe durch Lösung an den Salzlagern des Zechstein, des Röt (*so1Na*) 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 weisen also typische Eigenschaften von Kluftgrundwasserleitern auf.

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 Rötaquitard entlang der geologischen Trennfläche S3/D9 auszugehen, welcher bis in den Unteren Muschelkalk reicht. Die Permeabilität dieses „Scherdeformationsbereichs S3/D9“ ist gegenüber dem nicht bergbaubedingt beeinflussten Rötaquitard in gleicher Tiefe um mehrere Größenordnungen erhöht, so dass er eine hydraulisch bedeutsame Verbindung zwischen dem Rötanhydrit und dem Unteren Muschelkalk darstellt (HMGU 2007/).

Das am Höhenzug Asse neugebildete Grundwasser exfiltriert wegen der oben erwähnten geringen regionalen Grundwasserumsätze praktisch vollständig im Nahbereich des Asse-Höhenzuges: Die Exfiltration erfolgt in die Bäche der Taleinschnitte, aus Quellen am Rand des Asse-Höhenzuges und entlang quartärer Rinnen in die angrenzenden Muldenstrukturen. Die Grundwasserneubildung in den lokalen Hochzonen Asse-Burg, Remlinger Herse und Klein Vahlberger Buchen beträgt jeweils ca. 200 mm/a und entspricht etwa 25 – 40 % der jährlichen Niederschlagsmenge.

Die räumliche Verteilung der Infiltrations- und Exfiltrationsgebiete sowie die relativen Höhenunterschiede der Grundwasseroberfläche zwischen Infiltrations- und Exfiltrationsgebieten ergeben in Kombination mit der geometrischen Anordnung der oben diskutierten hydrogeo-

logischen Einheiten für die heutigen Grundwasserbewegungen am Standort Asse das folgende Bild:

- 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 Rothebachs und der Ammerbeek, bzw. bei Groß Denkte. Zusätzlich ist nach Einschätzung von HMGU ein intermediäres Fließsystem ausgebildet, welches von der Grundwasserscheide im Bereich der Klein Vahlberger Buchen unter den Tälern der Ammerbeek und des Rothebachs 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 Nordflanke abfließen. Der Grundwasserumsatz im Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges ist jedoch vergleichsweise gering.
- Grundwasserflüsse zwischen dem System „Verstürztes Deckgebirge / Rötanhydrit“ und dem System „Muschelkalk“ erfolgen entlang der oben genannten Störungen quer zur Struktur, entlang des bergbaubedingt beanspruchten Bereichs mit erhöhter Permeabilität (Scherdeformationsbereich S3/D9) sowie entlang von kleineren Störungen und durch die Gesteinsmatrix des Rötaquitards zwischen den benannten Strukturen.

Das Grundwasser weist mit zunehmender Tiefe einen ansteigenden Salzgehalt auf. Die Übergangszone von Süßwasser zu Salzwasser („Süß-/Salzwassergrenze“), hier definiert als Zone mit einem Salzgehalt im Grundwasser zwischen etwa 10 g/l und 30 g/l, verläuft oberhalb der Salzstruktur im Bereich der Schachtanlage Asse I nahe des Salzspiegels, steigt gegen Westen, in Richtung Exfiltrationsgebiet Groß Denkte, an und erreicht dort die Geländeoberfläche. Oberhalb der Schachtanlage Asse II liegt die Süß-/Salzwassergrenze bei etwa +50 mNN, d.h. rund 150 m unter der Geländeoberfläche und steigt gegen Osten, im Vahlberger Abschnitt des verstürzten Deckgebirges an. Lokal weisen Grundwasserproben aus Bohrungen auch in geringeren Teufen erhöhte Salzgehalte auf. Diese sind auf residuale Zechstein- und Röt-Salzvorkommen im verstürzten Deckgebirge und teilweise auf Ablaugungen aus oberirdischen Ablagerungen des Bergbaus zurückzuführen (/HMGU 2007/).

Im Muschelkalk der Nordflanke liegt die Süß-/Salzwassergrenze westlich der Diagonalstörung Groß Vahlberg sehr tief. Dies ist ebenfalls in der Südflanke der Fall, jedoch sind dort die Verhältnisse infolge der Taleinschnitte von Wittmar und der Ammerbeek komplexer: Etwas westlich der Querstörung Ammerbeek wurde mit geophysikalischen Messungen eine Tiefe von etwa -200 mNN, unter dem Taleinschnitt von Wittmar eine Tiefe von ungefähr 0 mNN ermittelt. In den Grundwassergeringleitern des Buntsandstein, des Keuper und des Lias liegt die Süß-/Salzwassergrenze generell nur einige Zehner Meter unter der Geländeoberfläche.

Unterhalb der Süß-/Salzwassergrenze steigt der Salzgehalt des Grundwassers mit zunehmender Teufe rasch auf gesättigte Verhältnisse an. In größerer Teufe ist das Grundwasser an Steinsalz gesättigt.

An den Flanken des Asse Höhenzugs und an dessen Westende bei Groß Denkte fördern zahlreiche Quellen Grundwasser mit erhöhtem Salzgehalt zu Tage. Auch die Oberflächengewässer weisen in diesem Gebiet messbare Salzgehalte auf. Gelöstes Salz gelangt einerseits diffusiv und andererseits advektiv mit der Grundwasserbewegung vom tieferen Untergrund in das oberflächennahe Grundwasser, zu den Quellen und in die Oberflächengewässer gebracht. Von besonderer Bedeutung sind dabei die vertikalen hydraulischen Gradienten unterhalb der Exfiltrationsgebiete, welche für die Verdünnung des in größerer Tiefe an Salz gesättigten Grundwassers beim Austrag in die Exfiltrationsgebiete maßgebend sind. Bei Groß Denkte treten Quellen aus, die im zeitlichen Mittel Salzgehalte bis etwa 120 g/l, d.h. bis fast 40% des Gehalts von gesättigter NaCl-Lösung, aufweisen. Demgegenüber sind die Salzgehalte der Quellen und Oberflächengewässer in den Exfiltrationsgebieten Rothebach und Ammerbeek mit Werten von wenigen Gramm pro Liter deutlich niedriger und liegen im Bereich von 1% des Gehalts von gesättigter NaCl-Lösung.

2.1.5 Zusammenfassung zu den Verhältnissen in der Salzstruktur und im Deckgebirge

Die Salzstruktur Asse ist eine Salzstruktur mit steilen Flanken und einem komplexen Aufbau, deren halokinetische Entwicklung weitgehend abgeschlossen ist. Sie wird im Wesentlichen durch Steinsalz der Staßfurt- und Leine-Serie sowie Carnallitit des Kaliflözes Staßfurt gebildet. Im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II ist Carnallitit bis in 532 m Teufe aufgeschlossen. Die geomechanisch bruchhaft reagierenden Schichten im Übergang zwischen der Staßfurt- und der Leine-Serie und insbesondere der Hauptanhydrit der Leine-Serie, welche potenziell Wegsamkeiten für Salzlösung im Salinar darstellen können, liegen nur als tektonisch isolierte Brocken oder kleine Schollen vor. Sie bilden keine hydraulischen Wegsamkeiten über größere, sicherheitsrelevante Entfernungen.

Das Anhydritmittelsalz der Leine-Serie enthält lösungsführende Anhydritbänke, die Mächtigkeiten von 1 m bis 3 m erreichen. Für Sicherheitsbewertungen ist davon auszugehen, dass die Anhydritmittel über größere Distanzen hydraulische Wegsamkeiten darstellen und sowohl am Salzspiegel als auch in der Südflanke der Salzstruktur ausstreichen und dort mit dem Hutgestein bzw. dem Deckgebirge in hydraulischem Kontakt stehen. Im Grubengebäude sind die Anhydritmittel nicht aufgeschlossen.

Die Steinsalz-Barriere zwischen Grubengebäude und dem Deckgebirge in der Nordflanke und zwischen Grubengebäude und Salzspiegel der Salzstruktur ist mächtig und dicht. In der Südflanke ist die Steinsalz-Barriere (Zechstein und Rötsalz *so1Na*) zwischen der Kontur der Abbaue und dem Rötanhydrit (*so1A*) von 595 m bis 474 m Teufe gering mächtig, beträgt aber überall mindestens 8 m. Durch die bergbaubedingten Auflockerungen und Verformungen bildete sich eine Zone mit desintegrierter Steinsalz-Barriere, die von der 511-m-Sohle (eventuell auch von der 490-m-Sohle) bis zur 574-m-Sohle (evtl. 595-m-Sohle)[8] reicht (vgl. Kapitel 2.5). In der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere führen erwiesenermaßen hydraulische Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere. Diese sind vermutlich diskret

[8] Die Teufenangaben in den Klammern gelten für alternative Systementwicklungen, die vom heutigen Zustand und der erwarteten Systementwicklung abweichen, siehe auch /COL 2006a/.

ausgebildet und bewirken den beobachteten Lösungszutritt in das Grubengebäude (vgl. Kapitel 2.6).

Das Deckgebirge in der Nordflanke stellt eine mächtige und gering durchlässige Barriere dar. In der Südflanke der Salzstruktur ist das Deckgebirge als steilstehende Abfolge von erhöht durchlässigen und gering durchlässigen Schichten ausgebildet, welche von geogenen und bergbaubedingten gebirgsmechanischen Strukturen (Störungen, etc.) durchzogen ist. Oberhalb des Salzspiegels ist ein relativ geringmächtiges Hutgestein ausgebildet. Das darüber liegende Deckgebirge ist verstürzt und dadurch komplex aufgebaut. Das Hutgestein und das darüber liegende verstürzte Deckgebirge weisen eine relativ hohe hydraulische Durchlässigkeit auf.

Die hydrogeologischen Verhältnisse sind vorwiegend lokal bestimmt, die regionalen Fließsysteme sind von untergeordneter Bedeutung für die Grundwasserbewegung im Deckgebirge der Salzstruktur Asse. Die wichtigsten hydrogeologischen Einheiten sind einerseits das verstürzte Deckgebirge/Hutgestein und der damit hydraulisch in direktem Kontakt stehende Rötanhydrit in der Südflanke und andererseits der Muschelkalk in der Südflanke. Getrennt werden die beiden Einheiten durch den Rötaquitard (*so2-so4*), durch den allerdings hydraulische Wegsamkeiten führen. Zum räumlichen Verlauf und den hydraulischen Leitfähigkeiten dieser Wegsamkeiten liegen keine belastbaren Informationen vor. Es ist davon auszugehen, dass sich die Grundwasserbewegungen in allen hydrogeologischen Einheiten auf diskreten Sprödstrukturen (Klüfte, Störungen, etc.) und lokal (und bis in beschränkte Tiefen) zudem auf Karststrukturen konzentrieren. Aufgrund des Lösungszutritts in das Grubengebäude ist weiter davon auszugehen, dass zwischen den Wegsamkeiten im Rötanhydrit und den Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere hydraulische Kontakte bestehen.

Die Grundwasserneubildung erfolgt vorwiegend auf den Hochlagen des Asse Höhenzugs. Wichtige Exfiltrationsgebiete in der Umgebung der Schachtanlage Asse II sind der Taleinschnitt der Ammerbeek im verstürzten Deckgebirge und im Muschelkalk sowie jener des Rothebachs im Muschelkalk (die beiden letzteren jeweils einschließlich der quartären Rinnen im südlich angrenzenden Keuper). Im tieferen Untergrund wird die Grundwasserbewegung durch die dort auftretende hohe Versalzung beeinflusst.

2.2 Grubengebäude

2.2.1 Allgemeine Beschreibung des Grubengebäudes

Die Schachtanlage Asse II diente von 1908 bis 1964 der Salzgewinnung. Es entstanden 131 Abbaukammern im Staßfurt- und Leine-Salinar mit einem Gesamtvolumen von ca. 4 700 000 m^3. Die Abbaue liegen im Sattelkern (Steinsalz) sowie in der Nord- (Kalisalz) und Südflanke (Steinsalz) der Sattelstruktur. Sie befinden sich in Teufen von 490 m bis 775 m. Nach 1964 entstanden die Auffahrungen des Tiefenaufschlusses unterhalb 775 m Teufe. Das Grubengebäude ist durch 22 Sohlen zwischen 474 m und 975 m Teufe erschlossen. Seit 1990 wurden keine größeren Auffahrungen durchgeführt. Abb. 2 zeigt im Seigerriss einen Überblick des Grubengebäudes im derzeitigen Zustand.

Die einzelnen Sohlen sind durch eine Vielzahl von Auffahrungen miteinander verbunden. Eine Darstellung der Grubenbaue, einschließlich des bis 2008 eingebrachten Versatzes, enthält das Risswerk /BfS 2009a/. Das die Abbaue umgebende Salzgestein ist aufgelockert und damit durchlässig (siehe weiter unten in diesem Kapitel). Auffahrungen und Auflockerungszonen bilden ein stark vernetztes System von hydraulischen Wegsamkeiten.

Das Grubengebäude besteht aus drei großen Baufeldern und dem Tiefenaufschluss. Die Baufelder sind:

- das Baufeld in der Südflanke,
- das Baufeld im Sattelkern und
- das Carnallitit-Baufeld in der Nordflanke.

Das Carnallitit-Baufeld wurde von 1909 bis 1925 in der Nordflanke des Salzsattels auf der 750-m-Sohle aufgefahren. Die Abbaue erstrecken sich bis in das Niveau der 725-m-Sohle. Das Baufeld ist nahezu vollständig mit Rückständen aus der Kaliaufbereitung (Altversatz) und Salzgrus (Eigenversatz[9]) verfüllt /BfS 2009a/.

Das Baufeld in der Südflanke wurde von 1916 bis 1964 im Leine-Steinsalz von der 750-m- bis zur 490-m-Sohle erschlossen. Die Abbaue von der 725-m- bis zur 553-m-Sohle sind fast vollständig mit Salzgrus (Eigen- und Fremdversatz) verfüllt. Auf der 532-m-, 511-m- und 490-m-Sohle sind einige Abbaue vollständig verfüllt, einige nur teilverfüllt /BfS 2009a/. Für diese 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 erhebliche Mengen Carnallitit an. Das aufgefahrene Salzhaufwerk (Eigenversatz) wurde während der Auffahrung in die benachbarten Abbaue verstürzt. Von 1995 bis 2004 wurden die noch offen stehenden Abbaue im Baufeld in der Südflanke weitgehend mit Rückstandssalzen der Halde Ronnenberg versetzt. In den Abbau-

[9] Das beim Auffahren von Grubenbauen – u.a. des Tiefenaufschlusses – anfallende Salzhaufwerk wurde in das Carnalliti-Baufeld und in Abbaue in der Südflanke von der 725-m- bis zur 637-m-Sohle eingebracht. Dieser Versatz wird als „Eigenversatz“ bezeichnet.

en gibt es noch Firstspalte mit unterschiedlicher Mächtigkeit, im Mittel etwa 0,3 m /ASS 2009a/. In einigen Abbauen, vor allem auf der 700-m-, 532-m-, 511-m- und 490-m-Sohle, liegen noch größere offene Hohlräume vor.

Das Baufeld im Sattelkern wurde von 1927 bis 1964 zwischen der 775-m- und 725-m-Sohle im Staßfurt-Steinsalz aufgefahren. Die Abbaue sind teilweise mit Eigenversatz verfüllt /BfS 2009a/. Noch offene Hohlräume der 775-m-Sohle wurden größtenteils mit Sorelbeton nachverfüllt. Dagegen gibt es auf der 750-m- und 725-m-Sohle noch größere unverfüllte Hohlräume.

Der nach 1985 aufgefahrene Tiefenaufschluss unter der 775-m-Sohle wurde teilweise mit Eigenversatz bzw. Schotter (Kaverne) und Sorelbeton verfüllt. Verbliebene Hohlräume werden derzeit mit Sorelbeton nachverfüllt (siehe Kapitel 2.4).

Vom Gesamthohlraumvolumen in der Schachtanlage Asse II sind bisher ca. 4 100 000 m³ versetzt, davon der überwiegende Teil mit Salzgrus und 83 000 m³ mit Sorelbeton /ASS 2009a/. Eigenversatz wurde entweder mit Fahrladern in die Abbaue verkippt oder pneumatisch eingeblasen. Fremdversatz wurde ausschließlich mittels Blasversatz von über Tage in die Abbaue verbracht; hier wurden geringe Mengen Deckgebirgslösung zugesetzt.

Eigenversatz wurde mit einer Einbaudichte von durchschnittlich 1,46 t/m³ eingebracht. Durch Konvergenz wurde dieser Versatz verdichtet und hat heute einen Porenanteil von 30 %. Die mittlere Einbaudichte des Blasversatzes betrug 1,27 t/m³. Durch Konvergenz wurde dieser Versatz verdichtet und hat heute einen Porenanteil von 41 %. Aus Untersuchungen an Prüfkörpern des Altversatzes im Carnallitit-Baufeld wird dort auf eine mittlere Dichte von 1,71 t/m³ und eine mittlere Porosität von 21 % geschlossen.

Noch etwa 650 000 m³ Hohlraumvolumen können nachverfüllt werden. Im Versatz, abzüglich des Porenvolumens im Sorelbeton, liegt derzeit ein fluidzugängliches Porenvolumen von etwa 1 300 000 m³ vor /ASS 2009a/.

Die Grube ist über die Tagesschächte Asse 2 und Asse 4 mit dem Deckgebirge bzw. der Tagesoberfläche verbunden /BfS 2009a/. Die Tiefbohrung Remlingen1 durchörtert das Gebirge von der Tagesoberfläche bis zur Grube und verläuft dort weiter im Pfeiler zwischen den Abbaureihen 4 und 5 im Oberen Baufeld in der Südflanke. Alle anderen Tiefbohrungen haben einen hinreichend mächtigen Sicherheitspfeiler zum Grubengebäude. Bohrungen von der Tagesoberfläche, Bohrungen innerhalb der Salzstruktur und Bohrungen aus dem Grubengebäude bis ins Deckgebirge wurden ordnungsgemäß verfüllt.

Der Bereich der Steinsalz-Barriere zwischen Grubengebäude und Deckgebirge in der Südflanke von 574 m (evtl. 595 m) bis 500 m Teufe ist durch bergbaubedingte Verformungen desintegriert; dieser weist hydraulische Wegsamkeiten auf, über die der heutige Lösungszutritt aus der Südflanke erfolgt. Dieser Gesteinsbereich der Steinsalz-Barriere wird „Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere“ genannt (vgl. Kapitel 2.1.5).

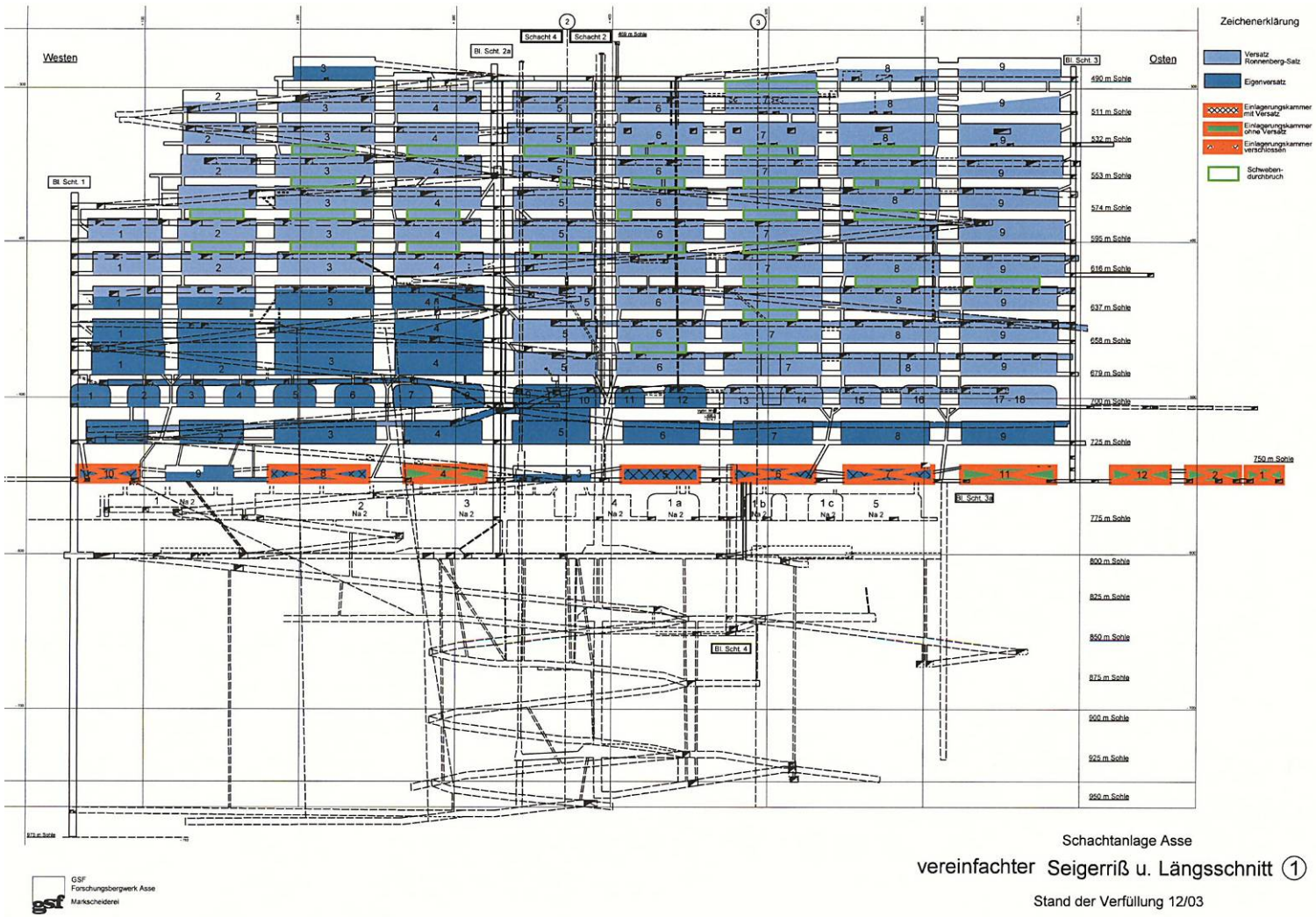

Abb. 2: Vereinfachter Seigerriss und Längsschnitt mit Salzversatz und Schwebendurchbrüchen. blau: Salzversatz. rot umrandet: Einlagerungskammern. grün umrandet: Schwebendurchbrüche (Stand der Abbildung: 2007)

In der Systembeschreibung für den Standort Asse /HMGU 2007/ wurde das Grubengebäude untergliedert. Diese nachfolgend aufgeführte Gliederung wird auch im vorliegenden Bericht verwendet:

- Tiefenaufschluss vom Grubentiefsten bis einschließlich der 800-m-Sohle
- Einlagerungskammern für schwach radioaktive Abfälle bzw. LAW-Kammern der 750-m- und 725-m-Sohle
- Carnallitit-Baufeld zwischen 750 m und 710 m Teufe
- Übrige Grubenbaue der 775-m-, 750-m- und 725-m-Sohle
- Einlagerungskammer 8a/511 für mittelradioaktive Abfälle bzw. MAW-Kammer und deren Nahbereich, die Abbaue 8a und 8b auf der 532-m-Sohle
- Oberes Baufeld in der Südflanke von der 700-m- bis zur 490-m-Sohle
- Tagesschächte

2.2.2 Einlagerungskammern und -bereiche

Abfälle wurden ausschließlich in Steinsalzabbaue 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. Mittel radioaktive Abfälle (MAW) wurden nur in den Abbau 8a/511 eingelagert. In der MAW-Kammer liegen noch unverfüllte Hohlräume vor.

Der aktuelle 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 dokumentiert /BfS 2009c/. Die ELK sind untereinander und mit angrenzenden Abbauen, durch Strecken und Durchhiebe im Sohlen- und Firstniveau, durch Gesenke, Rolllöcher und Bohrungen sowie durch aufgelockertes Salzgestein in Stößen und Schweben verbunden. Die meisten ELK können nicht hydraulisch von anderen Abbauen getrennt werden. Einige der o. g. Auffahrungen wurden aus Gründen der Betriebssicherheit mit Bauwerken aus Salzbeton und/oder Bitumen verschlossen /BfS 2009a/. Die Durchlässigkeit dieser Verschlussbauwerke ist infolge des aufgelockerten Salzgesteins in ihrer Umgebung höher als die der Sorelbetonbarrieren; die Durchlässigkeit kann in der Stilllegungsphase noch weiter zunehmen, da die Bauwerke nicht durch Widerlager eingespannt sind und weiterhin mechanisch stark beansprucht werden.

In den meisten zugänglichen Auffahrungen zwischen ELK und benachbarten Grubenbauen sieht das Stilllegungskonzept Vollverfüllung die Errichtung von Sorelbetonbarrieren vor (siehe Kapitel 4). Durch die Anordnung der Sorelbetonbarrieren sollen Grubenbereiche mit mehreren ELK und Abbauen – die so genannten Einlagerungsbereiche (ELB) – gegeneinander und vom übrigen Grubengebäude hydraulisch abgetrennt werden. Unter Berücksichtigung der derzeit geplanten Anordnung werden die LAW-Einlagerungskammern zu fünf ELB zu-

sammengefasst (siehe Tab. 1); einen weiteren ELB bildet die MAW-Kammer 8a auf der 511-m-Sohle.

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

	LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4
Einlagerungs-kammern	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
Weitere 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	

Einige Zugänge der ELK, die nicht mit Salzgrus oder Verschlussbauwerken verschlossen waren, sind im Jahr 2009 für den bestimmungsgemäßen Betrieb und die Störfallvorsorge verschlossen worden (siehe Kapitel 2.4). Tab. 2 gibt den heutigen Stand unter Berücksichtigung der Vorsorgemaßnahmen wieder.

Tab. 2: Kennzahlen der Einlagerungskammern nach /BfS 2009c/

ELB/ELK	Kontur-volumen (geschätzt) [m^3]	Gebinde-bruttovolumen [m^3]	Unverfüllter Hohlraum (gerundet) [m^3]	Einlagerungs-technik	Verschluss der Zugänge zum Nahbereich*
LAW1A					
2/750Na2	21 900	10 230	0**	Abkipptechnik	Salzbeton, Salzhaufwerk
LAW1B					
7/725Na2	14 000	2 251	1 600	Abkipptechnik	offen bzw. Salzhaufwerk
LAW2					
10/750	7 100	1 175	0	Abkipptechnik	Salzhaufwerk
8/750	8 500	2 833	0	Abkipptechnik	Salzbeton, Salzhaufwerk
4/750	6 600	1 488	2 800	Stapeltechnik stehend	Sorelbeton, Salzhaufwerk
LAW3					
5/750	12 200	3 701	270	Abkipptechnik + Stapeltechnik liegend	Salzbeton, Sorelbeton, Salzhaufwerk
6/750	14 300	6 592	0	Abkipptechnik + Stapeltechnik liegend	Salzbeton, Salzhaufwerk
7/750	13 500	3 993	0	Abkipptechnik + Stapeltechnik liegend	Salzbeton, Bitumen, Salzhaufwerk
11/750	11 700	6 792	800	Abkipptechnik + Stapel liegend	Salzbeton bzw. Salzhaufwerk
LAW4					
12/750	7 900	2 514	2 600	Stapeltechnik liegend	Salzbeton
2/750	5 300	2 305	1 400	Stapeltechnik liegend / stehend	Salzhaufwerk
1/750	6 600	2 693	1 500	Stapeltechnik liegend	Salzhaufwerk
MAW					
8a/511	5 600	325	5 300	Abseiltechnik	sulfatbeständiger Salzbeton

* Angaben ohne Durchhiebe zwischen ELK, Durchhiebe zu Abbauen ohne radioaktive Abfälle im gleichen ELB, Bohrungen und Rolllöcher

** ELK ist bis unter die Firste verfüllt

2.2.3 Schweben und Pfeiler

Grubenbaue werden seitlich durch Pfeiler und vertikal durch Schweben voneinander getrennt. Soweit die Pfeiler und Schweben durch gebirgsmechanische Verformung unterhalb der Dilatanzgrenze beansprucht worden sind, sind sie hydraulisch dicht im Vergleich mit Salzgrus, Sorelbetonbarrieren sowie gebirgsmechanisch stärker beanspruchten Pfeilern und Schweben. Die hydraulischen Wegsamkeiten durch solche Pfeiler und Schweben werden durch Auffahrungen gebildet, wie Durchhiebe und Rolllöcher. Haben die Pfeiler und Schweben durch die gebirgsmechanischen Verformungen stärkere Belastungen mit einem Überschreiten der Dilatanzgrenze erfahren, sind sie in einen Zustand gelangt, bei dem sie zwar noch weitgehend als intakt bezeichnet werden können, jedoch eine nicht zu vernachlässigende hydraulische Durchlässigkeit aufweisen.

Durch die erfolgten gebirgsmechanischen Verformungen, den örtlich hohen Lasteintrag und die über mehrere Jahrzehnte andauernde unverfüllte Standzeit der Abbaue wurden zahlreiche Schweben und Pfeiler derart stark beansprucht, dass deren Tragfähigkeitsmaximum überschritten wurde und sie sich im Entfestigungszustand befinden (siehe Kapitel 2.5). Durch Abschalungen und Scherbeanspruchungen hat sich die ursprüngliche Mächtigkeit der Schweben, welche noch dem Risswerk /BfS 2009a/ zu entnehmen ist, deutlich verringert. Diese Mächtigkeitsreduzierung ist vor allem im mittleren Bereich der Firste der Abbaue zu beobachten /ASS 2009a/. Es bildeten sich durchgehende Risse und Spalten, einige Schweben sind dadurch gebrochen oder sogar bereits gefallen (siehe Abb. 2). In der Folge weisen diese Schweben eine erhebliche hydraulische Durchlässigkeit auf.

Die Schwebe, welche die 800-m-Sohle – und damit den Tiefenaufschluss – von der 775-m-Sohle trennt, ist rund 20 m mächtig, gebirgsmechanisch wenig beansprucht und kann deshalb als dicht eingestuft werden.

Auf der 775-m-Sohle gibt es nur Abbaue im Staßfurt-Steinsalz, im Leine-Steinsalz verlaufen lediglich Strecken. Die Mächtigkeit der Schweben der Abbaue im Staßfurt-Steinsalz bis zur 750-m-Sohle beträgt nur rund 6 m. Durch gebirgsmechanische Beanspruchung weisen die Schweben auch durchgehende Risse oder Spalten auf. Aufgrund der Dilatanz stellen diese Schweben trotzdem einen nennenswerten hydraulischen Widerstand im Vergleich zu den mit Salzgrus verfüllten Rolllöchern in diesen Schweben dar. Mit Blick auf die ELB gibt es solche Schweben mit Rolllöchern zwischen der 775-m-Sohle und LAW1A. Die Schweben der Strecken im Leine-Steinsalz bis zur 750-m-Sohle sind dagegen weitaus mächtiger und weitgehend intakt, d. h. sie weisen keine durchgehenden Risse oder Spalten auf. Diese Schweben stellen einen signifikanten hydraulischen Widerstand dar. Zu den ELB LAW2, LAW3 und LAW4 im Leine-Steinsalz bestehen daher keine relevanten hydraulischen Wegsamkeiten von der 775-m-Sohle.

Die Abbaue der 750-m-Sohle im Leine-Steinsalz weisen nur geringe Höhen auf, die Schweben zur 725-m-Sohle waren bei der Gewinnung deshalb mit rund 15 m relativ mächtig. Die Steinsalzabbaue im Staßfurt-Steinsalz auf dieser Sohle sind deutlich höher, entsprechend geringmächtiger sind die Schweben. Dadurch sind die Schweben im Leine-Steinsalz in der Regel als geringer permeabel einzustufen als jene im Staßfurt-Steinsalz. Es ist davon auszugehen, dass die Mächtigkeiten all dieser Schweben durch Abschalungen um 1 m bis 2 m

reduziert worden sind, vor allem wenn die liegenden Abbaue der Schweben größere unverfüllte Hohlräume im Firstbereich aufweisen (vgl. Tab. 2), wie beispielsweise ELK 4/750, ELK 5/750 und Abbau 9/750[10] /BfS 2009b/. Die Schweben zwischen der 750-m- und der 725-m-Sohle sind durch die gebirgsmechanischen Beanspruchungen teilweise von Rissen durchzogen. In der Schwebe von ELK 4/750 werden bei der mikroseismischen Überwachung gegenwärtig Bruchprozesse ausgewiesen. Von Bedeutung für die ELB sind die Schweben zwischen LAW1A und LAW1B sowie jene von LAW2 und LAW3 gegen die Abbaue im Leine-Steinsalz auf der 725-m-Sohle. Dagegen befinden sich oberhalb von LAW4 keine Abbaue auf der 725-m-Sohle, sodass LAW4 keine hydraulisch wirksamen Schweben aufweist.

Die Pfeiler zwischen den Abbauen im Steinsalz sind sowohl auf der 750-m- als auch auf der 725-m-Sohle ebenfalls gebirgsmechanisch beansprucht. Die durch diese Beanspruchung entstandenen Risse verlaufen überwiegend vertikal und querschlägig, es sind aber keine durchgehenden Wegsamkeiten zur nächsthöheren Sohle nachgewiesen. Die Pfeiler stellen dadurch nennenswerte hydraulische Widerstände dar und behindern Lösungsbewegungen zwischen benachbarten Grubenbauen derselben Sohle. Gleichwohl ist die Permeabilität dieser Pfeiler für Lösungsbewegungen zwischen Grubenbauen gegenüber intaktem Steinsalz deutlich erhöht. In Bezug auf die ELB werden solche Pfeiler zwischen LAW1A und dem östlich gelegenen Grubenbau 4/750 im Staßfurt-Steinsalz, zwischen LAW2 und dem östlich gelegenen Grubenbau 3/750 im Leine-Steinsalz sowie zwischen LAW4 und dem Abbau 12 im Carnallitit-Baufeld (Ost) beobachtet.

Nach der Gewinnung wiesen die Abbaue im Leine-Steinsalz der 725-m-Sohle – mit Ausnahme von Abbau 5/725 – Schweben von etwa 8,5 m Mächtigkeit gegen die Abbaue der darüber liegenden 700-m-Sohle auf; durch Abschalungen wurde die Mächtigkeit vermutlich auf 7 m reduziert /ASS 2009a/. Diese Schweben sind als gebirgsmechanisch beansprucht, jedoch weitgehend intakt mit nennenswertem hydraulischem Widerstand einzustufen. Die Schwebe von Abbau 5/725 wurde abgebaut, so dass Abbau 5/725 mit den darüber liegenden Abbauen auf der 700-m-Sohle einen zusammenhängenden, mit Salzgrus verfüllten Hohlraum bildet. Bezüglich des ELB LAW1B ist festzustellen, dass oberhalb von LAW1B, abgesehen von einigen Strecken, keine Grubenbaue liegen. Trotzdem sind für LAW1B – insbesondere für Abbau 6/725 – durchlässige Verbindungen über Schweben zur 700-m-Sohle nicht auszuschließen; Grund hierfür sind anhaltende Verformungen im Salzgestein und Abschalungen in den Firstkonturen[11].

Die Abbaue von der 700-m- bis zur 490-m-Sohle (jeweils einschließlich) bilden das Obere Baufeld in der Südflanke. Dieses ist sehr hoch durchbaut und lässt sich in neun vertikale Kammer- bzw. Abbaureihen (K1 bis K9) gliedern (vgl. Abb. 2). Die Abbaue sind mit zunehmender Teufe leicht gegen Süden versetzt. Diese Abbaureihen sind durch mindestens 12 m breite Pfeiler voneinander getrennt, die aber von Durchhieben durchörtert sind. Zwischen der Kammerreihe K4 und K5 verläuft der Hauptpfeiler mit einer Breite von rund 20 m.

---

10 Der Resthohlraum im Abbau 9/750 ist seit 2009 mit Sorelbeton verfüllt, wies jedoch vorher über einen langen Zeitraum große unverfüllte Hohlräume auf (ca. 3000 m³).

11 Die Mächtigkeit der Schwebe von ELK 7/725 ist ebenfalls reduziert /BfS 2009c/.

Die Schweben im Oberen Baufeld in der Südflanke weisen unterschiedliche mechanische Beanspruchungen auf und sind teilweise sogar schon gefallen. Entsprechend den hydraulischen Eigenschaften können sie in drei Kategorien unterteilt werden, vgl. /ASS 2009a/:

- mechanisch beansprucht, aber weitgehend intakt

  Die Schweben weisen keine durchgehenden Spalten und daher nennenswerte hydraulische Widerstände auf. Etwa 18 % der Schweben können dieser Kategorie zugeordnet werden. Sie befinden sich aufgrund der geringen gebirgsmechanischen Beanspruchung in den randlichen Abbaureihen K1 und K9. Es wird erwartet, dass der hydraulische Widerstand dieser Schweben mittelfristig deutlich höher bleibt als jener der Versatzkörper.

- mechanisch beansprucht mit durchgehenden Spalten

  Die Schweben weisen durchgehende Spalten mit Spaltenweiten im Zentimeterbereich auf. Etwa 41 % der Schweben können dieser Kategorie zugeordnet werden. Diese befinden sich in allen Kammerreihen K1 bis K9. Aufgrund der Spaltenweiten und der Spaltenhäufigkeit bilden mechanisch beanspruchte Schweben mit durchgehenden Spalten keinen nennenswerten hydraulischen Widerstand. Da die Spalten Bewegungsflächen bei weiteren Scherbeanspruchungen durch die Konvergenz darstellen, kann auch kein Aufbau eines hydraulischen Widerstandes als Folge der Konvergenz unterstellt werden.

- fehlende Schweben

  Dieser Kategorie werden „Schweben“ zugeordnet, die bereits gefallen oder gewonnen worden sind. „Fehlende Schweben“ weisen die Permeabilität der darüber liegenden Versatzkörper auf. Ihre hydraulischen Eigenschaften ändern sich wie jene der Versatzkörper. Es können etwa 41 % der Schweben dieser Kategorie zugeordnet werden. „Fehlende Schweben“ befinden sich in allen Abbaureihen K1 bis K9.

Die Pfeiler zwischen den Abbauen im Oberen Baufeld in der Südflanke sind durch gebirgsmechanische Beanspruchung aufgelockert. Die hierdurch entstandenen Risse verlaufen überwiegend vertikal und querschlägig und behindern die Lösungsbewegungen zwischen benachbarten Abbaureihen mit nennenswertem hydraulischem Widerstand. Die Pfeiler sind aber von Durchhieben durchörtert, die nur teilweise mit Salzversatz verfüllt sind. Die Pfeiler stellen somit keinen erheblichen hydraulischen Widerstand für horizontale Lösungsbewegungen im Streichen dar. Da die Risse keine durchgehenden hydraulischen Wegsamkeiten von Sohle zu Sohle bilden[12], kanalisieren die Pfeiler die vertikalen Lösungsbewegungen in ihrem Innern nicht.

Im Bereich der MAW-Kammer (8a/511) ist die Schwebe der darunter liegenden Kammer 8a/532 teilweise aufgelockert und hydraulisch durchlässig. Am oberen südlichen Pfeiler der MAW-Kammer gegen den Abbau 8/511 sind ausgehend von der Abbaubegleitstrecke der 511-m-Sohle Risse zu beobachten, die auf die anhaltenden gebirgsmechanischen Verformungen zurückzuführen sind und die Dichtheit des Pfeilers beeinträchtigen können. Die Dichtheit der Schwebe gegen die Beschickungskammer auf der 490-m-Sohle ist bisher nicht

[12] Dies liegt daran, dass die Risse nicht durch die Knotenbereiche von Schweben und Pfeilern gehen, d.h. in diesen Knotenbereichen ist die hydraulische Durchlässigkeit vernachlässigbar gering.

beeinträchtigt[13], daher sind auch die konturnahen Auflockerungszonen der MAW-Kammer am Nord-, Ost- und Weststoß ohne Einfluss.

Ohne Bedeutung sind auch die konturnahen Auflockerungszonen der südlichen Pfeiler der Abbaue 8a/532 und 8b/532 (welche zusammen den Nahbereich MAW bilden) gegen den Abbau 8/532, der zum System der Abbaureihen des Oberen Baufeldes in der Südflanke gehört. Diese Pfeiler sind in ihrem Kern nur gering aufgelockert und daher in querschlägiger Richtung geringer durchlässig als die mit Salzgrus verrollten Durchhiebe im Sohlenniveau in diesen Pfeilern.

2.2.4 Auflockerungszonen

Neben den oben unter den Stichworten „Schweben“ und „Pfeilern“ angesprochenen gebirgsmechanisch beanspruchten und dadurch hydraulisch mehr oder weniger durchlässigen Bereichen des Salzgesteins sind des weiteren großräumige Auflockerungszonen zu nennen, sofern diese mehrere Grubenbaue untereinander oder das Grubengebäude mit dem Hutgestein oder Deckgebirge hydraulisch verbinden. Innerhalb des Grubengebäudes sind folgende Auflockerungszonen von potenzieller Relevanz:

- Auflockerungszone am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke
- Auflockerungszone in der Firste des Carnallitit-Baufeldes

Am Südstoß des Baufeldes in der Südflanke verläuft eine durchgehende Auflockerungszone, die ein an den geologischen Schichtgrenzen orientiertes blätterteig-ähnliches Trennflächengefüge aufweist. Sie ist über den gesamten Teufenbereich des Baufeldes von 750 m bis 470 m vorhanden und dehnt sich im Streichen von der Abbaureihe K1 bis zur K9 aus, sie ist also über die gesamte streichende Erstreckung des Baufeldes hydraulisch wirksam (vgl. Abb. 2).

Das Carnallitit-Baufeld ist eine Abfolge von knapp 50 m bis über 100 m langen Abbauen (in querschlägiger Richtung) mit Höhen zwischen 20 m und 40 m, das sich in SE-NW-Richtung über rund 800 m erstreckt. In der Firste dieses Baufeldes verläuft eine das gesamte Baufeld umspannende, im Westteil eine höhere vertikale Ausdehnung erreichende, domartige Auflockerungszone, die hydraulisch als zusammenhängende Zone wirkt. Die Pfeiler zwischen den Kaliabbauen sind auf den Teilsohlen zumeist von jeweils zwei Durchhieben durchörtert, in denen sich größtenteils Versatz befindet. Da die gebirgsmechanische Beanspruchung der Pfeiler zu erheblichen Entfestigungen bis in die Pfeilerkerne geführt hat, ist den Pfeilern – auch in streichender Richtung – kein signifikanter Strömungswiderstand beizumessen.

[13] Bei zeitnaher, hochwertiger Verfüllung der MAW-Kammer, Beschickungsbohrungen, Beschickungskammer und deren Zugangsstrecken auf der 490-m-Sohle mit Sorelbeton (siehe Kapitel 4.3) kann weiterhin von der Dichtheit des südlichen Pfeilers und der Schwebe der MAW-Kammer ausgegangen werden.

2.2.5 Hydraulische Verbindungen zwischen Grubengebäude und Deckgebirge

Zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge sind mehrere Wegsamkeiten für Fluide (wässrige Lösungen und Gase) denkbar: Zum Einen ist das Wirtsgestein zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge durch Tagesschächte und Bohrungen durchörtert. Zum Anderen sind durch gebirgsmechanische Beanspruchungen desintegrierte Gesteinsbereiche entstanden, die Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge bilden können. Außerdem gibt es potenziell wasserführende Gesteinsschichten im Wirtsgestein, die Wegsamkeiten bilden können. Bestehende und potenzielle hydraulische Verbindungen zwischen dem Grubengebäude und dem Hutgestein / Deckgebirge wurden ausführlich in /COL 2006a/ und in /GSF 2006a/ diskutiert. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit sind von diesen Wegsamkeiten primär diejenigen durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke und entlang der Tagesschächte relevant. Andere hydraulisch wirksame Wegsamkeiten durch das Wirtsgestein wurden bisher /HMGU 2007/ ausgeschlossen. Neuere mikroseismische Messungen weisen nun auf gebirgsmechanische Verformungen hin, welche die Entstehung von neuen Wegsamkeiten durch die Steinsalz-Barriere in 700 m Teufe als möglich erscheinen lassen /IfG 2009/.

Aus gebirgsmechanischen Gründen und aufgrund der beobachteten Zutrittsorte im Grubengebäude lässt sich die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere auf den Gebirgsbereich südlich der Abbaureihen K2 bis K5 zwischen 500 m und 574 m (evtl. 595 m) Teufe eingrenzen. Über die hydraulisch aktiven Wegsamkeiten in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere tritt heute im Mittel rund 12 m^3 Salzlösung pro Tag dem Grubengebäude zu. Details zu diesem Lösungszutritt werden in Kapitel 2.6 behandelt.

In der Phase nach Stilllegung der Schachtanlage Asse II sind ggf. neben dem heutigen Zutrittsbereich für Deckgebirgslösung weitere Wegsamkeiten für den Übertritt von Radionukliden aus dem Grubengebäude ins Deckgebirge zu betrachten. Dies können beispielsweise die Wegsamkeit zwischen dem Grubengebäude und dem Hutgestein bzw. Deckgebirge entlang der Tagesschächte oder die o. g. eventuelle Wegsamkeit in 700 m Teufe sein.

2.3 Inventar

In der Schachtanlage Asse II wurden insgesamt 124 494 schwach radioaktive Abfallgebinde in den Kammern der 750-m- und der 725-m-Sohle sowie 1 293 mittel radioaktive Gebinde in der Kammer 8a/511 auf der 511-m-Sohle eingelagert. Die Abfälle wurden ausschließlich in fester Form in Gebinden mittels Stapel- oder Versturztechniken eingebracht. Ungefähr die Hälfte der Abfälle ist zementkonditioniert. Ein geringer Teil der anderen Hälfte ist bituminiert, der verbleibende Rest nicht vollständig in einer Matrix verfestigt. Das radioaktive Inventar setzt sich aus Spalt- und Aktivierungsprodukten sowie Radionukliden der vier Actiniden-Zerfallsreihen zusammen.

Eingelagert wurden zementierte (wasserhaltige) und bituminierte (getrocknete) Abfälle, wie z. B. borat-, sulfat- oder nitrathaltige Verdampferkonzentrate, Filterrückstände und Filterhilfsmittel aus Ionenaustauschharzen, Kieselgur und Zellulose. Außerdem enthalten die Ab-

fälle auch flüssige Bestandteile, wie Fällschlämme, Öle, Lösemittel, Öl-Lösemittel-Wasser-Gemische mit Gipsstein und Fixierungsmittel in Form von quellfähigem PVC-Pulver oder PVC-Granulat. Die festen Abfallbestandteile beinhalten u.a. Aktivkohle, Asche, Kugelharze/ Pulverharze, Bauschutt (z. B. Normalbeton, Erde, Sand, Kies, Steine, Asbest, Mineralwolle, Eisenmetalle, Nichteisenmetalle, Gummi, Kunststoffe, Holz, Glas), Labor- und Mischabfälle unterschiedlicher Zusammensetzung, Filterelemente und Filterkerzen, zellulosehaltiges Material (z. B. Papier, Holz, Baumwolle, Zellstoff, Zellulose und pflanzliche Abfälle) sowie Behälter für umschlossene Strahlenquellen /BUC 2004/.

Die Wärmeentwicklung der Abfälle ist vernachlässigbar gering. Die Abfälle enthalten chemotoxische Inhaltsstoffe und nennenswerte Mengen gasbildender Stoffe (Metalle, organische Stoffe). Das in den Einlagerungskammern der Schachtanlage Asse II befindliche Inventar an chemischen und chemotoxischen Stoffen ist kammerspezifisch abgeschätzt worden, einschließlich der Bandbreiten /BUC 2006a/. Dagegen wurde das im Rahmen der Abfallbeseitigung des Bergbaubetriebs außerhalb der Einlagerungskammern verkippte Inventar an chemischen und chemotoxischen Stoffen bisher nicht erhoben. Die Gasbildung wird in Kapitel 6.1.4 diskutiert.

Das in der Schachtanlage Asse eingelagerte Radionuklidinventar wurde einschließlich der Bandbreiten kammerspezifisch erhoben /GSF 2002/[14]. Die Angaben beziehen sich – wegen des Zerfalls und radioaktiven Aufbaus von Zerfallsprodukten – auf einen bestimmten Zeitpunkt, hier den 01.01.2005. In Tab. 3 sind die Inventare ausgewählter Radionuklide für alle Einlagerungsbereiche zusammengestellt.

[14] Neue Erkenntnisse hinsichtlich einer Erhöhung des Plutoniuminventars auf 28 kg werden in zukünftigen Betrachtungen berücksichtigt und eine korrigierte Neubewertung des gesamten Abfallinventars nach umfassender Überprüfung durch das BfS erfolgen.

Tab. 3: Inventar ausgewählter Radionuklide und Gesamt-Aktivität in den Einlagerungsbereichen [Bq] (Bezugszeitpunkt 01.01.2005)

Radionuklid	LAW1A	LAW1B	LAW2	LAW3	LAW4	MAW
^{3}H	$1{,}81 \cdot 10^{10}$	$7{,}57 \cdot 10^{10}$	$1{,}50 \cdot 10^{11}$	$4{,}78 \cdot 10^{11}$	$5{,}55 \cdot 10^{10}$	$3{,}00 \cdot 10^{11}$
^{14}C	$7{,}60 \cdot 10^{10}$	$6{,}50 \cdot 10^{11}$	$8{,}41 \cdot 10^{11}$	$1{,}79 \cdot 10^{12}$	$2{,}76 \cdot 10^{11}$	$2{,}23 \cdot 10^{11}$
^{60}Co	$1{,}26 \cdot 10^{12}$	$9{,}08 \cdot 10^{11}$	$1{,}68 \cdot 10^{12}$	$1{,}62 \cdot 10^{14}$	$1{,}21 \cdot 10^{13}$	$1{,}33 \cdot 10^{14}$
^{90}Sr	$4{,}49 \cdot 10^{11}$	$4{,}09 \cdot 10^{12}$	$1{,}60 \cdot 10^{12}$	$6{,}78 \cdot 10^{13}$	$6{,}49 \cdot 10^{12}$	$6{,}63 \cdot 10^{14}$
^{137}Cs	$3{,}15 \cdot 10^{12}$	$4{,}68 \cdot 10^{12}$	$4{,}62 \cdot 10^{12}$	$2{,}98 \cdot 10^{14}$	$2{,}83 \cdot 10^{13}$	$1{,}94 \cdot 10^{14}$
^{241}Am	$3{,}53 \cdot 10^{12}$	$1{,}08 \cdot 10^{12}$	$2{,}21 \cdot 10^{12}$	$6{,}40 \cdot 10^{13}$	$2{,}48 \cdot 10^{13}$	$7{,}35 \cdot 10^{12}$
^{243}Am	$3{,}53 \cdot 10^{08}$	$6{,}85 \cdot 10^{07}$	$1{,}18 \cdot 10^{08}$	$3{,}72 \cdot 10^{10}$	$4{,}90 \cdot 10^{08}$	$3{,}97 \cdot 10^{10}$
^{244}Cm	$8{,}59 \cdot 10^{09}$	$1{,}58 \cdot 10^{09}$	$2{,}26 \cdot 10^{09}$	$7{,}75 \cdot 10^{11}$	$4{,}26 \cdot 10^{09}$	$9{,}60 \cdot 10^{11}$
^{226}Ra	$2{,}99 \cdot 10^{09}$	$9{,}67 \cdot 10^{10}$	$6{,}73 \cdot 10^{09}$	$2{,}64 \cdot 10^{10}$	$6{,}68 \cdot 10^{10}$	$1{,}79 \cdot 10^{02}$
^{232}Th	$1{,}30 \cdot 10^{10}$	$1{,}85 \cdot 10^{10}$	$2{,}02 \cdot 10^{11}$	$4{,}60 \cdot 10^{10}$	$7{,}39 \cdot 10^{10}$	$1{,}18 \cdot 10^{07}$
^{234}U	$1{,}11 \cdot 10^{11}$	$2{,}59 \cdot 10^{11}$	$5{,}93 \cdot 10^{11}$	$2{,}93 \cdot 10^{10}$	$3{,}30 \cdot 10^{11}$	$4{,}75 \cdot 10^{09}$
^{235}U	$4{,}62 \cdot 10^{09}$	$6{,}28 \cdot 10^{09}$	$2{,}59 \cdot 10^{10}$	$9{,}72 \cdot 10^{08}$	$1{,}46 \cdot 10^{10}$	$1{,}88 \cdot 10^{08}$
^{238}U	$9{,}73 \cdot 10^{10}$	$2{,}69 \cdot 10^{11}$	$5{,}70 \cdot 10^{11}$	$1{,}71 \cdot 10^{10}$	$3{,}08 \cdot 10^{11}$	$1{,}85 \cdot 10^{09}$
^{239}Pu	$5{,}28 \cdot 10^{11}$	$1{,}90 \cdot 10^{11}$	$4{,}87 \cdot 10^{11}$	$1{,}13 \cdot 10^{13}$	$5{,}85 \cdot 10^{12}$	$1{,}05 \cdot 10^{12}$
^{240}Pu	$6{,}80 \cdot 10^{11}$	$2{,}31 \cdot 10^{11}$	$5{,}25 \cdot 10^{11}$	$1{,}41 \cdot 10^{13}$	$5{,}82 \cdot 10^{12}$	$1{,}02 \cdot 10^{12}$
^{241}Pu	$3{,}53 \cdot 10^{13}$	$1{,}15 \cdot 10^{13}$	$2{,}14 \cdot 10^{13}$	$6{,}83 \cdot 10^{14}$	$2{,}06 \cdot 10^{14}$	$3{,}86 \cdot 10^{13}$
Gesamt-Aktivität[15]	$4{,}71 \cdot 10^{13}$	$2{,}50 \cdot 10^{13}$	$3{,}62 \cdot 10^{13}$	$1{,}35 \cdot 10^{15}$	$2{,}97 \cdot 10^{14}$	$1{,}14 \cdot 10^{15}$

Zur Veranschaulichung der zeitlichen Entwicklung des Inventars in den Einlagerungsbereichen wird in den folgenden Abb. 3 bis Abb. 5 der relative Radiotoxizitätsindex verwendet. Die Radiotoxizität ist ein Maß für die biologische Wirksamkeit der Strahlung eines Radionuklids und wird als Produkt aus dem Radionuklidinventar in [Bq] mit dem entsprechenden Dosiskoeffizienten für die Ingestion [Sv/Bq] gemäß /BMU 2001a/ berechnet. Der relative Index wird aus der aktuellen Radiotoxizität berechnet, bezogen auf die Radiotoxizität des Gesamtinventars zum Bezugszeitpunkt (01.01.2005), d.h. die Kurve für die Summe der Radiotoxizitäten beginnt bei dem Wert 1.

Die Radiotoxizität des Gesamtinventars wird sowohl für die LAW- als auch die MAW-Abfälle zu frühen Zeiten durch kurzlebige Radionuklide, wie Sr-90, Cs-137 oder Am-241 dominiert, die entweder Spalt- und Aktivierungsprodukte oder Actiniden sind. Bereits nach 100 Jahren wird die Radiotoxizität des eingelagerten Gesamtinventars jedoch nur noch durch Radionuklide der vier Actiniden-Zerfallsreihen, vor allem durch Am-241, Pu-240, Pu-239 und Pu-238 dominiert. Nach mehr als 10^5 Jahren dominieren die Tochternuklide der Uran-Radium-Zerfallsreihe, Pb-210 und Ra-226, die Radiotoxizität. Für die LAW-Abfälle ist dieses Verhalten wegen der größeren eingelagerten Mengen kernbrennstoffhaltiger Abfälle ausgeprägter als für die MAW.

[15] Summe der Aktivitäten der in /GSF 2002/ aufgeführten Radionuklide

Die Radiotoxizität der Abfälle in der MAW-Kammer beträgt zu frühen Zeiten ca. 15 % der Radiotoxizität des Gesamtinventars und nimmt zeitlich schneller ab als die Radiotoxizität der Abfälle in den LAW-Einlagerungsbereichen. Sie ist daher verglichen mit den anderen Abfällen – vor allem über lange Zeiträume – von geringerer Bedeutung, siehe Abb. 5.

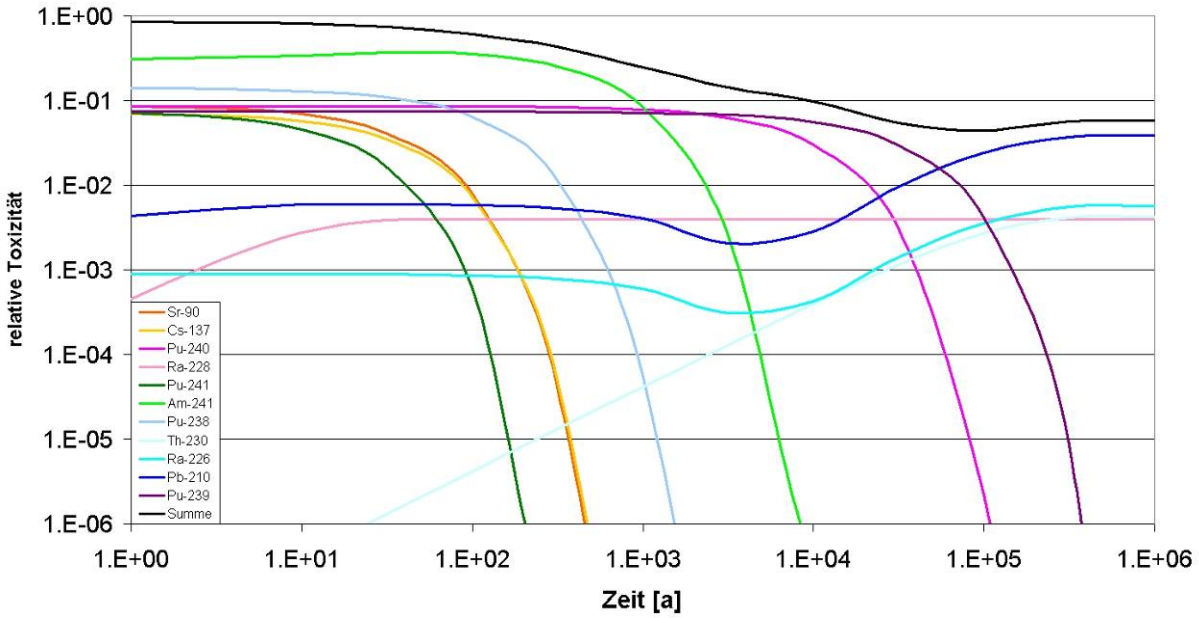

Abb. 3: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des LAW-Inventars

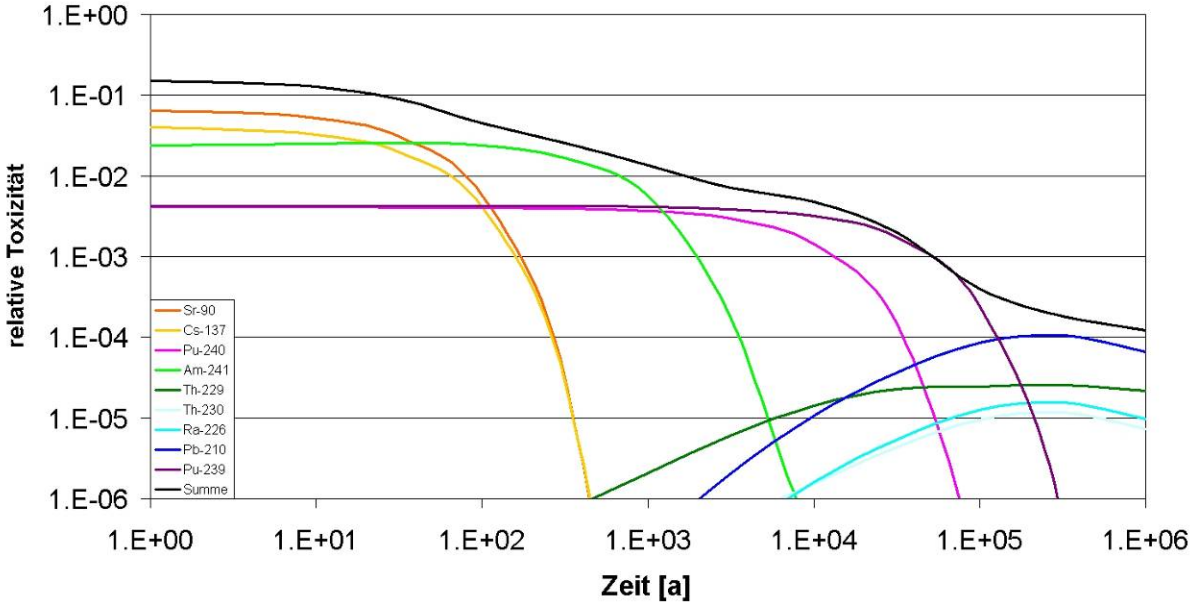

Abb. 4: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des MAW-Inventars

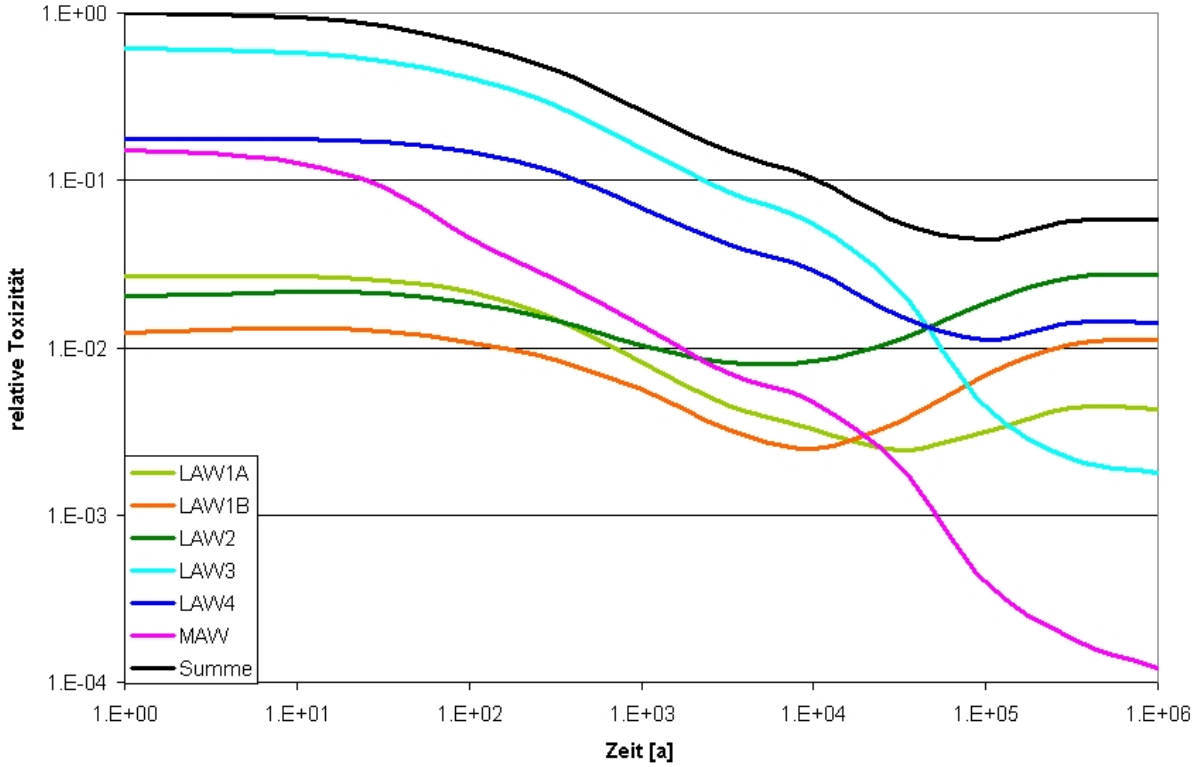

Abb. 5: Zeitliche Entwicklung der Radiotoxizität des Abfallinventars in den Einlagerungsbereichen

2.4 Durchgeführte Stilllegungsmaßnahmen und Vorsorgemaßnahmen

In diesem Kapitel werden die bereits durchgeführten Maßnahmen im Grubengebäude dargelegt und bewertet, die die im Sicherheitskonzept dargelegten Grundsätze, d. h. die Wirksamkeit der Stilllegungsoption „Vollverfüllung“ beeinflussen können. Dabei werden sowohl Auffahrungen bzw. Aufwältigungen von Grubenbauen als auch Verfüllmaßnahmen einbezogen. Diese Maßnahmen lassen sich untergliedern in

- bereits von HMGU durchgeführte Einzelmaßnahmen zur Stilllegung,
- durchgeführte Vorsorgemaßnahmen für den bestimmungsgemäßen Betrieb und die Störfallvorsorge sowie
- weitere vorgeschlagene Maßnahmen für den bestimmungsgemäßen Betrieb und die Störfallvorsorge.

2.4.1 Bereits von HMGU durchgeführte Einzelmaßnahmen zur Stilllegung

Im Rahmen der Schließung der Schachtanlage Asse II durch den ehemaligen Betreiber HMGU wurden bereits Baumaßnahmen im Grubengebäude durchgeführt, die im damaligen Schließungskonzept des HMGU /HMGU 2007/ verankert sind. Es handelt sich hierbei um

- die Auffahrung bzw. Aufwältigung von Grubenbauen für Maßnahmen zur Stilllegung,

- die Resthohlraumverfüllung im Tiefenaufschluss, auf der 775-m- und der 750-m-Sohle und
- den Einbau von Strömungsbarrieren auf der 775-m-, 750-m- und 725-m-Sohle.

Bei der Resthohlraumverfüllung im Tiefenaufschluss wurde damit begonnen, die offenen Hohlräume mit Salzgrus, Schotter und Sorelbeton nachzuverfüllen sowie den Porenraum mit einem Schutzfluid (R-Lösung) aufzufüllen. Die Resthohlraumverfüllungen und der Einbau von Strömungsbarrieren erfolgten überwiegend mit Sorelbeton.

Auswirkungen auf das Gesamtsystem durch neue Auffahrungen bzw. Aufwältigungen von Grubenbauen seit dem Jahr 2007 sind derzeit nicht erkennbar. Die bereits durchgeführten Maßnahmen beeinträchtigen das Stilllegungskonzept Vollverfüllung nicht und sind auch sicherheitsgerichtet, vgl. Kapitel 3.3 und Kapitel 4.

2.4.2 Durchgeführte Vorsorgemaßnahmen

Im Rahmen der Antragstellung für die Genehmigung des Umgangs mit radioaktiven Stoffen nach § 7 StrlSchV wurde der Betrieb der Schachtanlage Asse II einer Sicherheitsüberprüfung des bestimmungsgemäßen Betriebes sowie der Störfallvorsorge unterzogen. Die Sicherheitsüberprüfung des bestimmungsgemäßen Betriebes /IST 2009a/ stellt die vorhandene Vorsorge im bestimmungsgemäßen Betrieb der Anlage, einschließlich anomaler Betriebszustände, dar. Die Störfallvorsorge /IST 2009b/ beschreibt die in der Anlage vorhandene Störfallvorsorge im Hinblick auf den Stand von Wissenschaft und Technik. Diese Sicherheitsüberprüfung zeigt Defizite auf, welche durch Vorsorgemaßnahmen – u. a. im Grubengebäude – behoben werden können. Vorsorgemaßnahmen im Grubengebäude, die Defizite beheben, sind in /IST 2009b/ abgeleitet und deren Umsetzung empfohlen worden. Folgende Vorsorgemaßnahmen wurden bereits durchgeführt:

- Verfüllung des befahrbaren westlichen Zugangs der ELK 5/750 im Firstniveau von Abbau 3/750 und des parallelen Wetterbohrlochs mit Sorelbeton.
- Ertüchtigung des Verschlussbauwerks im nördlichen Zugang der ELK 4/750 von der 2. südlichen Richtstrecke nach Westen mit Sorelbeton.
- Abdeckung von freiliegenden Abfallgebinden in der ELK 7/725 mit Salzgrus.
- Verfestigung von unkontaminierten Salzlösungen zu Sorelbeton und das Einbringen in den Tiefenaufschluss.

Die Verfüllung mit Sorelbeton führt zur Stützung der Grubenbaue und zur Verringerung des konvergenzaktiven Volumens und ist konform mit dem Stilllegungskonzept Vollverfüllung. Die Vorsorgemaßnahme in der ELK 7/725 betrifft die geplante Nachverfüllung der ELK mit Brucitmörtel. Durch die Ab¬deckung der Gebinde mit Salzgrus wurde der verfügbare Resthohlraum für das Einbringen von Brucitmörtel reduziert. Dies kann sich nachteilig auf das geochemische Milieu der ELK in der Phase nach der Stilllegung auswirken, mit Konsequenzen für die Gasbildungsraten und die Löslichkeitsgrenzen einiger relevanter Radionuklide (vgl. Kapitel 6.1.3, 6.1.4 und 6.1.7).

2.4.3 Weitere vorgeschlagene Vorsorgemaßnahmen und Notfallkonzepte

Weitere Vorsorgemaßnahmen sind zwar in /IST 2009/ empfohlen, wurden jedoch noch nicht umgesetzt. Dies sind:

- die vollständige Verfüllung der noch unverfüllten Resthohlräume in der MAW-Kammer und in den LAW-Kammern 11/750 (oberer Bereich), 12/750, 2/750, 1/750, 5/750, 4/750 und 7/725 mit Brucitmörtel und/oder Sorelbeton.
- die vollständige Verfüllung des Wettergesenks oberhalb der ELK 10/750 und eines evtl. Firstspalts in der ELK mit Sorelbeton.
- das vollständige Fassen der Zutrittslösungen oberhalb der ELK 10/750 und 8/750 durch Drainagebohrungen und ergänzende Abdichtmaßnahmen,
- die vollständige Verfüllung der 2. südlichen Richtstrecke nach Westen und der Zugänge zu den ELK 8/750 und 10/750 mit Sorelbeton sowie
- die Verfüllung der Firstspalte im Baufeld in der Südflanke mit Sorelbeton.

Die vorgezogene Verfüllung der MAW-Kammer soll nach Aussage des BfS bevorzugt mit Sorelbeton und in den LAW-Kammern bevorzugt mit Brucitmörtel erfolgen. Die Vorsorgemaßnahmen sind in diesem Fall konform mit dem Stilllegungskonzept Vollverfüllung und sicherheitsgerichtet.

Die Auffüllung eines evtl. Firstspalts in der ELK 10/750 mit Sorelbeton – bei der Verfüllung des Wettergesenks in der Firste der ELK – führt zur Verringerung des konvergenzaktiven Volumens und zur Erhöhung des Puffervermögens in der ELK. Die Maßnahme beeinträchtigt das Stilllegungskonzept Vollverfüllung nicht und ist sicherheitsgerichtet.

Die Verfüllung der 2. südlichen Richtstrecke nach Westen und der Zugänge zu den ELK 4/750, 8/750 und 10/750 mit Sorelbeton ist konform mit dem Stilllegungskonzept Vollverfüllung, da nach Aussage des BfS hydraulische Anforderungen an dort geplanten Bauwerke gewährleistet werden.

Die Firstspaltverfüllung dient der Stabilisierung des Tragsystems der Schachtanlage Asse II im Bereich der Südflanke, weil durch das Verfüllen der noch verbliebenen Hohlräume mit Sorelbeton zum einen die Kontur der Grubenbaue stabilisiert wird und zum anderen der Salzgrusversatz wesentlich früher zum Lastabtrag beitragen kann. Die hierzu notwendigen Maßnahmen (Aufwältigung der Abbaubegleitstrecken, Bohrungen und Nachverfüllungen) beeinträchtigen das Stilllegungskonzept Vollverfüllung nicht und sind sicherheitsgerichtet, siehe auch Kapitel 2.5 und 3.3.

Des Weiteren werden Maßnahmen für den auslegungsüberschreitenden Lösungszutritt in das Grubengebäude vorgeschlagen. Hierbei handelt es sich um Notfallmaßnahmen, die für eine schnellstmögliche Schließung der Schachtanlage bei einem Anstieg der Zutrittsrate in das Grubengebäude vorbereitet und ggf. umgesetzt werden /BfS 2009c/. Bei Eintreten eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts in das Grubengebäude ist eine planmäßige Schließung der Schachtanlage gemäß dem Stilllegungskonzept Vollverfüllung nicht mehr möglich.

2.5 Standsicherheit

2.5.1 Bewertung der Baufelder und Identifizierung der wesentlichen gebirgsmechanischen Einwirkungen und Prozesse

Das Baufeld in der Südflanke im Leine-Steinsalz ist aufgrund seiner Größe für die gebirgsmechanischen Reaktionen des Gesamtsystems bestimmend. Bezogen auf den querschlägig zum Streichen des Asse-Sattels erfolgenden Lasteintrag aus dem Deckgebirge ergibt sich für dieses Baufeld eine gebirgsmechanisch wirksame Baufeldgröße von etwa 650 m · 275 m = 178 750 m^2.

Die Auffahrung des Baufeldes in der Südflanke erfolgte auf 13 Sohlen mit insgesamt 131 Abbaukammern. Meist sind auf einer Sohle in streichender Richtung 9 Abbaue nebeneinander angeordnet. Ein Abbau ist 60 m lang (streichend), 40 m breit (querschlägig) und 15 m hoch. Zwischen den Abbauen existieren mit Ausnahme des 20 m breiten Pfeilers zwischen den Abbaureihen 4 und 5 ausschließlich 12 m breite Pfeiler. Die Schweben zwischen den Abbauen in vertikaler Richtung wurden oberhalb der 700-m-Sohle mit etwa 6 m, zwischen der 700-m- und 725-m-Sohle mit ca. 8,5 m und zwischen der 725-m- und 750-m-Sohle mit etwa 15 m Mächtigkeit aufgefahren. Die Pfeiler und Schweben zwischen den Abbaukammern stellen die Tragelemente des Steinsalzbaufeldes dar. Das Haupttragelement ist der 20 m breite Zentralpfeiler zwischen den Abbaureihen 4 und 5. Die Tragelemente werden sowohl in querschlägiger als auch in vertikaler Richtung belastet, wobei die Hauptlast querschlägig zum Streichen des Asse-Sattels eingetragen wird. Bezüglich der Vertikallast ist aufgrund des steilen Einfallens des Abbaufeldes eine lastabtragende Gewölbewirkung zu berücksichtigen.

Das Tragverhalten des Pfeiler-Schweben-Systems an der Südflanke ist über das Tragfähigkeitsverhältnis zu bewerten. Das Tragfähigkeitsverhältnis ist definiert als das Verhältnis von Langzeittragfähigkeit zur Pfeilerbelastung. Die Langzeittragfähigkeit ist eine materialspezifische Belastbarkeitsgrenze, die auf standortspezifischen Untersuchungen basiert und für jedes Tragelement bzw. Tragsystem unter den gegebenen geometrischen Abmessungen ermittelt werden kann. Die Pfeilerbelastung lässt sich aus der querschlägigen Gebirgsspannungskomponente im Deckgebirge an der Südflanke und dem Lastfaktor für das Tragsystem errechnen oder steht aus In-situ-Messungen zum Spannungszustand zur Verfügung. Auf Basis dieses Vergleiches ergibt sich, dass in dem von 1916 bis 1964 aufgefahrenen Pfeiler-Schweben-System die Pfeilerbelastungen höher als die Langzeittragfähigkeiten waren. Das bedeutet, das Abbausystem wurde von vornherein mit nicht standsicheren Abmessungen aufgefahren. Derartige Tragsysteme werden als nachgiebig bezeichnet und reagieren mit Kriechverformungen, dilatanter Entfestigung sowie lokalen Bruchprozessen auf die eingetragene Gebirgsspannung. Von diesen Prozessen werden zunächst die Pfeiler- und Schwebenkonturen erfasst und die nicht mehr aufnehmbaren Spannungen müssen von den besser gestützten (höhere minimale Druckeinspannung) Kernzonen aufgenommen werden. Wenn infolge Entfestigung und lokaler Risse auch die Pfeiler- und Schwebenkerne an Tragfähigkeit verlieren, erfolgt ein weiterer Lastabtrag auf benachbarte Pfeiler und schließlich auf die Baufeldränder. Die über Jahrzehnte andauernden Spannungsumlagerungsprozesse sind sehr komplex und nur mit umfangreichen In-situ-Messungen (wie sie in der Grube seit den 1980er

Jahren installiert sind) in Verbindung mit gebirgsmechanischen Modellrechnungen nachzuweisen.

Die Pfeilerkonturabschalungen und Schwebenaufblätterungen wurden im Bergwerk schon in den 1960er Jahren beobachtet, aber damals als normal für den Salzbergbau und für das Systemtragverhalten als unbedenklich angesehen. Man ging davon aus, dass in der steilen Lagerung der Lastabtrag über das südlich und nördlich benachbarte Gebirge stattfindet, welches auch bei einem hohen Durchbauungsgrad in den Abbaufeldern stabil stehen bleibt. Tatsächlich konnte diese Stützwirkung des Gebirges am Standort Asse II nicht zum Tragen kommen, da die oberen Sohlen der Südflanke einen zu geringen Abstand zum südlichen Deckgebirge aufweisen. Die gering festen und stark geklüfteten Deckgebirgsschichten des Oberen Buntsandstein konnten die infolge der Nachgiebigkeit der Pfeiler und Schweben umverlagerten Spannungen nicht aufnehmen. Es kam auch dort zu Festigkeitsüberschreitungen mit nachfolgenden Rückwirkungen auf die Südflanke. Die in situ gemessenen Erhöhungen der Pfeilerstauchungsraten ab Mitte der 1980er Jahre sind auf diese Wechselwirkungen zurückzuführen. Gegenwärtig sind insbesondere im Bereich des horizontalen Verschiebungsmaximums der Südflanke die meisten Schweben vollständig durchgebrochen (es existieren nur noch äußere Schwebenringe) und die Pfeiler sind von einer Vielzahl von Rissen durchzogen. Das Tragsystem der Südflanke befindet sich in einem Grenzzustand der dilatanten Entfestigung mit Überzugswirkungen auf das unmittelbare Deckgebirge. Trotz der noch bestehenden Stützwirkung durch die Schwebenringe und der Versatzwirkung werden sich mit den weiteren Deckgebirgsverschiebungen die Bruchprozesse fortsetzen. Bei brechenden Schwebenringen könnte sich der Resttragwiderstand entscheidend verringern.

Das südliche Deckgebirge besitzt zumindest lokal in unmittelbarer Nähe zum Bergwerk entsprechend der ingenieurgeologischen Befunde einen hohen Zerlegungsgrad. Infolge der triaxialen Einspannung im Gebirge waren die Trennflächen zusammengepresst (überwiegend auch mineralisiert) und der effektive hydraulisch zugängliche Porenraum in den Trennflächen ist gering. Gemäß den hydraulischen Modellannahmen wird von einer Sättigung der interkonnektiven Transportpfade in den Trennflächen und Porenräumen in der Gesteinsmatrix mit Deckgebirgslösung ausgegangen. Da mit dem nachlassenden Tragwiderstand im Abbausystem der Südflanke durch Kriechbrüche und Entfestigung ein zusätzlicher Lastabtrag auf das unmittelbare Deckgebirge verbunden ist, muss bzgl. der Entwicklung in der Vergangenheit und auch Gegenwart bei der geringen Gebirgsfestigkeit von einer schrittweisen Öffnung der geschlossenen und mineralisierten Trennflächen und damit einer Erhöhung des effektiven Porenraumes ausgegangen werden. Mit steigendem effektiven Zerlegungsgrad erhöhen sich die resultierenden hydraulischen Kraftwirkungen und damit die hydraulisch bedingte mechanische Beanspruchung des Gebirges. Es kommt zur weiteren Öffnung ursprünglich nur angelegter und noch geschlossener Klüfte, teilweise auch zur Neubildung von Rissen, und damit insgesamt zu einer Verringerung des Zusammenhaltes und der Eigentragfähigkeit der Deckgebirgsschichten. Bezüglich der gemessenen querschlägigen Pfeilerstauchungsraten führt die hohe Deckgebirgsmobilität zu einem Verschiebungsanteil aus südlicher Richtung von etwa 90 %. Es existiert ein komplexes Tragsystem des Abbaufeldes an der Südflanke und unmittelbaren Deckgebirges mit gebirgsmechanischen Wechselwirkungen. Das südliche Deckgebirge wird sich, solange die Pfeilerstauchungen anhalten, weiter in

Richtung des Baufeldes bewegen, die Ausbildung eines tragfähigen Gewölbes ist nicht abzuleiten.

Infolge des geringen Abstandes zum Deckgebirge und der langen offenen Standzeit kam es im Bereich der oberen Abbaukammern in der Steinsalzbarriere zu einem Verlust der Barrierenintegrität (Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere, vgl. Kapitel 2.1.5 und 2.2.1). Mit dem vernetzten Risssystem ist für den seit 1988 beobachteten Salzlösungszutritt ein Fließweg vom Rötanhydrit zum Grubengebäude erklärbar. Als Penetrationspfade wirken dabei gebirgsmechanisch entstandene Scherflächen (Scherbänder), die sich am primär vorhandenen Trennflächengefüge orientieren können, oder Trennflächen mit geringen Festigkeiten bzw. leicht löslichem Mineralbestand. Das bedeutet, dass die Salzlösung aus dem Rötanhydrit bevorzugt über die geogen vorhandenen Gefügeelemente oder bergbauinduzierte Rissflächen dem Grubengebäude zutritt. In den gebirgsmechanischen Modellrechnungen werden solche bergbauinduzierten Festigkeitsüberschreitungen, die mit einem Verlust der Barrierenintegrität verbunden sind, im Bereich der abbaubedingten starken Reduzierung der Steinsalzschutzschicht gegenüber dem Deckgebirge nachgewiesen. Auf Grund des hohen Durchbauungsgrades an der Südflanke verbinden sich die durch den dilatanten Verformungsprozess entstandenen aufgelockerten Bereiche um die einzelnen Abbaue zu einer zusammenhängenden Auflockerungszone. Die Salzlösung penetriert entsprechend eines hydraulischen Druckgefälles entlang von Trenn- und Bruchflächen in der Auflockerungszone bis in die Grubenbaue. Bevorzugte vertikale Fließbahnen existieren dabei entlang einer Abbaureihe. Durch die weiterhin ablaufenden dilatanten Verformungen im Gesamtsystem verlagern sich die Austrittsstellen im Grubengebäude auf tiefere Sohlen, können jedoch infolge von Gebirgsspannungsumverlagerungen auch wieder in vormals trocken gefallenen Rissinventaren liegen.

Der ablaufende Entfestigungsprozess der Tragelemente im Oberen Baufeld in der Südflanke erforderte aus gebirgsmechanischer Sicht eine vollständige Verfüllung aller offenen Abbaue. In den 1980er Jahren wurde Eigenversatz eingebracht, welcher bei der Auffahrung des Tiefenaufschlusses anfiel. Ab 1995 erfolgte die Einbringung von Fremdversatz (aus bergbausicherheitlichen Gründen mit einer pneumatischen Förderung). Diese Arbeiten waren Anfang des Jahres 2004 in allen Abbauen, bis auf wenige Ausnahmen zur Aufnahme der Infrastruktur, abgeschlossen. Etwa drei Viertel der Abbaue sind mit Fremdversatz und ein Viertel mit Eigenversatz gefüllt. Bis zum Jahr 2005 konnte mittels der Versatzdruckmessungen noch kein aktiver Stützdruck nachgewiesen werden. Jedoch kam es durch das Eigengewicht zu einer Verdämmung der Pfeilerkonturen, die der Pfeilerquerdehnung entgegenwirkte. Die Stützwirkung war mittels der degressiven Tendenz der Pfeilerstauchungsraten sowie der abnehmenden mikroseismischen Aktivität im Grubengebäude nachweisbar. Ab 2006 zeigen die Versatzdruckmessungen langsam steigende Drücke, sodass sich anhand der weiter degressiven Pfeilerstauchungsraten eine zunehmende Stützwirkung bemerkbar macht. Infolge der Versatzsackung existieren in den meisten Abbauen freie Firstspalte mit einer mittleren Höhe von 0,3 m, die im Rahmen der Firstspaltverfüllung mit Sorelbeton gefüllt werden sollen (vgl. Kapitel 2.4). Dadurch wird der gebirgsmechanisch positive Versatzdruckaufbau unterstützt.

Das Carnallitit-Baufeld an der Nordflanke des Asse-Sattels mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 1 Mio. m³ wurde in den Jahren 1909 bis 1925 aufgefahren. Der Abbau erfolgte von unten nach oben in einem Teilsohlenabbau mit firstartigem Verhieb ohne Schweben. Die Pfeiler mit einer streichenden Breite von 10 m standen im Bereich der jeweiligen Teilsohle mit einer Höhe von maximal 7,5 m etwa zwei Jahre frei, bevor Aufbereitungsrückstände aus der Fabrik (vorwiegend Steinsalz mit Fremdeinlagerungen, z. B. Fabrikasche, Baumaterialien) als Versatz eingebracht wurden. Dieser Versatz (Altversatz) bildete die Sohle für die Auffahrung der nächsthöheren Teilsohle. Insgesamt wurden die fünf Teilsohlen A bis E bis zu einer maximalen Pfeilerhöhe von 40 m aufgefahren. Die oberste E-Sohle blieb in den meisten Kammern bis zur Gegenwart unversetzt und wurde erst in den letzten Jahren mit Steinsalzgrus verfüllt. Die 25 Kammern sind 20 m breit und wurden bis zur nördlichen Schichtgrenze zum Leine-Steinsalz mit querschlägigen Längen von 25 m bis 120 m gebaut. Das gesamte Carnallitit-Baufeld ist in streichender Richtung etwa 800 m lang.

Aus In-situ-Messungen und Modellrechnungen lässt sich ein überwiegender Entfestigungszustand im Carnallitit-Baufeld ableiten. Die größtenteils von Rissen durchzogenen Pfeiler sind vollständig im Versatz eingebettet und können sich nicht sprödbruchartig in die Kammern hinein bewegen. Infolge der Risszonen in den Carnallititpfeilern ist in streichender und querschlägiger Richtung von nur geringen Strömungswiderständen gegenüber Salzlösungen auszugehen. Im Hangenden des Carnallitit-Baufeldes ist eine domartige Entspannungszone mit singulären Rissen nachgewiesen, die vermutlich bis zur Schichtgrenze zum Leine-Steinsalz reicht. Das sich darüber durch Spannungsumlagerung gebildete Traggewölbe stützt sich auf den Baufeldrändern ab.

Die Abbaue im Sattelkern im Staßfurt-Steinsalz sind teilweise mit Eigenversatz gefüllt bzw. wurden mit Sorelbeton nachverfüllt. Weitere Hohlraumverfüllungen mit Sorelbeton sind im Rahmen der Stilllegungsmaßnahmen geplant (siehe Kapitel 4.5).

Alle drei Baufelder werden in den gebirgsmechanischen Rechenmodellen berücksichtigt. Die Dominanz der Wechselwirkungen zwischen dem Baufeld in der Südflanke und dem südlichen Deckgebirge im Vergleich zu eventuellen Überzugswirkungen aus dem Carnallitit-Baufeld hat sich bereits in der Vergangenheit gezeigt: Die Beschleunigung der Deckgebirgsverschiebungsraten Mitte der 1980er Jahre ist im Ergebnis der bisherigen Untersuchungen eindeutig auf die gebirgsmechanischen Prozesse an der Südflanke zurückzuführen. Das Carnallitit-Baufeld war zu diesem Zeitpunkt überwiegend versetzt und gebirgsmechanisch inaktiv.

Der Tiefenaufschluss umfasst alle Grubenbaue unterhalb der 775-m-Sohle und besitzt ca. 240 000 m^3 Ausbruchsvolumen. Er hat aufgrund seines sehr geringen Durchbauungsgrades (einzelne Strecken bzw. Streckenerweiterungen) gebirgsmechanisch für das Gesamttragsystem eine untergeordnete Bedeutung.

2.5.2 Einschätzung der gegenwärtigen Situation

Die Bewertung der Daten der Standortüberwachung führt bzgl. der Pfeilerstauchungsraten zu dem Ergebnis, dass ab Ende der 1990er Jahre eine allgemein degressive Tendenz infol-

ge der Versatzmaßnahme (1995 bis 2004) existiert. Temporäre Anstiege der Raten an einigen Messstellen im oberen Bereich der Südflanke und an den östlichen und westlichen Baufeldrändern deuten auf eine zunehmende Nachgiebigkeit im Zentrum der Südflanke infolge von Bruchprozessen und eine Spannungsumverlagerung auf die Baufeldränder hin. Auch die Spannungsmonitorstationen zeigen zunehmende Rissbildungen insbesondere in der querschlägigen Pfeilermitte. Die hoch belasteten Tragelemente werden in den nächsten Jahren durch Bruchprozesse zunehmend der Beanspruchung ausweichen, die von benachbarten Bereichen aufgenommen werden muss. Wenn man davon ausgeht, dass die Spannungsmonitorstationen nur einen „begrenzten Einblick“ in den gebirgsmechanischen Zustand der Pfeiler gestatten und meist im Bereich der noch stützenden Schwebenringe installiert sind (in halber Kammerhöhe ist die Entfestigung noch stärker), sind keine Reserven im Tragsystem der Südflanke mehr ableitbar. Eine gebirgsmechanisch positive Wirkung geht dagegen von den sich langsam erhöhenden Versatzdrücken aus, die seit dem Jahr 2005 bzw. 2006 an nahezu allen Druckgebern angezeigt werden. Diese Stützwirkung ist entscheidend für den Erhalt der Resttragfähigkeit der Pfeiler.

Mittels der mikroseismischen Überwachung wurden im Messzeitraum 10/2007 bis 09/2008 erstmalig Ereignisse in der Verlängerung der streichenden Störung S2a in der Steinsalzbarriere nachgewiesen. Hier ist zu besorgen, dass sich Mikrorisse in der Steinsalzbarriere in Richtung der 700-m-Sohle zu Makrorissen vereinigen und zu hydraulischen Konsequenzen (Anschluss des hydraulisch leitfähigen Muschelkalk über die Störung S2a) führen. Die Ergebnisse von Modellrechnungen in Abb. 6 weisen für diesen unteren Auflagerbereich des südlichen Deckgebirges erhöhte Scherspannungen aus. Diese Entwicklung soll durch eine möglichst weitgehende Resthohlraumverfüllung an der Südflanke abgeschwächt werden. Diese Verfüllung wird vor allem die offenen (konvergenzaktiven) Bereiche unter den Firsten und an den Stößen in den Abbauen, siehe auch Firstspaltverfüllung (Kapitel 2.4), sowie die noch offenen Bereiche nicht mehr benötigter Abbaubegleitstrecken und Zugangsstrecken zu den Abbauen und Blindschächte umfassen.

Befahrungsbefunde auf den Sohlen im Teufenniveau 700 m bis 750 m zeigen, dass die am oberen Baufeldrand der Südflanke zutretende Deckgebirgslösung bis zur Gegenwart eine weit reichende Befeuchtung verursacht hat. Damit ist eine weitere gebirgsmechanisch relevante Einwirkung vorhanden, die bei der Bewertung des gebirgsmechanischen Zustands zu berücksichtigen ist. Die gebirgsmechanischen Zustandsanalysen und Prognosen sind unter diesen Einwirkungen fortlaufend auf Basis der Daten der Standortüberwachung zu überprüfen und ggf. anzupassen. Die Prognosen stehen unter dem Vorbehalt, dass sich die System- und Randbedingungen nicht ändern. Die größten Besorgnisse beziehen sich dabei auf die nicht auszuschließende Zunahme der Deckgebirgslösungszutritte bei Anschluss von hydraulisch leitfähigeren Gebirgsschichten als bisher, der Ausbildung von weiteren Zutrittsorten im Grubengebäude und der Abnahme der bisherigen Sättigung an Steinsalz.

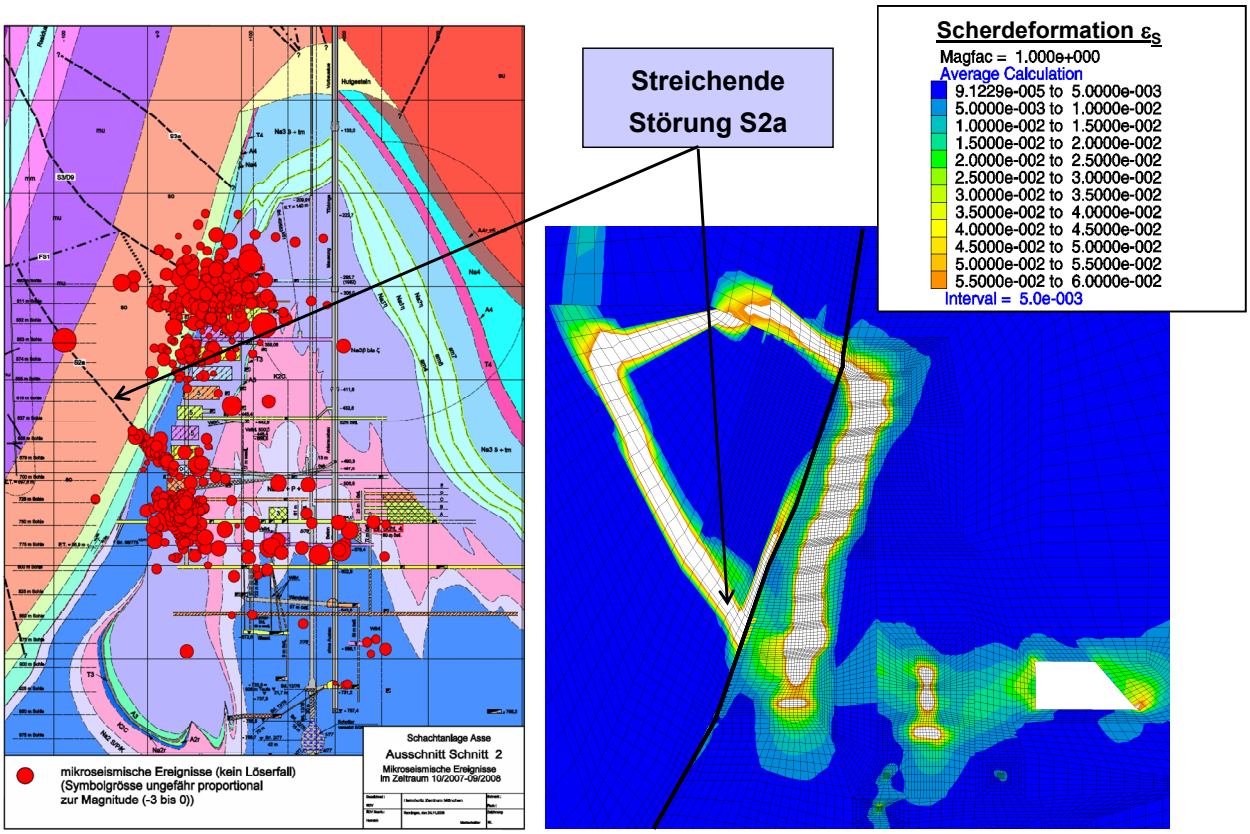

Abb. 6: Mikroseismik Asse im Zeitraum 10/2007 bis 9/2008 (links) und für die Gegenwart berechnete Scherdeformationen (rechts) im Schnitt 2, aus /IfG 2009/

Die Scherdeformationen und ausgewiesenen Entfestigungen im südlichen Deckgebirge lassen ein weiteres Aufreißen von Schwächeflächen bis in den Unteren Muschelkalk hinein besorgen. Ohne Stabilisierungsmaßnahmen ist die Entstehung von weiteren Wegsamkeiten mit möglichen Konsequenzen auf den Lösungszutritt nicht auszuschließen (vgl. Kapitel 2.6). Die zum Teil sehr großen plastischen Scherdeformationen an den vorgegebenen Großklüften im Deckgebirge, aber auch an den Feldesrändern, weisen auf eine Mobilität des Deckgebirges hin, die sich vor allem auf die Querklüfte und die Baufeldränder konzentriert. Von erheblicher gebirgsmechanischer Relevanz sind weiterhin die plastischen Scherdeformationen in der Steinsalzbarriere, die sich in Fortsetzung der Querstörungen sowie durch die Scherbeanspruchung an den Feldesrändern ausbilden.

2.6 Zutritt von Lösungen in die Schachtanlage

Seit Beginn der Errichtung des Schachtes Asse 2 im Jahr 1906 wurden in der Schachtanlage Zutritte von Salzlösungen unterschiedlicher Menge und Herkunft beobachtet.

Die Zutritte von Salzlösung in der Südflanke und entlang Bohrungen vor 1988 versiegten jeweils relativ schnell, und/oder die Zutrittsstellen wurden mit Magnesiamörtel abgedichtet. Das schnelle Versiegen und die chemischen Zusammensetzungen der Zutritte ließen darauf schließen, dass diese aus isolierten Reservoiren in der Salzformation stammten oder früher versickerte Betriebslösungen waren. Die Reservoire stellten geschlossene Systeme ohne hydraulisch wirksame Verbindungen zum Deckgebirge dar. Aus diesen Gründen sind die

historischen Salzlösungs- und Gaszutritte für die Beschreibung der Stilllegungsoption Vollverfüllung nicht von Bedeutung.

Dagegen ist der gegenwärtige Salzlösungszutritt von ca. 12 m^3 pro Tag im Oberen Baufeld in der Südflanke von Bedeutung für die Analyse des Gesamtsystems und die Bewertung der Stilllegungsoption, da dieser als Lösungszutritt aus dem Deckgebirge interpretiert wird (siehe unten). Die erste Zutrittsstelle wurde 1988 in der Abbaureihe 5 auf der 532-m-Sohle beobachtet. Im Zuge der Verfüllung des Oberen Baufelds in der Südflanke mit Ronnenbergversatz wurden Zutrittsstellen in den Abbaureihen 2, 3 und 4 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. Die heutigen Zutrittsstellen in das Grubengebäude sind sekundär und liegen in größeren Teufen des Baufeldes. Die zutretende Salzlösung bewegt sich unter dem Einfluss der Gravitation von den primären Zutrittsstellen durch das aufgelockerte Gebirge nahe der Kontur der Grubenbaue oder durch bereits verfüllte Grubenbaue zu den sekundären Zutrittsstellen. Die in das Grubengebäude zutretende Lösung wird heute im Abbau 3 der 658-m-Sohle (ca. 10,5 m^3/Tag), auf der 725-m-Sohle in einer zu diesem Zweck neu aufgefahrenen Richtstrecke entlang des nördlichen Stoßes der Abbaue 1 bis 4 (ca. 1 m^3/Tag) sowie auf der 750-m-Sohle am nordwestlichen und nordöstlichen Kammereingang von Abbau 9/750 (ca. 40 Liter/Tag) aufgefangen.

Die zeitliche Entwicklung der Auffangrate von Lösung im Oberen Baufeld in der Südflanke zeigt einen stufenweisen Anstieg. Ursache für den stufenweisen Anstieg des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge sind mit großer Wahrscheinlichkeit fortschreitende bergbaubedingte Aufweitungen im Bereich der Zutrittspfade, welche zunehmend neue hydraulische Kontakte mit lösungsführenden Wegsamkeiten bewirkten.

Zu Beginn des Lösungszutritts veränderte sich dessen chemische Zusammensetzung: Die NaCl-Konzentration nahm stetig zu, die $MgCl_2$-Konzentration kontinuierlich ab. Ab 1994 war diese anfängliche Tendenz dann nur noch sehr schwach ausgeprägt. Seit 1996 ist die chemische Zusammensetzung der aufgefangenen Lösungen weitgehend konstant. Die Lösungen sind an NaCl (Steinsalz) und $CaSO_4$ (Anhydrit) gesättigt sowie an $MgCl_2$ und $MgSO_4$ untersättigt. In Kontakt mit Kalisalz, insbesondere auch mit Carnallitit, bewirken sie Umlösungsprozesse.

Bezüglich der Herkunft wird aus den durchgeführten geologischen, hydrogeologischen, gebirgsmechanischen, geophysikalischen und geochemischen Untersuchungen abgeleitet, dass die Salzlösungen aus dem Deckgebirge stammen und mit grundwasserführenden Schichten in Verbindung standen. So belegt z.B. das Verhältnis der Strontium-Isotope in den aufgefangenen Lösungen, dass diese mit den Gesteinen des Röt in Kontakt gewesen sind und dass keine relevanten Zuströme aus dem Zechstein erfolgen.

Die Synthese der Ergebnisse aus den durchgeführten Untersuchungen führt zu einem in sich geschlossenen konzeptuellen Modell für die Herkunft und Fließpfade des heutigen Salzlösungszutritts. Dieses ist in /GSF 2006a/ dargestellt und begründet. Die für die Betriebs- und die Langzeitsicherheit wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der Lösungszutritt erfolgt vollumfänglich durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (vgl. Kapitel 2.1.5, 2.2.1 und 2.5) zwischen der 511-m-Sohle[16] und der 574-m-Sohle (evtl. 595-m-Sohle) aus dem Deckgebirge. Ein Zutrittspfad aus dem verstürzten Deckgebirge durch das Hutgestein und entlang der Anhydritmittel durch das Salzgebirge direkt in die Auflockerungszone des Grubengebäudes ist auszuschließen /HMGU 2007/.
- Der nach Einschätzung von HMGU mengenmäßig wichtigste Fließpfad im Deckgebirge verläuft aus dem Unteren Muschelkalk über den als Folge der Bergbautätigkeit entstandenen Scherdeformationsbereich S3/D9 (vgl. Kapitel 2.1.4) durch den Rötaquitard (*so2-so4*) in den Rötanhydrit und weiter zur desintegrierten Zone der Steinsalz-Barriere. Ein geringer Anteil des Lösungszutritts durch den Rötaquitard kann auch entlang von Störungszonen oder durch die dazwischen liegenden Bereiche des Rötaquitards erfolgen.
- Ein weiterer Fließpfad – mengenmäßig von geringerer Bedeutung – verläuft aus dem verstürzten Deckgebirge (direkt oder durch das Hutgestein) in den Rötanhydrit und entlang diesem zur Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere /HMGU 2007/.
- Ein dritter Fließpfad ist hypothetisch und beruht auf der Möglichkeit, dass die Anhydritmittel sowohl am Salzspiegel als auch an der Südflanke der Salzstruktur ausstreichen und eine durchgehende hydraulische Wegsamkeit darstellen. In diesem Fall besteht ein Fließpfad aus dem verstürzten Deckgebirge durch das Hutgestein zum Salzspiegel, von dort entlang der Anhydritmittel in den Rötanhydrit in der Südflanke und entlang diesem bis zur Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere. Die Existenz dieses Fließpfads kann mit untertägiger Erkundung weder schlüssig bewiesen noch ausgeschlossen werden. Im vorliegenden Bericht wird die Existenz dieses Pfades deshalb unterstellt.

Von Bedeutung für die Bewertung der Stilllegungsoptionen sind die Gebirgsbereiche, die die Rate des Lösungsflusses entlang der Fließpfade bestimmen. Diese Bereiche werden als Drossel bezeichnet.

Aus der zeitlichen Entwicklung der Lösungszutritts seit 1988 folgt nach Ansicht der Autoren, dass die Rate des Lösungszutritts zunächst sowohl durch die steigende Vernetzung der hydraulischen Wegsamkeiten im Rötanhydrit und in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere, als auch durch die ansteigende hydraulische Durchlässigkeit des Scherdeformationsbereichs S3/D9 bestimmt war. Da die Zutrittsrate in den letzten Jahren trotz fortschreitender Verformung in der Südflanke nicht mehr nennenswerte Sprünge zeigte, kann für den heutigen Zustand eine wirksame Drosselung des Lösungszutritts in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere und dem angrenzenden Rötanhydrit ausgeschlossen werden. Nach Ansicht der Autoren sind die heute wirksamen Drosseln des Fließpfades durch den Rötaquitard (*so2-so4*) der Scherdeformationsbereich S3/D9, insbesondere dessen weniger gestörter Bereich im Süden (*so4*), sowie die alternativen hydraulischen Wegsamkeiten durch den Rötaquitard, speziell die Störungszonen. Für die beiden anderen Fließpfade des Lösungszutritts wirkt nach Ansicht der Autoren der Rötanhydrit oberhalb der bergbaubedingt beanspruchten Zone als Drossel, für den Pfad entlang der Anhydritmittel zusätzlich deren Permeabilität und der begrenzte Fließquerschnitt.

[16] evtl. der 490-m-Sohle

3. Beschreibung des Stilllegungskonzepts

3.1 Charakterisierung des Stilllegungskonzepts

Das Stilllegungskonzept Vollverfüllung unterscheidet sich von den anderen, vom BfS in Betracht gezogenen Stilllegungsoptionen dadurch, dass die Abfälle an den Orten verbleiben, an denen sie eingelagert wurden und sich heute befinden. Das Konzept beinhaltet damit kein Handhaben von radioaktiven Abfällen.

Die Erarbeitung und Umsetzung des Stilllegungskonzepts kann nicht in einer Weise erfolgen, die nach dem Stand von Wissenschaft und Technik bei der Schließung eines Endlagers angewendet wird. Nach heutiger, international anerkannter Praxis („good practice“) werden die Anforderungen hinsichtlich der späteren Stilllegung bereits frühzeitig, bei der Endlagerplanung und -auslegung einbezogen. Dieser Einbezug erfolgte bei der Nutzung der Schachtanlage Asse II, bei welcher radioaktive Abfälle eingelagert wurden, nicht. Zudem erfüllen der Standort und das Grubengebäude nicht die Anforderungen, die heute an ein neu zu errichtendes Endlager gestellt werden. Die Bedingungen am Standort der Schachtanlage Asse II für deren Stilllegung sind heute gegeben. Wie jede andere Stilllegungsoption muss auch die Stilllegungsoption Vollverfüllung die gegebenen Bedingungen berücksichtigen und in deren Rahmen ein Vorgehen und ein Maßnahmenpaket beschreiben, mit dem die Schachtanlage mit möglichst hoher betrieblicher Sicherheit in einen Zustand mit möglichst hoher Langzeitsicherheit überführt werden kann. Dieser Punkt wird hervorgehoben, da nach Ansicht der Autoren eine Bewertung der Stilllegungsoption Vollverfüllung anhand der Sicherheitsanforderungen gemäß Stand von Wissenschaft und Technik an ein neu zu errichtendes Endlager ohne Würdigung der gegebenen Bedingungen aus technischer Sicht unverhältnismäßig wäre.

Das Stilllegungskonzept ist auf die Prozesse auszurichten, die möglicherweise einen Transport von Radionukliden aus dem Abfall in die Umwelt bewirken oder einen solchen Transport beeinflussen. Diese potentiell relevanten Prozesse sind[17]

- die Konvergenz der Grubenbaue und dadurch die Abnahme des fluidzugänglichen Volumens in den Grubenbauen, die Verformungen in der Salzstruktur und im angrenzenden Deckgebirge und evtl. die Entstehung von neuen Wegsamkeiten im Salzgebirge und im Deckgebirge durch gebirgsmechanische Überbeanspruchung,
- der Lösungszutritt aus dem Deckgebirge durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Grubengebäude,
- die Umlösung von zugetretener Deckgebirgslösung an anstehendem Carnillitit, die Lösung von Steinsalz beim Zutritt von untersättigter Deckgebirgslösung,
- die Gasbildung in den Einlagerungskammern und im übrigen Grubengebäude durch Korrosion von Metallen und mikrobielle Degradation von organischen Stoffen,
- die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen mit Übertritt von Radionukliden in Lösung und in die Gasphase,

[17] Eine ausführlichere Aufzählung enthält Kapitel 6.1.

- der dichtebedingte Aufstieg der gebildeten Gase gegen das Grubenhöchste,
- die Bewegung von Lösung im Grubengebäude durch Verdrängung (Konvergenz, lokale Ansammlung von Gas),
- das Austreten von Gas und Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge (teilweise mit volatilen bzw. gelösten Radionukliden) und
- die Ausbreitung von radionuklidhaltigem Gas und radionuklidhaltiger Lösung im Deckgebirge bis zur Geländeoberfläche.

Die für das Stilllegungskonzept wichtigsten und in Kapitel 2 dargelegten Sachverhalte am Standort sind nachfolgend nochmals kurz aufgeführt. Sie bildeten den Ausgangspunkt für die Entwicklung des Stilllegungskonzepts.

1. Die zur Mineralgewinnung angelegten Abbaue im Leine-Steinsalz liegen in unmittelbarer Nähe zum südlichen Rand der Salzstruktur. Die Mächtigkeit der Steinsalz-Barriere zum Rötanhydrit beträgt auf den Sohlen oberhalb 595 m Teufe nur wenige Meter. Das Grubengebäude ist durch einen hohen Durchbauungsgrad gekennzeichnet. Das Tragsystem der Pfeiler und Schweben wurde mit Abmessungen gebaut, die in Verbindung mit der langen unverfüllten Standzeit der Abbaue zu einem nachgiebigen Tragverhalten mit begrenzter Tragfähigkeit geführt haben.
2. Im Oberen Baufeld in der Südflanke sind die Schweben zum Teil gebrochen oder bereits gefallen, und die Pfeiler befinden sich überwiegend im Bereich der Resttragfähigkeit. Der Lastabtrag erfolgt zunehmend über die Ränder des Baufeldes und über das Deckgebirge an der Südflanke, das seinerseits mit Scherdeformationen und Dilatanz auf die Umlagerung der Gebirgsspannung reagiert. Die Deformationen halten an.
3. Infolge der Versatzmaßnahme 1995 bis 2004 baut sich gegenwärtig ein zunehmender Stützdruck auf, der mittels der Versatzdruckmessungen, degressiven Pfeilerstauchungsraten und der nachlassenden Mikroseismizität im Bereich der Südflanke nachweisbar ist. Dieser Stützdruckaufbau wird unterstützt durch die Firstspaltverfüllung in den Abbauen der Südflanke (vgl. Kapitel 2.4.2).
4. Trotzdem werden sich mit den weiteren Deckgebirgsverschiebungen die Schädigungen im Tragsystem und im Deckgebirge fortsetzen. Die zusätzlich destabilisierende Wirkung der sich auf den tieferen Sohlen ausbreitenden Deckgebirgslösung ist Gegenstand gegenwärtig laufender Untersuchungen zur Resttragfähigkeit unter diesem Einfluss.
5. Aufgrund der stattgefundenen bergbaubedingten Deformationen in der Südflanke ist die Steinsalz-Barriere zwischen den Abbauen und dem Rötanhydrit in Bereichen oberhalb der Teufe von 574 m (evtl. 595 m) nicht mehr intakt (Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere).
6. In das Grubengebäude tritt seit 1988 eine an NaCl und Anhydrit gesättigte Salzlösung zu. Die Zutrittsrate ist seit 1998 weitgehend konstant; die täglich gefasste Menge beträgt zurzeit rund 12 m^3. Der genaue Weg der Salzlösung in das Grubengebäude ist nicht bekannt und kann auch nicht ermittelt werden. Da die Steinsalz-Barriere im Bereich der oberen Sohlen gebirgsmechanisch beansprucht ist, muss der gesamte aufgelockerte Bereich der Steinsalz-Barriere in der Südflanke als potentieller Migrationspfad

angenommen werden. Die künftige Entwicklung der Lösungszutrittsrate ist nicht prognostizierbar.

7. Die zutretende Deckgebirgslösung steht mit dem im Grubengebäude an vielen Stellen aufgeschlossenen Carnallitit des Kaliflözes Staßfurt nicht im Gleichgewicht und vermag daher, diesen bei Kontakt zu zersetzen. Dabei entsteht zusätzliches konvergenzaktives Hohlraumvolumen. Bei einem lang anhaltenden Lösungszutritt (ohne Ableitung der zutretenden Lösung oder andere technische Maßnahmen) können langfristig erhebliche zusätzliche Hohlraumvolumen entstehen, deren Auswirkungen auf die Verformungen im Grubengebäude und im Deckgebirge und die dadurch entstehenden Verhältnisse schwierig zu prognostizieren wären.
8. Infolge des relativ hohen Durchbauungsgrades im Grubengebäude – auch im Bereich der Einlagerungskammern – können die potenziellen Wegsamkeiten für zugetretene Lösung zu den Abfällen nicht im Detail ermittelt werden.

Für die Stilllegungsoption Vollverfüllung wird basierend auf diesen Gegebenheiten abgeleitet, dass

- ein vollständiger, trockener Einschluss der Abfälle im Salz (Trockenverwahrung) nicht möglich ist und das Stilllegungskonzept deshalb auf dem Konzept der Nassverwahrung beruhen soll,
- ein Übertritt von Schadstoffen aus den Abfällen durch das Grubengebäude in das Deckgebirge nicht ausgeschlossen werden kann,
- das Deckgebirge keine allseits geringdurchlässige Barriere darstellt und
- die Möglichkeit eines stark ansteigenden Lösungszutritts in das Grubengebäude bereits während der Stilllegungsphase nicht ausgeschlossen werden kann.

Das Stilllegungskonzept hat zum Ziel, die Schadstoffe möglichst weitgehend an den Einlagerungsorten der Abfälle zurückzuhalten und die unvermeidlichen Freisetzungen an der Geländeoberfläche langzeitig auf ein tolerierbar geringes Maß zu reduzieren. Ein weiteres Ziel besteht darin, dass das Störfallrisiko während der Stilllegungsphase so gering wie möglich ist. Das dritte Ziel besteht darin, dass das System sowohl während der Stilllegung als auch in der Phase nach der Stilllegung robust und prognostizierbar ist.

Die im Zusammenhang mit der zweiten Zielsetzung zu betrachtenden Störfälle sind insbesondere die Destabilisierung des mechanischen Tragsystems der Schachtanlage und der auslegungsüberschreitende Lösungszutritt aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude.

3.2 Sicherheitskonzept für die Phase nach Stilllegung

Das Sicherheitskonzept beschreibt und legt fest, in welcher Weise das Gesamtsystem der stillgelegten Schachtanlage Asse II den dauerhaften Einschluss der Radionuklide bzw. die Begrenzung ihrer Freisetzung bewirkt. Es bezeichnet auch die Art der Maßnahmen für die Stilllegung und legt qualitativ deren Ziele fest. Es umfasst die folgenden strategischen Elemente:

(1) *möglichst rasche und weitgehende gebirgsmechanische Stabilisierung der Schachtanlage* durch Verfüllen aller bestehenden unverfüllten Hohlräume mit Sorelbeton[18] und Behindern von Umlösungen am Carnallitit durch Kapseln von Carnallititaufschlüssen oberhalb der 700-m-Sohle mit Sorelbetonbarrieren

(2) *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* durch die Errichtung von Sorelbetonbarrieren im Nahbereich der Einlagerungskammern, Verfüllen von einigen ausgewählten Strecken und Abschnitten von Blindschächten mit Schotter zur ergänzenden Lenkung der Lösungsbewegung im Bereich der Einlagerungskammern, Verfüllen der LAW-Einlagerungskammern mit Brucitmörtel[19] und Einleiten einer technischen $MgCl_2$-Lösung in die verbleibenden fluidzugänglichen Poren- und Resthohlräume zur Minderung des Lösungsaustausches in den Einlagerungskammern und zur Schaffung eines günstigen geochemischen Milieus

(3) *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen (insbesondere an den Einlagerungskammern vorbei)* durch Errichtung von Sorelbetonbarrieren in ausgewählten Auffahrungen, Behindern von Umlösungen am Carnallitit durch Kapseln von Carnallititaufschlüssen oberhalb der 700-m-Sohle mit Sorelbetonbarrieren sowie Verfüllen von einigen wenigen Strecken und Abschnitten von Blindschächten mit Schotter

(4) *Verzögerung und Begrenzung des Austritts von Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge* durch Verfüllen aller bestehenden unverfüllten Hohlräume mit Sorelbeton, Einbringen der technischen $MgCl_2$-Lösung nur bis in das Firstniveau der 700-m-Sohle (dadurch das Zulassen einer Phase des Volllaufens des Oberen Baufelds in der Südflanke mit erhöhter Konvergenz der Grubenbaue) und Behindern von Umlösungen am Carnallitit durch Kapseln von Carnallititaufschlüssen oberhalb der 700-m-Sohle mit Sorelbetonbarrieren

(5) *Vermeiden der Entstehung von neuen hydraulischen Wegsamkeiten durch gebirgsmechanische Verformungen[20] oder Lösungs-/Umlösungsprozesse unterhalb der 679-m-Sohle, insbesondere das Vermeiden der Entstehung von direkten Wegsamkeiten zwischen den Einlagerungskammern LAW und dem Deckgebirge* durch Verfüllen aller bestehenden unverfüllten Hohlräume mit Sorelbeton und das Einbringen der technischen $MgCl_2$-Lösung in die verbleibenden fluidzugänglichen Poren- und Resthohlräume unterhalb des Firstniveaus der 700-m-Sohle

(6) *Unterbinden eines langzeitsicherheitsrelevanten Lösungszu- und –austritts über die Tagesschächte* durch Errichten von Schachtverschlüssen

(7) *mechanischer Schutz des Systems „Grubengebäude – Salzstruktur" sowie Verzögerung des Schadstofftransports und Verdünnung durch das bzw. im Deckgebirge* (naturgege-

---

18 sofern der Hohlraum nicht im Hinblick auf eine andere Zielsetzung mit einem anderen stützenden Versatz verfüllt wird

19 **nur** in den Einlagerungskammern LAW

20 im Rahmen des Möglichen in Bezug auf die gebirgsmechanischen Bewegungen in der Steinsalz-Barriere in der Verlängerung der Störungszone S2a

bener Punkt des Sicherheitskonzepts, durch technische Maßnahmen kaum zu beeinflussen)

In Bezug auf die strategischen Elemente unterscheidet sich das Sicherheitskonzept für die Stilllegungsoption Vollverfüllung von jenem des HMGU-Konzepts /HMGU 2007/ dadurch, dass das noch kompaktierbare Resthohlraum- und Restporenvolumen nach Abschluss der Stilllegungsmaßnahmen und speziell zu Beginn der Lösungsauspressung in das Deckgebirge möglichst klein ist und dass die Lösungsauspressung in das Deckgebirge möglichst spät einsetzt und mit möglichst kleiner Rate erfolgt. Dafür werden höhere gebirgsmechanische Verformungsraten zu Beginn der Phase nach Stilllegung der Schachtanlage und eine schlechtere Prognostizierbarkeit des Systems in Kauf genommen.

3.3 Maßnahmen im Überblick

In Kapitel 3.2 wurden die Maßnahmen – gegliedert nach den strategischen Elementen des Sicherheitskonzepts – kurz genannt. Dabei zeigt sich, dass zahlreiche Maßnahmen mehreren strategischen Elementen dienen. Im vorliegenden Unterkapitel werden deshalb die Maßnahmen des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung nochmals (und anders gegliedert) aufgelistet. Dabei werden keine Angaben zur Umsetzung gemacht und keine Bewertungen vorgenommen; dies ist Gegenstand von Kapitel 4.

Die Stilllegung der Schachtanlage Asse II gemäß dem Konzept Vollverfüllung umfasst die folgenden Maßnahmen:

- Errichtung von Sorelbetonbarrieren an ausgewählten Orten um die Einlagerungskammern

  Das Ziel dieser Maßnahme ist, den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern im Hinblick auf die strategischen Elemente (2) und (3) des Sicherheitskonzepts möglichst niedrig zu halten. Im Hinblick auf das strategische Element (3) ist dabei der Abfluss des in den Einlagerungskammern gebildeten Gases möglichst nicht zu behindern, da dessen Speicherung in den Einlagerungskammern zu einem Verdrängen von ggf. radionuklidhaltiger Lösung aus diesen führt. Im Weiteren ist der nicht vermeidbare Abfluss von Lösung aus den Einlagerungskammern in eine möglichst günstige Richtung zu lenken.

- Errichtung von Sorelbetonbarrieren vor aufgeschlossenem Carnallitit oberhalb 700 m Teufe

  Die Ziele dieser Maßnahme sind die Verhinderung (mindestens die Behinderung) der Umlösung von zutretender Deckgebirgslösung an Carnallitit und dadurch die Verhinderung einer sicherheitsrelevanten Bildung von neuen, konvergenzaktiven Hohlräumen und neuen Wegsamkeiten sowie die Minderung von konvektiven Lösungsbewegungen im Oberen Baufeld in der Südflanke. Die Maßnahme dient den strategischen Elementen (1), (3) und (4) des Sicherheitskonzepts.

- Errichtung von Sorelbetonbarrieren im Bereich von potenziellen vertikalen Wegsamkeiten (Tagesschächten, Blindschächten, Rolllöchern)

  Das Ziel dieser Maßnahme ist die Verhinderung von schnellen, kanalisierenden Transportpfaden für Lösung und damit auch für Radionuklide in Lösung im Hinblick auf das strategische Element (3) des Sicherheitskonzepts.

- Errichtung von Sorelbetonbarrieren an einigen weiteren Orten

  Die Ziele dieser Maßnahme sind die großräumige Lenkung von erwarteten Lösungsbewegungen im Hinblick auf die strategischen Elemente (2) und (3) des Sicherheitskonzepts sowie das Unterbinden von potenziellen Lösungsbewegungen entlang des Streckenstummels südlich von Abbau 3/750 aus dem bzw. in das Deckgebirge im Hinblick auf das strategische Element (5) des Sicherheitskonzepts.

- Einbringen von Brucitmörtel in die Einlagerungskammern auf der 750-m- und der 725-m-Sohle

  Das Ziel dieser Maßnahme ist die Schaffung von möglichst günstigen geochemischen Verhältnissen in den Einlagerungskammern LAW durch Pufferung des pH-Wertes, insbesondere durch Bindung des durch Degradation von organischen Stoffen entstehenden CO_2 als Karbonat, im Hinblick auf das strategische Element (2) des Sicherheitskonzepts. Die gebirgsmechanische Stützung und die Minderung des konvergenzaktiven Volumens in den Einlagerungskammern im Hinblick auf die strategischen Elemente (1) und (3) des Sicherheitskonzepts sind sekundäre Ziele der Maßnahme.

- Verfüllen von Abbau 8a/511 (MAW-Kammer) und ausgewählten Grubenbauen darüber mit Sorelbeton

  Diese Maßnahme ergänzt die Errichtung von Sorelbetonbarrieren im Bereich der MAW-Kammer. Das Ziel entspricht jenem der Errichtung von Sorelbetonbarrieren an ausgewählten Orten um die Einlagerungskammern (s. o.).

- Verfüllen von ausgewählten Grubenbauen mit Schotter

  Das Ziel dieser Maßnahme ist die großräumige Lenkung von erwarteten und unvermeidbaren Lösungsbewegungen im Hinblick auf die strategischen Elemente (2) und (3) des Sicherheitskonzepts.

- Verfüllen der verbleibenden Hohlräume mit Sorelbeton

  Das Ziel dieser Maßnahme entspricht direkt dem strategischen Element (1) des Sicherheitskonzepts.

- Einbringen einer technischen $MgCl_2$-Lösung bis in das Firstniveau der 700-m-Sohle

  Das Ziel dieser Maßnahme ist die Verhinderung von Umlösungsprozessen und die Schaffung von prognostizierbaren Verhältnissen im Bereich der Einlagerungskammern auf der 750-m- und der 725-m-Sohle im Hinblick auf die strategischen Elemente (2), (3) und (5) des Sicherheitskonzepts.

- Verschluss der Tagesschächte

  Das Ziel dieser Maßnahme entspricht direkt dem strategischen Element (6) des Sicherheitskonzepts.

- Überwachung während der Phase nach Stilllegung

  Das Ziel dieser Maßnahme ist, im Rahmen des technisch Möglichen aufzuzeigen, dass sich das System nach der Stilllegung im Rahmen des Erwarteten entwickelt und langzeitsicher ist. Die Überwachung dient zudem der Beweissicherung.

Das Stilllegungskonzept Vollverfüllung erlaubt, im Rahmen der weiteren Planung noch Anpassungen und Optimierungen vorzunehmen, das Stilllegungskonzept ist diesbezüglich flexibel.

4. Technische Maßnahmen und deren Umsetzung

Es werden alle im Stilllegungskonzept (vgl. Kapitel 3) beschriebenen technischen Maßnahmen im Einzelnen angesprochen und ihre Umsetzung diskutiert. Die Zeitdauer der Stilllegungsphase beträgt etwa 8 Jahre ab dem Entscheid, dieses Stilllegungskonzept umzusetzen[21]. Bei der Beschreibung der Maßnahmen wird jeweils das Ziel der Einzelmaßnahme wiederholt sowie auf die Voraussetzungen für ihre Umsetzung und die Auswirkungen während der Umsetzung eingegangen. Eine sicherheitstechnische Bewertung der Einzelmaßnahmen erfolgt einerseits qualitativ-absolut, andererseits vergleichend. Der Vergleich erfolgt – wie in Kapitel 6 ausführlicher erläutert – anhand des Konzepts /HMGU 2007/ als Bezugskonzept.

4.1 Einbau der Sorelbetonbarrieren

Die Errichtung von Sorelbetonbarrieren stellt eine wesentliche Stilllegungsmaßnahme dar. Diese Bauwerke werden an mehreren Stellen des Grubengebäudes mit unterschiedlichen Zielsetzungen errichtet, worauf in den Unterkapiteln eingegangen wird.

Allgemeine Zielsetzung

Durch Sorelbetonbarrieren sollen Lösungsbewegungen im Grubengebäude generell begrenzt werden. Da eine Begrenzung aber nur teilweise möglich ist, sollen unvermeidliche Lösungsbewegungen gelenkt und dadurch stabile Fließwege für Lösungen erzeugt werden. Die Begrenzung der Lösungsbewegungen wird durch große Strömungswiderstände in den Wegsamkeiten erreicht, die Lenkung der Lösungsbewegung durch Kontraste zwischen Strömungswiderständen in den Wegsamkeiten. Durch hohe Strömungswiderstände werden deutliche Kontraste zu hoch durchlässigen Wegsamkeiten geschaffen, wodurch Lösung über bevorzugte Wegsamkeiten (Transportpfade) gelenkt und infolge dessen stabile Strömungs- und Transportverhältnisse erzeugt werden.

Die entscheidende Eigenschaft einer Sorelbetonbarriere ist ihr Strömungswiderstand. Die Strömungswiderstände hängen von der Länge, dem Fließquerschnitt und der Permeabilität ab. Fließquerschnitt und Permeabilität werden nicht nur vom technischen Bauwerk selbst sondern auch von der umgebenden Auflockerungszone im gebirgsmechanisch beanspruchten Salzgestein bestimmt. Damit die Barrieren ihre Funktion erfüllen können, müssen sie bestimmte Anforderungen an die integrale Permeabilität (hydraulische Anforderung), die Lagestabilität der technischen Bauwerke und die chemische Langzeitstabilität der Baustoffe erfüllen.

[21] Die Dauer der Stilllegungsphase wurde aus den Planungen /HMGU 2007/ grob abgeschätzt. Dort wurden für die Resthohlraumverfüllungen (inkl. Einlagerungskammern und Schächten) und den Bau der Strömungsbarrieren ein Gesamtzeitraum von ca. 10 Jahren, für das Einleiten des Schutzfluids bis in 679 m Teufe ca. 3 Jahre und für den Bau der Dichteelemente der Schächte ca. 0,5 Jahre kalkuliert. Da einige Maßnahmen parallel umgesetzt werden können, lässt sich die Gesamtdauer für die Umsetzung der im Stillegungskonzept Vollverfüllung veranschlagten Maßnahmen mit ca. 8 Jahren angegeben. Wenn einzelne Maßnahmen bereits vorab während der Planungsphase umgesetzt werden können, verkürzt sich diese Zeitdauer entsprechend.

Voraussetzungen für die Errichtung der Sorelbetonbarrieren sind

- eine geeignete gebirgsmechanische Situation an den geplanten Einbauorten,
- die Möglichkeit einer sicheren bergmännischen Auffahrung der Einbauorte,
- der Erhalt der Resttragfähigkeit des Tragsystems während der Einbauphase,
- das weitgehende Auffangen der Deckgebirgslösung und
- der betriebliche Strahlenschutz beim Einbau der Bauwerke.

Technische Umsetzung

Bauwerke aus Sorelbeton werden im Salzbergbau seit mehr als 100 Jahren verwendet, um Grubenbereiche vor dem Zufluss von Salzlösungen zu schützen. Diese Erfahrungen und Forschungsergebnisse können für die Schachtanlage Asse II verwendet werden, um Sorelbetonbarrieren in geeigneter Weise für ein Schließungskonzept einzusetzen. Da die Ziele, die mit Sorelbetonbarrieren erreicht werden sollen, im Schließungskonzept Vollverfüllung und im Bezugskonzept /HMGU 2007/ ähnlich sind, werden die Anordnungen und Auslegungen der Barrieren in beiden Konzepten ähnlich sein. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, die Auswirkungen der Sorelbetonbarrieren für das Schließungskonzept Vollverfüllung bewerten zu können.

Sorelbetonbarrieren bestehen aus einer Kernbarriere, die beidseitig von Widerlagern umgeben ist. Da das aufgelockerte Salzgestein um das Bauwerk den Strömungswiderstand der Kernbarriere entscheidend beeinflusst, muss es entweder entfernt oder durch Injektionen mit Sorelmörtel vergütet werden. Trotzdem verbleiben in den Konturbereichen eines Einbauortes geringmächtige Auflockerungszonen und die Kontaktzonen zwischen Bauwerk und Salzgestein. Diese begrenzen den maximal möglichen Strömungswiderstand jeder Barriere. Durch Konvergenz werden die Permeabilitäten der Auflockerungs- und Kontaktzonen mit der Zeit abnehmen. Da die Integrität des Baukörpers (s. u.) erhalten bleibt, wird der Strömungswiderstand der Sorelbetonbarriere daher mit der Zeit zunehmen.

Die grundsätzliche technische Machbarkeit und die Gewährleistung der hydraulischen Anforderungen wurden in der Schachtanlage Asse II anhand des Einbaus von Prototypen aus Sorelbeton A1 und A2 demonstriert /HMGU 2008/. Einige Barrieren wurden bereits errichtet (vgl. Kapitel 2.4).

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Wegen der ähnlichen Auslegung und Zielsetzungen der Sorelbetonbarrieren im Stilllegungskonzept Vollverfüllung und im Bezugskonzept /HMGU 2007/ ist auch die sicherheitstechnische Bewertung in weiten Bereichen ähnlich. Dies gilt beispielsweise für evtl. Veränderungen in der Anordnung und Beeinträchtigungen der hydraulischen Widerstände der Sorelbetonbarrieren als auch für Risiken bei der technischen Umsetzung und bei einem Störfall (s. u.).

Unterschiede ergeben sich jedoch aus der zeitlich unterschiedlichen Entwicklung des hydraulischen Drucks im Grubengebäude; dies betrifft sowohl den zeitlichen Verlauf des Druckaufbaus als auch die Druckdifferenzen an den Barrieren. Bei einem natürlichen Volllaufen der Porenräume oberhalb der 700-m-Sohle gemäß Stilllegungskonzept Vollverfüllung verzögert sich der Aufbau des hydrostatischen Drucks im Grubengebäude, sodass sich – durch die länger anhaltende, höhere Konvergenz – die Einspannung der Kernbarrieren verbessert. Dagegen werden jedoch auch Druckdifferenzen längere Zeit auf die Bauwerke einwirken, die die Integrität der technischen Bauwerke und Auflockerungszonen verletzen und dadurch die Strömungswiderstände der Barrieren beeinträchtigen könnten.

Ob und wie sich diese zeitlich unterschiedliche Entwicklung des hydraulischen Drucks in der Grube auf die Langzeitwirksamkeit der Sorelbetonbarrieren und die Langzeitsicherheit auswirkt, kann gegenwärtig schwer eingeschätzt werden. Die Prognostizierbarkeit des Druckaufbaus wäre bei einem schnellen Aufbau des Fluiddrucks, z.B. durch schnelles Einleiten der technischen $MgCl_2$-Lösung bis zum Top der Grube, besser. Bei einem langsamen Druckaufbau aufgrund der Einleitung der technischen $MgCl_2$-Lösung nur bis zur Firste der 700 m-Sohle und nachfolgender ungewisser Entwicklung der Zutrittsrate der Deckgebirgslösung ist die Unsicherheit für diese Prognose größer. Dies ist prinzipiell eine ungünstige Eigenschaft des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung. Allerdings ist diese Bewertung einzuschränken, weil durch die höhere Einspannung die Sorelbetonbarriere ggf. höher belastet werden kann, ohne in der Funktionsfähigkeit eingeschränkt zu werden. Und es ist unklar, ob die zu unterstellenden Druckdifferenzen gemäß Vollverfüllkonzept größer sind als im Bezugskonzept und somit eher zu einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit führen können.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Alle Sorelbetonbarrieren stabilisieren die Kontur des Grubengebäudes und verlangsamen dadurch die Gebirgskonvergenz. Dies wirkt sich positiv auf die Stabilität des Tragsystems des Grubengebäudes aus, da sich mechanische Verformungen und Konvergenzraten verringern, und somit auf die Sicherheit in der Stilllegungsphase und auf die Langzeitsicherheit. Diese Effekte erhöhen auch die Betriebssicherheit und wirken sich somit insgesamt positiv im Sinne der Störfallvorsorge aus.

4.1.1 Sorelbetonbarrieren um Einlagerungskammern

Das Ziel der Maßnahme ist, den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* und die Lösungsbewegung im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie der Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen* (strategische Elemente des Sicherheitskonzepts) möglichst niedrig zu halten. Dabei ist der Abfluss des in den Einlagerungskammern gebildeten Gases möglichst nicht zu behindern, da dessen Speicherung in den Einlagerungskammern zum Verdrängen von ggf. radionuklidhaltigen Lösungen aus diesen führt. Des Weiteren ist der unvermeidbare Abfluss von Lösung aus den Einlagerungskammern möglichst günstig zu lenken, um den Transport der in der Lösung vorhandenen Schadstoffe zu verzögern.

Mit Hilfe der Sorelbetonbarrieren um die LAW-Einlagerungskammern werden

- die Lösungsbewegungen im Bereich der Einlagerungskammern begrenzt,
- der Lösungsaustausch im Porenvolumen der Einlagerungskammern herabgesetzt und
- die Lösungen aus tieferen oder benachbarten Grubenbereichen an Einlagerungskammern vorbei gelenkt.

Diese Effekte begünstigen die langzeitige Stabilisierung des chemischen Milieus in den Einlagerungskammern und dessen Prognostizierbarkeit. Durch die Stabilisierung soll erreicht werden, dass das chemische Milieu möglichst lang in einem für die Mobilisierung von Radionukliden und die gelöste Menge von Radionukliden in den aus den Einlagerungskammern ausgepressten Lösungen günstigen Bereich liegt, d. h. diese Prozesse verzögert oder reduziert. Die Lenkung der Lösungsbewegungen ermöglicht die Bildung definierter Transportpfade, die über lange Zeiten erhalten bleiben und den Transport der Schadstoffe verzögern können; sie fördert somit die Robustheit des Langzeitsicherheitsnachweises.

Allgemeine Aussagen zu den Voraussetzungen für die Errichtung dieser Sorelbetonbarrieren, ihre sicherheitstechnischen Bewertungen sowie die potenziellen Wechselwirkungen mit Maßnahmen der Störfallvorsorge sind bereits oben genannt. Die Erstellung von Sorelbetonbarrieren im Umfeld der Einlagerungskammern ist mit speziellen Risiken behaftet, die daraus resultieren, dass Aufwältigungen in der Nähe der Kammern erforderlich sind, die zu gebirgsmechanischen Reaktionen führen können und die unter Berücksichtigung von Strahlenschutzaspekten durchgeführt werden müssen. Das Stilllegungskonzept Vollverfüllung unterscheidet sich in diesen Aspekten nicht vom Bezugskonzept /HMGU 2007/, da prinzipiell die gleichen Maßnahmen durchgeführt werden müssen. Die Risiken bei der Errichtung der Sorelbetonbarrieren im Umfeld der Einlagerungskammern werden als hinnehmbar angesehen, wenn die Barrieren unverzüglich nach der Streckenaufwältigung gebaut werden.

4.1.2 Sorelbetonbarrieren vor aufgeschlossenem Carnallitit

Das Ziel der Maßnahme ist die Kapselung der Carnallititaufschlüsse und damit die Verhinderung (mindestens die Behinderung) der Umlösung am Carnallitit durch zugetretene Deckgebirgslösung – dadurch die Verhinderung einer sicherheitsrelevanten Bildung von neuen, konvergenzaktiven Hohlräumen und neuen Wegsamkeiten – sowie die Verhinderung bzw. Minderung von konvektiven Lösungsbewegungen im Oberen Baufeld in der Südflanke. Mit Hilfe der Sorelbetonbarrieren vor aufgeschlossenem Carnallitit – insbesondere im Oberen Baufeld in der Südflanke – werden die

- Lösungsbewegungen im Bereich des aufgeschlossenen Carnallitit und damit die Umlösungsprozesse begrenzt,
- Entfestigungsprozesse im Carnallitit eingeschränkt,
- Bildung von neuen, konvergenzaktiven Hohlräumen im Carnallitit begrenzt und
- Bildung von $MgCl_2$-reichen, schweren Lösungen durch Umlösung von Carnallitit – als ein möglicher Auslöser von konvektiv bedingten Lösungsbewegungen – verlangsamt.

Allgemeine Aussagen zu den Voraussetzungen für die Errichtung dieser Sorelbetonbarrieren, ihre sicherheitstechnischen Bewertungen sowie die potenziellen Wechselwirkungen mit Maßnahmen der Störfallvorsorge sind bereits oben genannt. Die Erstellung von Sorelbetonbarrieren vor Carnallititaufschlüssen ist im Stilllegungskonzept Vollverfüllung vorgesehen, um die Auswirkungen der zutretenden Deckgebirgslösung zu begrenzen. Diese Notwendigkeit bestand im Konzept /HMGU 2007/ nicht, sodass sich die Konzepte hier unterscheiden. Die Sorelbetonbarrieren können technisch erstellt werden. Wegen der Lage der Bauwerke im Oberen Baufeld in der Südflanke sind Risiken im Zusammenhang mit Druckdifferenzen oder Ähnlichem geringer als bei den Barrieren auf tieferen Sohlen, sodass die Wirksamkeit positiv eingeschätzt wird.

4.1.3 Sorelbetonbarrieren in bzw. im Bereich von potenziellen vertikalen Wegsamkeiten

Das Ziel dieser Maßnahme ist die Verhinderung von schnellen, kanalisierenden Transportpfaden für Lösung und damit für Radionuklide in Lösung im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie der Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen* (strategisches Element des Sicherheitskonzepts). Mit Hilfe dieser Sorelbetonbarrieren werden

- die Lösungsbewegungen im Bereich von vertikalen Grubenbauen (z.B. Blindschächte 1, 2 und 3) bzw. Auffahrungen begrenzt und
- die Transportzeit von Radionukliden im Grubengebäude verlängert.

Allgemeine Aussagen zu den Voraussetzungen für die Errichtung dieser Sorelbetonbarrieren, ihre sicherheitstechnischen Bewertungen sowie die potenziellen Wechselwirkungen mit Maßnahmen der Störfallvorsorge sind bereits oben genannt.

4.1.4 Sorelbetonbarrieren an einigen weiteren Orten

Die Ziele dieser Maßnahme sind die großräumige Lenkung von erwarteten Lösungsbewegungen im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie der Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen* sowie das Unterbinden von Lösungsbewegungen über direkte Wegsamkeiten zwischen den Einlagerungskammern LAW und dem Deckgebirge im Hinblick auf das *Vermeiden der Entstehung von neuen hydraulischen Wegsamkeiten* (strategische Elemente des Sicherheitskonzepts). Mit Hilfe dieser Sorelbetonbarrieren werden

- Lösungen aus tieferen Grubenbereichen großräumig gelenkt und
- potenzielle Lösungsbewegungen entlang des Streckenstummels südlich von Abbau 3/750 aus dem bzw. in das Deckgebirge verhindert.

Die Sorelbetonbarrieren für die großräumige Lenkung von Lösungen aus tieferen Grubenbereichen befinden sich vor allem auf der 775-m-Sohle und sind zum Teil bereits errichtet (siehe Kapitel 2.4).

Allgemeine Aussagen zu den Voraussetzungen für die Errichtung dieser Sorelbetonbarrieren, ihre sicherheitstechnischen Bewertungen sowie die potenziellen Wechselwirkungen mit Maßnahmen der Störfallvorsorge sind bereits oben genannt.

4.2 Einbringen von Brucitmörtel in Einlagerungskammern LAW

Das primäre Ziel dieser Maßnahme ist die *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* (Element (2) des Sicherheitskonzepts) durch Schaffung von möglichst günstigen geochemischen Verhältnissen in den Einlagerungskammern LAW durch Pufferung des pH-Werts, insbesondere durch Bindung des durch Degradation von organischen Stoffen entstehenden CO_2 als Karbonat, im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* (Element (2) des Sicherheitskonzepts). Die gebirgsmechanische Stützung und die Minderung des konvergenzaktiven Volumens in den Einlagerungskammern im Hinblick auf die Elemente (1) und (3) des Sicherheitskonzepts sind sekundäre Ziele der Maßnahme. Mit Hilfe des Einbringens von Brucit ($Mg(OH)_2$) als Brucitmörtel in die LAW-Einlagerungskammern werden

- das durch Degradation von organischen Stoffen entstehende CO_2 weitgehend ausgefällt,
- die pH-Werte der Lösungen in den LAW-Einlagerungskammern langzeitig im alkalischen Bereich (pH > 7) gepuffert und damit das chemische Milieu stabilisiert,
- als Folge der pH-Pufferung die möglichen Lösungskonzentrationen relevanter Radionuklide langzeitig begrenzt und
- die Gasbildungsraten durch Metallkorrosion begrenzt.

Neben diesen positiven chemischen Effekten werden durch die Hohlraumverfüllung auch positive gebirgsmechanische Effekte erreicht, wie die Stabilisierung der Kontur der Einlagerungskammern und die Minderung des konvergenzaktiven Volumens.

Die entscheidende chemische Eigenschaft des Brucitmörtels ist der sofort verfügbare $Mg(OH)_2$-Anteil. Diese Verfügbarkeit hängt sowohl von der Brucitmenge im Baustoff als auch vom Kontakt des Baustoffs mit der Lösung ab; deshalb bestehen Anforderungen an die Menge und die spezifische Oberfläche des Brucitmörtels. Die Verweilzeit der Lösung in der Einlagerungskammer ist ein wesentlicher Aspekt bezüglich der Menge des gelösten Brucits; sie ist ausreichend, wenn sie um ein Vielfaches höher ist als der Zeitraum für die Umsetzung reaktiver (das Milieu beeinflussender) Kammerinhaltstoffe, wie Eisen, Zement und Brucitmörtel. Dies wird durch die Begrenzung der Lösungsbewegungen in den Einlagerungskammern (vgl. Kapitel 4.1.1) gewährleistet.

Voraussetzungen für das Einbringen von Brucitmörtel in die Einlagerungskammern sind

- ausreichend große, nicht mit Lösung gefüllte Hohlräume an den geplanten Einbauorten,
- die Möglichkeit einer sicheren bergmännischen Einbringung,
- der betriebliche Strahlenschutz beim Einbau.

Technische Umsetzung

Grundsätzlich entspricht das Einbringen eines fließfähigen Baustoffs auf der Basis von $Mg(OH)_2$- und MgO-Bindemitteln in Grubenhohlräume dem Stand der Technik. Besondere Vorkehrungen sind jedoch hinsichtlich des Strahlenschutzes zu treffen, da mit der Maßnahme Kammern mit radioaktiven Abfällen verfüllt werden, in denen kontaminierte Grubenluft und evtl. im Sohlenbereich auch kontaminierte Lösung vorhanden ist. Für diese besonderen Vorkehrungen gibt es noch keine Referenzprojekte.

Als Baustoff wird Brucitmörtel verwendet, der aus Brucit, Sorelphasen – durch sofortige Umwandlung von Brucit im Kontakt mit $MgCl_2$-Lösung – und $MgCl_2$-Lösung besteht und nach einer speziellen Rezeptur hergestellt wird. Dieser Mörtel besitzt hohe Gehalte an Brucit und Sorelphasen, lässt sich gut verarbeiten und wird die noch unverfüllten Hohlräume ausfüllen. Die chemische Wirksamkeit zur Einstellung von alkalischen Lösung-Feststoff-Systemen und zur Pufferung von Karbonatkonzentrationen ist für Baustoffe auf Basis von Brucit und Sorelphasen prinzipiell nachgewiesen /INE 2006a/. Der Brucitmörtel wird über noch zu erstellende Bohrungen in die Einlagerungskammern und ausgewählte Zugangsstrecken eingebracht.

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Die Einbauorte für Brucitmörtel hängen von den Anforderungen an das Material und den vorgegebenen räumlichen Gegebenheiten ab. Sowohl die Einbauorte als auch die einzubringenden Baustoffmengen (bzw. die verfügbaren Hohlräume in den Einlagerungskammern) sind mit Ungewissheiten behaftet.

Unterschiede zum Bezugskonzept /HMGU 2007/ ergeben sich aus den mechanischen und einigen chemischen Eigenschaften des veranschlagten Baustoffs Brucitmörtel, (anstelle von Brucitgranulat) der

- fließfähig ist und in die Einlagerungskammern verpumpt werden kann,
- in größeren Mengen in die Einlagerungskammern eingebracht werden kann als Brucitgranulat und den gesamten unverfüllten Hohlraum verfüllt,
- eine gute mechanische Stützwirkung aufweist und
- einen höheren Brucit- bzw. Magnesiumgehalt aufweist als Brucitgranulat.

Dadurch ist zu erwarten, dass Brucitmörtel die Anforderungen in zumindest gleicher oder ggf. besserer Weise erfüllt als das im Bezugskonzept vorgesehene Brucitgranulat. Dies gilt auch für das Risiko, dass die in den einzelnen Kammern verfügbaren Hohlräume nicht genügend groß sind, um eine ausreichende Menge an Baustoff aufzunehmen, sodass die Funktion dieser Maßnahme nicht vollständig gewährleistet ist.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Alle Verfüllungen mit Brucitmörtel stabilisieren die Kontur der Einlagerungskammern und verlangsamen dadurch die Gebirgskonvergenz in diesen Kammern. Dies hat positive Wirkungen auf die Stabilität des Grubengebäudes, da sich mechanische Verformungen und Konvergenzraten verringern, und somit auf die Sicherheit in der Stilllegungsphase und die Langzeitsicherheit. Diese Effekte erhöhen die Betriebssicherheit und wirken positiv im Sinne der Störfallvorsorge.

4.3 Verfüllen der MAW-Kammer und ausgewählter Grubenbaue darüber

Das Ziel dieser Maßnahme ist, den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* und die Lösungsbewegung im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie der Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen* (strategische Elemente des Sicherheitskonzepts) möglichst niedrig zu halten. Die Maßnahme ergänzt die Wirksamkeit der Sorelbetonbarrieren im Bereich der MAW-Kammer.

Durch die Verfüllung der MAW-Kammer und ausgewählter Grubenbaue darüber mit Sorelbeton werden

- Lösungsbewegungen im Bereich der MAW-Kammer begrenzt,
- der Lösungsaustausch im Porenvolumen der MAW-Kammer herabgesetzt, bzw. eine Durchströmung der MAW-Kammer verhindert und
- die Kontur der MAW-Kammer und der darüber liegenden Grubenbaue stabilisiert und das konvergenzaktive Volumen gemindert.

Es ist zu erwarten, dass der genannte gebirgsmechanische Effekt zu einer vollständigen Stabilisierung der MAW-Kammer führt, d.h. dass das restliche Hohlraumvolumen im Fasskegel in der Phase nach Stilllegung nicht mehr durch Konvergenz abnimmt. Durch die Stabilisierung wird die sehr geringe integrale Durchlässigkeit der Pfeiler und der Schwebe zur 490-m-Sohle erhalten, die jeweils in ihrem Kern hydraulisch dicht sind.

Technische Umsetzung

Das Einbringen von Sorelbeton in die MAW-Kammer unterscheidet sich von den Verfahren für die Errichtung der Sorelbetonbarrieren darin, dass keine Widerlager zu bauen sind und die Konturzonen nicht nachgeschnitten werden. Der Sorelbeton wird wie bei den Sorelbetonbarrieren über Bohrungen eingebracht; es ist davon auszugehen, dass bei Berücksichtigung besonderer Strahlenschutzaspekte wegen des mittel radioaktiven Inventars in der Kammer die Maßnahme technisch umsetzbar ist. Es ist auch zu erwarten, dass diese Maßnahme unter allen Entwicklungen des Grubengebäudes – auch bei einer Erhöhung der Rate des Lösungszutritts – vollständig durchgeführt werden kann.

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Die Sorelbeton-Verfüllung bewirkt eine effektive Rückhaltung der Radionuklide in der MAW-Kammer, da ein Austritt der kontaminierten Lösung sehr effektiv unterbunden wird (siehe /HMGU 2007/).

Im Stilllegungskonzept Vollverfüllung läuft das Obere Baufeld in der Südflanke mit Deckgebirgslösung voll, die einen geringeren Magnesiumgehalt hat als die technische $MgCl_2$-Lösung, die in tiefere Bereiche der Grube eingeleitet wird. Diese Deckgebirgslösung kann Sorelbeton potenziell umlösen. Es wird aber davon ausgegangen (vgl. Kapitel 6.1.2), dass dieser Effekt so gering ist, dass die Wirksamkeit der Maßnahme nicht beeinträchtigt wird.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Die Verfüllung mit Sorelbeton stabilisiert die Kontur der MAW-Kammer und verhindert dadurch die Gebirgskonvergenz in dieser Kammer. Dies hat positive Wirkungen auf die Stabilität im oberen Bereich des Grubengebäudes. Auf die zeitliche Entwicklung der Zutrittsrate der Deckgebirgslösung hat diese Maßnahme keinen Einfluss.

4.4 Verfüllen von ausgewählten Grubenbauen mit Schotter

Das Ziel dieser Maßnahme ist die großräumige Lenkung von erwarteten und unvermeidbaren Lösungsbewegungen im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* (Element (2) des Sicherheitskonzepts) sowie die *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen* (Element (3) des Sicherheitskonzepts).

Schotter unterstützt wie Sorelbeton die langzeitige Stabilisierung des Tragsystems des Grubengebäudes und behindert die Konvergenz deutlich. Dabei werden an die Langzeitbeständigkeit und die Einbaudichte des Materials geringe Anforderungen gestellt. Es wird jedoch eine gute Durchlässigkeit über lange Zeiten gefordert, um im Vergleich zu anderen Grubenbauen einen Kontrast in den Strömungswiderständen zu gewährleisten. Dies wird durch die große Porosität und eine bei entsprechender Einbaugüte vernachlässigbare Kompaktierbarkeit gewährleistet. Eine geringe Abnahme der Porosität durch Ausfällungen ist nicht auszuschließen, wobei jedoch zu beachten ist, dass die Relevanz der Kontraste der Strömungswiderstände zeitlich begrenzt ist.

Technische Umsetzung

Schotter wird in die Grubenbaue geschüttet. Dieses Verfahren ist Stand der Technik. Es gibt geeignete Materialien, z.B. Magnesit, die die oben genannten Anforderungen erfüllen.

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Der Einsatz von Schotter zur Einstellung von Kontrasten der Strömungswiderstände wird als geeignetes Verfahren eingeschätzt. Die Abnahme der Porosität durch Ausfällungen wird als vernachlässigbar eingeschätzt. Die Stützwirkung des Schotters gegenüber Gebirgskonvergenz ist effektiv und gewährleistet die Behinderung von Lösungsbewegungen an den entsprechenden Stellen, z.B. im Tiefenaufschluss.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Einige Grubenbaue, für die eine Verfüllung mit Schotter vorgesehen ist, sind bereits verfüllt. Oberhalb der 750-m-Sohle sind nur wenige Grubenbaue für eine solche Verfüllung vorgesehen. Auch bei einer Erhöhung der Zutrittsraten von Deckgebirgslösung ist zu erwarten, dass das Einbringen von Schotter in den dafür vorgesehenen Grubenbauen noch möglich ist.

Darüber hinaus ist es bei einem auslegungsüberschreitenden Zutritt von Deckgebirgslösung wahrscheinlich, dass keine definierten Strömungspfade in der Grube mehr vorhanden sind und die Funktion der mit Schotter verfüllten Grubenbaue nicht mehr relevant ist. Bezüglich der Störfallvorsorge ist es dann nicht mehr erforderlich, alle dafür vorgesehenen Grubenbaue mit Schotter zu verfüllen.

4.5 Verfüllen der verbleibenden Hohlräume mit Sorelbeton

Das primäre Ziel dieser Maßnahme entspricht direkt dem strategischen Element (1) des Sicherheitskonzepts, d.h. *möglichst rasche und weitgehende gebirgsmechanische Stabilisierung der Schachtanlage*. Die Verfüllung mit Sorelbeton ist einer der wesentlichen Bestandteile des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung. Neben der gebirgsmechanischen Stabilisierung werden durch den Sorelbeton sekundär die fluidzugängigen Bereiche vermindert, da Sorelbeton eine gegenüber dem sonst vorhandenen Salzgrus geringere Porosität aufweist.

Technische Umsetzung

Die Verfüllung der verbleibenden Hohlräume mit Sorelbeton erfolgt zusätzlich zu der Errichtung der in Kapitel 4.1 behandelten Sorelbetonbarrieren. Folgende Einbauorte sind vorgesehen:

- Resthohlräume oberhalb der 700-m-Sohle,
- Abbaubegleitstrecken und Wendelstrecke,
- Resthohlräume von der 775-m-Sohle bis zur 700-m-Sohle[22],
- Resthohlräume im Tiefenaufschluss.

[22] Sofern die Ergebnisse der in Ausarbeitung befindlichen Stellungnahme /ALSA-C 2009b/ zu den Firstspalten auf der 700-m- und 725-m-Sohle dem nicht entgegenstehen.

Der Sorelbeton wird über Bohrungen in die zu verfüllenden Grubenbaue eingebracht; dieses Verfahren ist Stand der Technik. Da über Bohrungen nicht alle Resthohlräume erreicht werden können, kann die Maßnahme mit vertretbarem Aufwand nicht vollständig umgesetzt werden. Der Aufwand kann aber den erforderlichen Stützwirkungen angepasst werden. Das Einbringen von Sorelbeton zur Verdichtung des Versatzes im Oberen Baufeld in der Südflanke (Versatzinjektion[23]) wird im Stilllegungskonzept Vollverfüllung nicht betrachtet.

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Die Verfüllung der verbleibenden Hohlräume mit Sorelbeton im Rahmen der Stilllegungsoption Vollverfüllung führt zu einer zusätzlichen Stabilisierung des Tragsystems. Durch diese Stabilisierung wird generell die Konvergenz vermindert, die in der Stilllegungsphase durch die geringen Fluiddrücke im Stilllegungskonzept Vollverfüllung stark ausgeprägt ist.

Bereits in der Stilllegungsphase verstärkt der Sorelbeton den Aufbau des Versatzdrucks in den Grubenbauen und bewirkt somit eine bessere Stützung der Pfeiler und Schweben. Dadurch werden die Auswirkungen des Einleitens der technischen $MgCl_2$-Lösung bis zur Firste der 700-m-Sohle abgeschwächt, siehe Kapitel 4.6. Die Verfüllmaßnahme ist diesbezüglich positiv zu bewerten.

Durch die relativ lange Zeitspanne bis zum Volllaufen der Grube mit Deckgebirgslösung sind die Schädigungen in den Tragelementen weiter vorangeschritten, als in den Betrachtungen für das Bezugskonzept /HMGU 2007/. Es kann derzeit nicht eingeschätzt werden, ob die Verfüllung der Resthohlräume mit Sorelbeton, die diesen Schädigungen entgegenwirkt, zu einer gebirgsmechanisch sicher prognostizierbaren Situation in der Grube führt.

In der Phase nach Stilllegung der Schachtanlage führt die durch die Verfüllung mit Sorelbeton verursachte Verminderung der Hohlraumvolumina zu einer Verringerung der konvergenzbedingten Volumenströme in der Grube. Dies ist als generell positiver Effekt zu bewerten. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die Verminderung der Hohlraumvolumina den eventuell in Lösung befindlichen Schadstoffen geringere Lösungsvolumina zur Verfügung stehen, sodass die Konzentrationen größer sind. Dies ist eine negative Eigenschaft, die für alle Schadstoffe relevant ist.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Die Verfüllung der Resthohlräume mit Sorelbeton unterstützt den Versatzdruckaufbau, trägt so zur Stabilisierung der Tragelemente des Grubengebäudes bei und vermindert dadurch die Gebirgskonvergenz. Sie unterstützt dadurch die Maßnahmen zur Störfallvorsorge.

[23] Versatzinjektionen können aber ggf. in Betracht kommen, falls dadurch in der Phase nach Stilllegung ein sprunghafter Anstieg der Konvergenzraten infolge Durchfeuchtung vermindert werden kann.

4.6 Einbringen einer technischen $MgCl_2$-Lösung bis in das Firstniveau der 700-m-Sohle

Das Ziel dieser Maßnahme ist die Verhinderung von Umlösungsprozessen und die Schaffung von prognostizierbaren Verhältnissen im Bereich der Einlagerungskammern auf der 750-m- und der 725-m-Sohle im Hinblick auf die *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebinden* (Element (2) des Sicherheitskonzepts), die *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegung im Grubengebäude sowie Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen* (Element (3) des Sicherheitskonzepts) und das *Vermeiden der Entstehung von neuen hydraulischen Wegsamkeiten durch gebirgsmechanische Verformungen oder Lösungs/Umlösungsprozesse unterhalb der 679-m-Sohle, insbesondere das Vermeiden der Entstehung von direkten Wegsamkeiten zwischen den Einlagerungskammern LAW und dem Deckgebirge* (Element (5) des Sicherheitskonzepts).

Das beschränkte Einbringen der technischen $MgCl_2$-Lösung – nur bis zur Firste der 700-m-Sohle – ist ein wesentlicher Unterschied zum Bezugskonzept /HMGU 2007/, in dem eine Einbringung – der dort Schutzfluid genannten Lösung – in der gesamten Grube vorgesehen war.

Technische Umsetzung

Als technische $MgCl_2$-Lösung wird eine $MgCl_2$- und $MgSO_4$-reiche Lösung verwendet (R-Lösung im quinären System, die mit allen relevanten Mineralen im Grubengebäude im Gleichgewicht steht). Diese Lösung wird während der Stilllegungsphase über Rohrleitungen in alle Grubenbaue bis zur Firste der 700-m-Sohle eingeleitet. Die technische Umsetzung dieser Maßnahme unterscheidet sich nicht von derjenigen, die für das Bezugskonzept vorgesehen war, sodass sie als realisierbar angesehen wird.

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Durch die technische $MgCl_2$-Lösung werden in der gesamten Grube unterhalb 679 m Teufe, insbesondere im Carnallitit-Baufeld, Umlösungen am Carnallitit verhindert, sodass dadurch verursachte Volumenvergrößerungen oder Konvektionen ausgeschlossen werden können. Dies ist eine erforderliche Voraussetzung für den Sicherheitsnachweis, so dass die Maßnahme positiv ist.

Da die technische $MgCl_2$-Lösung ein größere Dichte hat als die zutretende Deckgebirgslösung, die die restlichen Hohlräume der Grube oberhalb der Firste der 700-m-Sohle auffüllen wird, wird sich eine Dichteschichtung mit einem Grenzbereich zwischen den beiden Lösungen bilden. Diese Dichteschichtung behindert den Transport der Schadstoffe, die aus den Einlagerungskammern LAW stammen, auf dem Weg zur potenziellen Übertrittsstelle aus dem Oberen Baufeld in der Südflanke ins Deckgebirge (siehe Kapitel 6.1.8). Dies ist eine positive Eigenschaft des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung.

Das nur teilweise Einleiten der technischen $MgCl_2$-Lösung birgt das Risiko der Destabilisierung des Tragsystems des Grubengebäudes, da durch die eingeleitete Lösung und die da-

durch in der Grube sich ausbreitende Feuchte die Gebirgskonvergenz wegen des geringen Stützdrucks stärker wird. Dies ist eine ungünstige Eigenschaft des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung, die jedoch teilweise durch das Verfüllen der Resthohlräume mit Sorelbeton (siehe Kapitel 4.5) kompensiert wird.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Nach der Einleitung der technischen $MgCl_2$-Lösung würde eine Erhöhung der Zutrittsrate der Deckgebirgslösung zu einem schnelleren Auffüllen der verbleibenden Porenräume im Oberen Baufeld in der Südflanke führen; die Dichteschichtung bliebe erhalten. Dadurch sind die Auswirkungen auf das Systemverhalten eher positiv zu bewerten.

4.7 Verschluss der Tagesschächte

Das Ziel dieser Maßnahme entspricht direkt dem strategischen Element (6) des Sicherheitskonzepts, d.h. dem *Unterbinden eines langzeitsicherheitsrelevanten Lösungszu- und -austritts über die Tagesschächte*. Die Tagesschächte werden vollständig verfüllt. Im Bereich oberhalb 490 m Teufe sind Dichtelemente vorgesehen, die prinzipiell wie eine vertikale Sorelbetonbarriere wirken und dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen.

Technische Umsetzung

In den Tagesschächten unterhalb 490 m Teufe ist eine Stützsäule aus einer Kombination von Schotter und Sorelbeton vorgesehen (von 700 m bis 490 m Teufe). Die Dichtelemente oberhalb 490 m Teufe liegen auf der Stützsäule auf. Oberhalb der Dichtelemente sind setzungsstabile Füllsäulen aus Schotter mit einer Füllung aus Salzlösung vorgesehen, um die hydraulische Beanspruchung der Dichtelemente (durch ansteigenden Fluiddruck im Grubengebäude) zu reduzieren.

Sicherheitstechnische Bewertung der Maßnahme

Das Konzept zum Verschluss der Tagesschächte beinhaltet Verfüllungen und Dichtelemente ähnlich denen im Bezugskonzept /HMGU 2007/, die im Rahmen der Planungen so auszulegen sind, dass relevante Lösungsbewegungen über die Tagesschächte wirksam verhindert werden. Dieses kann durch den Einbau von geeigneten Schachtverschlusssystemen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik erfolgen.

Wechselwirkung mit der Störfallvorsorge

Die Verfüllung der Tagesschächte und der Bau der Dichtelemente haben keinen Einfluss auf die Maßnahmen zur Störfallvorsorge, bzw. sind selbst Teil der Vorsorgemaßnahmen.

4.8 Überwachung während der Phase nach Stilllegung

Das Ziel dieser Maßnahme ist, für die Aufsichtsbehörde und die Öffentlichkeit so weit wie möglich aufzuzeigen, dass sich das System nach der Stilllegung im Rahmen des Erwarteten entwickelt und langzeitig sicher ist. Die Überwachung dient zudem der Beweissicherung.

Es wird angestrebt, für die unmittelbare Phase nach Stilllegung so lange wie erforderlich und wie technisch möglich mit Hilfe eines messtechnischen Überwachungsprogramms zu zeigen, dass sich das System in der frühen Nachbetriebsphase wie erwartet entwickelt und keine unvorhergesehenen Störfälle eintreten.

Eine Überwachung der Prozesse in der stillgelegten und geschlossenen Grube selbst ist unter den Aspekten der Langzeitsicherheit jedoch nur begrenzt möglich, da die Lebensdauer der dafür notwendigen Messinstrumente deutlich kleiner als die zu betrachtenden Zeiträume ist. Daher kann eine langfristige Überwachung sich lediglich auf die Umgebungsüberwachung an der Schnittstelle zur Biosphäre beschränken. Hierzu gehören z.B. die radiologische Überwachung des Grundwassers und des Bodens. Die Ausarbeitung eines detaillierten Überwachungsprogramms und Maßnahmenkatalogs wird Bestandteil der ggf. vorzunehmenden Stilllegungsplanung sein.

5. Vorteile und Risiken während der Stilllegungsphase

Die Stilllegungsoption Vollverfüllung weist – wie jede Stilllegungsoption – bezüglich der Sicherheit während der Stilllegungsphase günstige und weniger günstige Merkmale auf. Zu diesen Merkmalen zählen insbesondere auch die Risiken, die während der Stilllegungsphase aufgrund der bereits vorliegenden Verhältnisse bestehen oder durch die Stilllegungsmaßnahmen erst entstehen. In diesem Kapitel werden solche Merkmale aufgeführt und bewertet, soweit dies für eine Gesamtbewertung der Stilllegungsoption Vollverfüllung von Bedeutung erscheint. Eine systematische Analyse der Risiken während der kommenden Phase, während der die Schachtanlage noch offen gehalten wird und Arbeiten ausgeführt werden, enthält – gültig für alle Stilllegungsoptionen – /IST 2009a/.

Die hervorzuhebenden Merkmale der Stilllegungsoption Vollverfüllung bezüglich der Sicherheit während der Stilllegungsphase werden in Kapitel 5.1 angeführt. Die Risiken aus den bereits vorliegenden Verhältnissen, welche alle Stilllegungsoptionen betreffen, werden anschließend in Kapitel 5.2 diskutiert.

5.1 Merkmale der Stilllegungsoption für die Stilllegungsphase

(i) Die eingelagerten Abfälle verbleiben an den Orten, an denen sie sich derzeit befinden. Ein Hantieren mit Abfällen ist nicht erforderlich.

Der Strahlenschutz des Personals während der Stilllegungsarbeiten ist damit verhältnismäßig einfach und ohne besondere Risiken. Auch ein Austrag von Radioaktivität aus der Grube mit den ausziehenden Wettern wird gegenüber dem heutigen Betriebszustand der Schachtanlage höchstens geringfügig erhöht[24], ein Radionuklidaustrag mit abzuführender Lösung oder abzuführenden Feststoffen kann ausgeschlossen werden. Falls die Vorsorgemaßnahmen gemäß /IST 2009a/ umgesetzt werden, ist davon auszugehen, dass keine weiteren kontaminierten Lösungen mehr in die befahrbaren Grubenbereiche austreten werden.

(ii) Die im direkten Umfeld der Einlagerungskammern vorgesehenen Maßnahmen beschränken sich auf das Stoßen von Bohrungen in den Firstbereich der Einlagerungskammern, das Einbringen von Füllstoffen in die Einlagerungskammern und das Errichten von Sorelbetonbarrieren in den Zugangsstrecken zu den Einlagerungskammern.

Die genannten Arbeiten führen höchstens beim Anbohren einer Einlagerungskammer zu einem kurzzeitigen Anstieg des Gehalts von volatilen Radionukliden in den ausziehenden Wettern. Es sind keine Vortriebsarbeiten in radionuklidhaltige Grubenbereiche vorgesehen. Ausnahmen stellen die vorbereitenden Auffahrungen für die Errichtung der Sorelbetonbarrieren in jenen Zugangsstrecken dar, in deren Auflockerungszone Radionuklide bereits mit durchsickernder Lösung eingedrungen sind. Bei der Umsetzung der Maßnahmen werden die Einlagerungskammern weitgehend sequenziell und nur während beschränkten Zeitperioden „geöffnet“. Die potenziellen Auswirkungen der Bildung von radioaktiven Aerosolen in der

[24] Mögliche geringfügige Erhöhung bei Vortriebsarbeiten in oder nahe von Einlagerungskammern, siehe weiter unten

Grubenluft und des Anfalls von radioaktiven Lösungen und Feststoffen sind deshalb sehr gering.

Insgesamt ist die Umsetzung der Maßnahmen mit einer sehr geringen Strahlenexposition des Personals verbunden. Eine radiologische Beeinträchtigung der Bevölkerung in der Umgebung der Schachtanlage aufgrund der Umsetzung der Stilllegungsmaßnahmen kann ausgeschlossen werden.

(iii) Die Umsetzung der Stilllegungsmaßnahmen erfordert kein Auffahren von größeren, die gebirgsmechanischen Verhältnisse zusätzlich nachteilig beeinflussenden Hohlräumen.

Die für das Einbringen von Füllstoffen erforderlichen neuen Auffahrungen und das für das Errichten von Sorelbetonbarrieren erforderliche Nachschneiden der Kontur sind volumenmäßig gering und von geringer Bedeutung für die gebirgsmechanischen Verhältnisse.

Das Tragsystem der Schachtanlage wird damit nicht durch Auffahrung neuer Hohlräume zusätzlich geschwächt.

(iv) Die Einleitung der technischen $MgCl_2$-Lösung bis zur Firste der 700-m-Sohle schwächt das Tragsystem der Schachtanlage während der Stilllegungsphase.

Diese Maßnahme betrifft nur die Grubenbereiche unterhalb der 679-m-Sohle, und sie wird erst kurz vor Abschluss der Stilllegung ausgeführt. Die potenziellen Auswirkungen dieser Maßnahme auf die Resttragfähigkeit während der Stilllegungsphase wurden im Zusammenhang mit der Sicherheitsanalyse /HMGU 2007/ für einen früheren Systemzustand untersucht. Für die Phase der Einleitung des Schutzfluids bis zur 700-m-Sohle wurde eine deutliche Aktivierung der Deckgebirgsverschiebungsraten in der gesamten Südflanke (bis zu den oberen Sohlen) festgestellt.

Die Einleitung von technischer $MgCl_2$-Lösung erfolgt im Vollverfüllkonzept später als in /HMGU 2007/ geplant. Dadurch ergeben sich für die Einleitung der technischen $MgCl_2$-Lösung folgende Unterschiede zu den mit Modellrechnungen untersuchten Verhältnissen: (a) Die Deckgebirgsverschiebungsraten sind aufgrund der höheren Versatzdrücke in den Abbauen geringer. Dies wird durch die Firstspaltverfüllung noch unterstützt. (b) Die Schädigungen in den Tragelementen und im Deckgebirge sind stärker. (c) Die Deckgebirgslösung hat sich auf den tieferen Sohlen der Südflanke vermutlich stärker ausgebreitet. Insbesondere die Wirkung der Deckgebirgslösung auf das Kriechverhalten und die Resttragfähigkeit ist noch Gegenstand laufender Untersuchungen. Gegenwärtig kann keine Aussage zur gebirgsmechanischen Zulässigkeit[25] getroffen werden. Die gebirgsmechanischen Auswirkungen der Einleitung von technischer $MgCl_2$-Lösung hängt stark mit der Resttragfähigkeit des

[25] Ein Systemzustand wird im vorliegenden Bericht als gebirgsmechanisch zulässig bezeichnet, wenn die weitere Systementwicklung im Hinblick auf die konkrete Fragestellung ausreichend genau und belastbar prognostiziert und bewertet werden kann. Die Anforderungen an die gebirgsmechanische Prognostizierbarkeit sind unterschiedlich für die Stilllegungsphase, die Phase des Volllaufens nach Stilllegung und die Phase der Lösungsauspressung in das Deckgebirge nach dem Volllaufen der Grube.

Systems Schachtanlage Asse II zusammen. Die Resttragfähigkeit des Systems betrifft alle Stilllegungsoptionen und wird in Kapitel 5.2 diskutiert.

5.2 Risiken aus bereits vorliegenden Verhältnissen

Die von den bereits vorliegenden Verhältnissen ausgehenden Risiken für die Umsetzung von Stilllegungsmaßnahmen betreffen jede Stilllegungsoption in ähnlicher Weise, jedoch in unterschiedlich starkem Ausmaß. Diese Risiken hängen mit der Resttragfähigkeit des Systems Schachtanlage Asse II und dem nicht auszuschließenden auslegungsüberschreitenden Lösungszutritt in die Grube zusammen.

(i) Die Resttragfähigkeit des Systems kann an der Südflanke nur für einen begrenzten Zeitraum und nur unter Vorbehalten ausgewiesen werden.

Das Tragsystem an der Südflanke ist von vornherein nicht standsicher aufgefahren worden und hat in der bisherigen Standzeit von Jahrzehnten mit Kriechverformungen, dilatanter Entfestigung und lokalen Bruchprozessen auf die für die Abmessungen zu hohen Spannungen reagiert. Der sich gegenwärtig aufbauende Versatzdruck wirkt den Pfeilerbrüchen entgegen und ist entscheidend für den Erhalt der Resttragfähigkeit. Die gebirgsmechanischen Prozesse sind sehr komplex. Eine Prognose ist nur für die Systemzustände möglich, die sich gemäß der gleichen Gesetzmäßigkeiten entwickeln, die auch die bisherige In-situ-Entwicklung bestimmten, und die in den Modellen berücksichtigt werden. Die gebirgsmechanischen Zustandsanalysen und Prognosen sind fortlaufend auf Basis der Daten der Standortüberwachung zu überprüfen und ggf. anzupassen. Die Prognosen stehen deshalb unter dem Vorbehalt, dass sich die System- und Randbedingungen nicht ändern. Die größten Besorgnisse beziehen sich dabei auf die Ausbildung von weiteren Zutrittsorten im Grubengebäude und dadurch die Durchfeuchtung weiterer Gebirgsbereiche mit NaCl-Lösung, die nicht auszuschließende Zunahme der Deckgebirgslösungszutritte und die Abnahme der Sättigung der zutretenden Lösung an NaCl. Bei solchen Entwicklungen gilt die in /IfG 2009/ für die Zeitperiode bis 2020 vorgelegte Prognose der Resttragfähigkeit nicht mehr.

Durch die sich schon gegenwärtig ausbreitende Deckgebirgslösung im Bergwerk kann es zu einer Veränderung des Trag- und Deformationsverhaltens kommen, welches bisher die Basis für die Prognose der weiteren Offenhaltungsphase (ohne Stilllegungsmaßnahmen) bildet.

Die in /IfG 2009/ berechnete Prognose steht unter dem Vorbehalt, dass die Tragelemente und der Versatz nicht mit Deckgebirgslösung durchfeuchtet werden. Bei Durchfeuchtung sind in den Pfeilern Festigkeitsverluste und erhöhte Kriechraten und im Versatz eine Verringerung der Stützwirkung zu besorgen. Die Wirkung der Deckgebirgslösung auf das Kriechverhalten und die Resttragfähigkeit sind noch Gegenstand laufender Untersuchungen. Die Resttragfähigkeit der gebrochenen Tragelemente wurde als ausreichend für eine zeitlich begrenzte Phase angesehen, die ausreichende Resttragfähigkeit bis zum Ende der Stilllegungsphase bei Vollverfüllung ist noch nicht belegt.

Für die Bewertung der Stilllegungsoption Vollverfüllung gehen die Autoren dieses Berichts davon aus, dass bei einer Dauer der Stilllegungsphase bis längstens 2020 und bei einer rei-

nen Verlagerung der Zutrittstellen im Grubengebäude die Resttragfähigkeit des Systems nicht in einer Weise eingeschränkt wird, die eine Umsetzung der Stilllegungsmaßnahmen in Frage stellt.

(ii) Ein Anstieg der Lösungszutrittsrate aus dem Deckgebirge in die Grube auf auslegungsüberschreitende Werte während der Stilllegungsphase kann nicht ausgeschlossen werden. Das entsprechende Risiko ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit des Eintretens und den potenziellen Folgen.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts hängt von der Zeitdauer der Stilllegungsphase ab. Diese beträgt bei der Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung etwa 8 Jahre ab dem Entscheid, dieses Stilllegungskonzept umzusetzen. Die potenziellen Auswirkungen nehmen mit dem Fortschreiten der „ordentlichen" Maßnahmen und in Abhängigkeit von den nach Eintreten des Störfalls noch umsetzbaren Notfallmaßnahmen in beschränktem Maße ab[26].

Die vorgesehenen Stilllegungsmaßnahmen beruhen bzgl. der grundsätzlichen technischen Umsetzung auf bewährten Verfahren nach dem Stand der Technik. Besondere Vorkehrungen sind hinsichtlich des Strahlenschutzes zu treffen, wo die Maßnahmen Kammern mit radioaktiven Abfällen betreffen, in denen kontaminierte Grubenluft und evtl. im Sohlenbereich auch kontaminierte Lösung vorhanden sind. Für diese besonderen Vorkehrungen gibt es noch keine Referenzprojekte.

Aufgrund dieses Merkmals zeichnet sich die Stilllegungsoption Vollverfüllung durch eine relativ gute Planungssicherheit und geringe konzeptspezifische Umsetzungsrisiken aus. Aufgrund der relativ guten Planungssicherheit sind auch erhebliche Zeitverzögerungen bei der Umsetzung, die die Risiken einer signifikant abnehmenden Resttragfähigkeit des Systems Schachtanlage und des auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts anwachsen lassen würden, vermeidbar.

[26] gleichbleibendes Schadstoffinventar, jedoch zunehmende Wirksamkeit der Maßnahmen gemäß Kapitel 4.

6. Systementwicklung in der Phase nach Stilllegung und Bewertung der Langzeitsicherheit

6.1 Mögliche Systementwicklungen

In diesem Kapitel werden mögliche Systementwicklungen in der Phase nach der Stilllegung diskutiert und hinsichtlich der Langzeitsicherheit qualitativ eingeschätzt.

Da eine Einschätzung der Konsequenzen des Stilllegungskonzepts hinsichtlich der Langzeitsicherheit ohne die Durchführung von Modellrechnungen nicht möglich ist und solche Modellrechnungen noch nicht vorliegen, wurde die folgende Vorgehensweise gewählt, um zumindest eine qualitative Einschätzung zu ermöglichen: Es liegen umfangreiche Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit der Schachtanlage für ein Bezugskonzept – der bei Stilllegung gemäß den von HMGU (damals noch GSF) 2007 eingereichten Antragsunterlagen – vor /HMGU 2007/. Die vorläufige Einschätzung der Langzeitsicherheit für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung erfolgt – sofern dies möglich ist – durch Vergleich von Prozessen und Entwicklungen mit dem Bezugskonzept, da dies nach Ansicht der Autoren die einzige Möglichkeit darstellt, eine Langzeitsicherheitseinschätzung überhaupt vorzunehmen. Eine belastbare Bewertung erfordert eine integrierte Sicherheitsanalyse mit umfangreichen Modellrechnungen, welche in der für diesen Bericht zur Verfügung stehenden Zeit nicht durchgeführt werden konnte.

Die zu erwartenden und möglichen Systementwicklungen werden zunächst anhand der relevanten Prozesse und potentiellen Einflüsse auf die Langzeitsicherheit diskutiert. Eine formelle Szenarienanalyse wird nicht ausgeführt und muss ggf. der weiteren Nachweisführung vorbehalten bleiben.

6.1.1 Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke

Nach dem weitgehenden Verfüllen der Resthohlräume im Oberen Baufeld in der Südflanke, des Einbringens der technischen $MgCl_2$-Lösung bis zur Firste der 700-m-Sohle und dem Verschluss der Tagesschächte wird dem Oberen Baufeld in der Südflanke weiterhin Lösung aus dem Deckgebirge zutreten. Die zeitliche Entwicklung der Zutrittsrate hängt maßgeblich von den Verhältnissen im Deckgebirge ab und ist nicht prognostizierbar /BfS 2009d/.

Bei konstanten Verhältnissen im Deckgebirge dürfte der Zufluss mit wachsendem Fluiddruck im verschlossenen Grubengebäude zurückgehen. Für die Annahme von konstanten Verhältnissen im Deckgebirge gibt es jedoch keine belastbare Basis.

Für die nachfolgenden Betrachtungen werden zwei Szenarien unterstellt, die hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Grubengebäude ein breites Spektrum potenzieller Entwicklungen aufspannen:

- eine anhaltende, konstante Zutrittsrate von 12 m^3/d bei unveränderter Sättigung der aus dem Deckgebirge in die Salzstruktur übertretenden Lösung an NaCl

- eine stark anwachsende Rate des Lösungszutritts nach der Stilllegung mit abnehmender NaCl-Konzentration.

Die letztgenannte Entwicklung, für die wir eine vollständige Auffüllung der in der Grube verbliebenen luftgefüllten Porenräume innerhalb von etwa 30 Jahren unterstellen, ist nicht unmöglich und dient hier der Beschreibung einer alternativen Systementwicklung.

Bei anhaltender Sättigung an NaCl beeinflusst bzw. initiiert das Volllaufen mit Deckgebirgslösung folgende Prozesse:

- eine zunächst abwärtsgerichtete, gravitative Fluidbewegung
- Überschichtung der bis zur 700-m-Sohle anstehenden technischen $MgCl_2$-Lösung durch Deckgebirgslösung mit geringerer Dichte
- eine zunehmende Durchfeuchtung des anstehenden Salzgesteins infolge Lösungskontakt
- damit verbunden eine beschleunigte Verformung des Tragsystems und Konvergenz der Grubenbaue
- damit verbunden eine eventuelle Bildung neuer Wegsamkeiten durch die Steinsalzbarriere
- damit verbunden eine aufwärts gerichtete Lösungsverdrängung und eine wachsende Komprimierung der eingeschlossenen und in Gasspeicherorten gespeicherten Grubenluft (vgl. Kapitel 6.1.6)
- ein Anstieg des Fluiddruckes im Grubengebäude auf hydrostatischen Werte bezüglich der Grundwasseroberfläche im Deckgebirge, der
    - aufgrund zunehmender Stützwirkung bremsend auf die Konvergenz wirkt
    - – bei unveränderten Verhältnissen im Deckgebirge – zur Verringerung der Lösungszutrittsrate führt
- Umlöseprozesse am Salzversatz, am Sorelbetonversatz und (sehr langsam) an den gekapselten Carnallititaufschlüssen
- konvektive Lösungsbewegungen oberhalb der Grenzschicht zwischen der eingeleiteten technischen $MgCl_2$-Lösung und der zugetretenen und in Umlöseprozesse involvierten Deckgebirgslösung

Bei abnehmender NaCl-Konzentration der zutretenden Lösung sind zusätzlich zu nennen:

- eine – für die vorliegenden Betrachtungen als instantan anzusehende – Auflösung von Steinsalz mit Bildung von Hohlraum (max. 0,166 m^3 pro Kubikmeter zutretender Lösung[27], s. Kapitel 6.1.2) und Aufsättigung der Deckgebirgslösung bis zur maximalen Sättigungskonzentration (ca. 360 g/l_{H2O})
- Durchmischung der überschichtenden Deckgebirgslösung unterschiedlicher Konzentration im Oberen Baufeld in der Südflanke infolge von starken konvektiven Lösungsbewegungen bei gleichzeitiger Aufsättigung.

[27] Bei vollständiger Aufsättigung eines zunächst NaCl-freien Wassers.

Eine Prognose der wahrscheinlich ablaufenden gebirgsmechanischen Prozesse und Bewertung ihrer Ergebnisse wird in Kapitel 6.1.5 gegeben.

Bei einer unveränderten Sättigung an NaCl und konstanter Zutrittsrate wäre der nach dem Verschluss der Tagesschächte verbliebene luftgefüllte Porenraum in der Südflanke von ca. 950 000 m^3 (/ASS 2009a/) nach etwas mehr als 200 Jahren gefüllt, wenn sich der Porenraum nicht durch gleichzeitig ablaufende Konvergenz verringern würde. Unterstellt man eine nicht unrealistische Erhöhung der Konvergenzrate durch Feuchtekriechen in den Sohlen des Oberen Baufeldes in der Südflanke auf rund $1 \cdot 10^{-2}$ a^{-1}, ist das fluidzugängliche Volumen im Grubengebäude nach etwa 90 Jahren mit Lösung gefüllt, bei einer Konvergenzrate von $3 \cdot 10^{-2}$ a^{-1} bereits nach 50 Jahren[28].

Um im alternativen Szenario den verbliebenen Porenraum in 30 Jahren zu füllen, müsste unter Berücksichtigung der erhöhten Konvergenz die jetzige Zutrittsrate auf etwa 65 m^3/d im zeitlichen Mittel anwachsen. Dabei könnten theoretisch durch Auflösung von Steinsalz bis zu 120 000 m^3 neuer Hohlraum entstehen (wenn man unrealistisch eine völlige Abwesenheit von NaCl im zutretenden Deckgebirgswasser unterstellt).

Mit diesen einfachen Abschätzungen lässt sich die Entwicklung von Porenraum und Lösungssättigung im Oberen Baufeld in der Südflanke unmittelbar nach dem Verschluss der Tagesschächte nicht genau prognostizieren, die Bandbreite einer möglichen Entwicklung aber eingrenzen.

Für die Bewertung wesentlich ist der Umstand, dass ein Austritt von Fluiden (Lösung oder Gas) aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge erst nach dem Ausgleich des Fluiddrucks zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge erfolgen kann. Ein solcher Austritt ist notwendige (jedoch nicht hinreichende) Voraussetzung für einen Übertritt von Schadstoffen in das Deckgebirge und somit relevant für die Langzeitsicherheit (vgl. Kapitel 6.1.8).

Im Vergleich mit der Systementwicklung bei einer Stilllegung gemäß Bezugskonzept /HMGU 2007/ lässt sich zum Konzept der Vollverfüllung folgendes festhalten:

- Der Austritt von Lösung in das Deckgebirge setzt später ein (nach einigen 10 bis rund 100 Jahren nach Verschluss der Tagesschächte, gemäß Bezugskonzept nach rund 6 Jahren). Dies ist hinsichtlich der Langzeitsicherheit ein günstiger Unterschied.
- Durch die längere Phase des ungestützten Feuchtekriechens bis zum Beginn des Lösungsaustritts in das Deckgebirge wird nach dem Erreichen des hydrostatischen Drucks die Konvergenzrate der Grubenbaue und damit die Rate der Lösungsauspressung (als Folge der Konvergenz) geringer sein als bei einer Stilllegung gemäß Bezugskonzept. Dies ist ebenfalls ein günstiger Unterschied.
- Die Prognostizierbarkeit und die Robustheit des Systems sind bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept der Vollverfüllung in Bezug auf die hier angesprochenen Prozesse und Aspekte der Systementwicklung aber deutlich schlechter.

[28] Diese Abschätzung macht hinsichtlich der Druckentwicklung und Konvergenz einzelner Grubenbereiche von stark vereinfachten Annahmen Gebrauch. Verschiedene Ansätze unterschiedlicher Komplexität bestätigen aber diese Zahlen.

6.1.2 Mögliche Um- und Auflöseprozesse am Gestein und Versatz

Die im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II anstehenden Gesteine und der bereits eingebrachte Salzversatz können durch untersättigte Lösungen aufgelöst werden. Dabei können sich auch andere Mineralphasen bilden, sodass bei dieser Umwandlung des vorhandenen Gesteins bzw. Versatzes von Umlösung gesprochen wird. Diese Reaktionen haben direkten Einfluss auf das chemische Milieu (siehe Kapitel 6.1.3) in den betroffenen Grubenteilen und können dort das Porenvolumen verändern.

Die der Grube natürlich oder durch technische Maßnahmen zutretenden Lösungen sind:

- technische $MgCl_2$-Lösung (siehe Kapitel 4.6)
- Deckgebirgslösung: Lösung mit der Zusammensetzung des bisher beobachteten Lösungszutritts (gesättigt an NaCl; untersättigt an $MgCl_2$ und $MgSO_4$)
- veränderte Deckgebirgslösung: Lösung, die sich bezüglich ihrer Zusammensetzung einem Süßwasser annähert (untersättigt an NaCl und anderen Salzen)

Die wesentlichen Salzgesteine in der Grube – anstehend oder als Salzversatz eingebracht – sind:

- anstehendes Steinsalz
- anstehende Kalisalze (Carnallitit und polyhalitische bzw. kieseritische Übergangssalze)
- Eigenversatz mit aufgefahrenem Carnallitit und Übergangssalz (vor allem im Nahbereich der Einlagerungskammern)
- Fremdversatz mit sehr wenigen Kalisalzmineralen (vor allem im Oberen Baufeld in der Südflanke)

Auf- und Umlösungspotenzial im unteren Grubengebäude

Die technische $MgCl_2$-Lösung, welche gemäß Vollverfüllungskonzept bis zur 700-m-Sohle eingeleitet werden soll, ist an NaCl gesättigt. Das anstehende Steinsalz wird daher durch diese nicht auf- oder umgelöst. Bei Kontakt der technischen $MgCl_2$-Lösung mit dem in der Schachtanlage Asse II anstehenden Carnallitit und den Übergangssalzen ist eine weitere Lösungsentwicklung über die Lösungszusammensetzung am Punkt R hinaus bis zum Punkt Z möglich. Dabei können Carnallitit und Übergangssalze entsprechend umgelöst werden, wenn in diesen Gesteinen auch Bischofit vorkommt und lösungszugänglich ist. Diese Reaktion ist aufgrund des sehr geringen Aufschlussgrades entsprechender Salze im Grubengebäude jedoch vernachlässigbar. Für die Kalisalze im eingebrachten Eigenversatz, gilt die Aussage zu den anstehenden Kalisalzen analog, da der Eigenversatz durch Auffahrungen von Grubenbauen in anstehenden Gesteinen entstanden ist. Da im Fremdversatz die Kalisalzgehalte sehr gering sind, ist auch die Umlösung an Fremdversatz vernachlässigbar.

Durch Kontakt mit den Inhaltsstoffen der Einlagerungskammern, insbesondere mit Zement, wird die ursprüngliche technische $MgCl_2$-Lösung umgewandelt (siehe Kapitel 6.1.3.) Infolge dessen sind die umgewandelten Lösungen mehr oder weniger an Ca-Salzen angereichert

und/oder an Mg-Salzen untersättigt. Sie besitzen daher ein gewisses Umlösepotenzial in Kontakt mit Kalisalzen und auch Sorelbetonbarrieren.

In der Umgebung der Einlagerungskammern kommen die aus den Einlagerungskammern austretenden, an Mg-Salzen untersättigten Lösungen mit Eigenversatz in Kontakt, der neben Steinsalz auch aufgefahrenen Carnallitit und Übergangssalz in stark variierenden Anteilen enthält. Da im Eigenversatz die Kalisalze gut aufgeschlossen sind, setzen hier Umlöseprozesse ein, die aufgrund der relativ hohen Mengen – verglichen zu den Lösungsmengen – schnell zu einer Aufkonzentration der aus den Einlagerungskammern austretenden Lösungen an Mg-Salzen führen. Daher ist das Umlösepotenzial solcher aus den Einlagerungskammern austretenden veränderten Lösungen für anstehende Kalisalzgesteine, die zudem soweit möglich mit Sorelbeton gekapselt sind, stark eingeschränkt.

Im Carnallitit-Baufeld treten die aus den Einlagerungskammern austretenden Lösungen außerdem mit Altversatz in Kontakt, der Rückstände aus der Kaliaufbereitung und damit auch Kalisalze in stark variierenden, jedoch eher geringen Anteilen enthält. Da hier der anstehende Carnallitit gut aufgeschlossen ist, setzen Umlöseprozesse an den anstehenden Carnallitit-Pfeilern ein. Diese von Umlösung betroffenen Gesteinsbereiche sind jedoch vernachlässigbar gering.

Auf- und Umlösungspotenzial im oberen Grubengebäude bei weitgehend unveränderter Zusammensetzung der Deckgebirgslösung

Oberhalb der 700-m-Sohle wird dem Konzept Vollverfüllung folgend die Grube durch zutretende Deckgebirgslösung volllaufen. Da die Deckgebirgslösung an NaCl gesättigt ist, wird diese ohne Änderung ihrer Zusammensetzung das anstehende Steinsalz und auch das Steinsalz im Salzversatz (Eigenversatz und Fremdversatz) nicht auf- bzw. umlösen.

Die in diesen Teufen anstehenden Carnallititbereiche, insbesondere in den Abbaubegleitstrecken, werden durch Sorelbetonbarrieren gekapselt (siehe Kapitel 4.1.2). Diese Kapselung bewirkt eine deutliche Reduzierung der Anströmfläche und -geschwindigkeit an den aufgeschlossenen Carnallititbereichen. Es ist zu erwarten, dass durch die Kapselung mit Sorelbeton die Umlösung insgesamt langsam abläuft und von geringer Intensität ist. Aufgrund der Auflockerungszonen in den Konturbereichen der Strecken im Carnallitit kann jedoch eine Umlösung des Carnallitits nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Für die Dimensionierung der Kapselung ist zu berücksichtigen, dass Sorelbeton in NaCl-Lösung erst ab einem gewissen $MgCl_2$-Gehalt stabil ist (vgl. Kapitel 6.1.3).

Die Lösungszusammensetzung im Oberen Baufeld in der Südflanke kann sich zeitlich ändern, denn die Lösung tritt dort mit Eigenversatz und Fremdversatz in Kontakt, welche unterschiedliche Anteile an Kalisalzen enthalten. Dadurch setzen Umlöseprozesse ein, die zur begrenzten Aufsättigung der zugetretenen Deckgebirgslösung an Mg-Salzen führen. Dies reduziert die Umlöseprozesse an anstehendem Gestein zusätzlich zur Kapselung durch Sorelbeton. Die Änderungen des Feststoffvolumens bei diesen Umlösereaktionen sind gering.

Dies bedeutet:

- Die Entstehung von neuen strömungswirksamen Wegsamkeiten durch Lösungsprozesse im Grubengebäude kann vernachlässigt werden.
- Die Entstehung von neuen konvergenzaktiven Volumina kann generell vernachlässigt werden.
- Es wird nur zu einer vernachlässigbaren Entfestigung des Gesteins kommen.
- Die Änderung der Lösungsdichte wird gering sein. Dadurch sind auch keine signifikanten dichtebedingten Konvektionen zu erwarten, die zu einer Durchmischung der aus der MAW-Kammer stammenden kontaminierten Lösung führen könnten.

Auf- und Umlösungspotenzial im oberen Grubengebäude bei sich verändernder Zusammensetzung der Deckgebirgslösung

Falls sich die chemische Zusammensetzung der zutretenden Deckgebirgslösung ändert, sodass diese an NaCl untersättigt ist, kann auch Steinsalz (Halit) im Salzversatz und im anstehenden Gestein umgelöst werden. Im Oberen Baufeld in der Südflanke würde die an NaCl untersättigte Lösung mit Eigenversatz und Fremdversatz in Kontakt treten. Es würden Lösungs- und Umlöseprozesse einsetzen, die u. a. zur Aufsättigung der Deckgebirgslösung an NaCl führen. Dieser Effekt wird zwar bevorzugt in den Versatzkörpern erfolgen, kann aber am anstehenden Steinsalz nicht ausgeschlossen werden.

Dies hätte folgende Auswirkungen auf das System:

- Es werden neue konvergenzaktive Volumina gebildet.
- Durch Entfestigung im Steinsalz wird die Tragfähigkeit des Grubengebäudes verringert.
- Es können neue strömungswirksame Wegsamkeiten entstehen.
- Lösungsbewegungen können kanalisiert werden.

Konsequenzen der Auf- und Umlösungspotenziale im Grubengebäude

Die möglichen Umlöseprozesse durch der Grube natürlich oder durch technische Maßnahmen zutretende Lösungen in Kombination mit den anstehenden Gesteinen und dem bereits eingebrachten Salzversatz werden in Tab. 4 zusammengefasst.

Die für die Einleitung in die unteren Grubenbaue vorgesehene technische $MgCl_2$-Lösung (R-Lösung, siehe Kapitel 4.6) weist eine chemische Zusammensetzung auf, mit der eine Umlösung an allen in der Grube anstehenden Gesteinen und Versatzstoffen sehr gering ist. Die Umlöseprozesse im unteren Grubenbereich werden damit insgesamt als vernachlässigbar eingeschätzt. Dies ist vergleichbar zum Bezugskonzept.

Tab. 4: Mögliche Umlösungen bei den in der Schachtanlage Asse II auftretenden relevanten Kombinationen von anstehendem Gestein bzw. eingebrachtem Salzversatz und Lösungen

Gestein / Versatzsalz	technische $MgCl_2$-Lösung	Deckgebirgslösung	NaCl-untersättigte Deckgebirgslösung
Carnallitit und polyhalitische bzw. kieseritische Übergangssalze	vernachlässigbar	ja	ja
Steinsalz	vernachlässigbar	vernachlässigbar	ja
Eigenversatz mit aufgefahrenem Carnallitit und Übergangssalz (vor allem im Nahbereich der Einlagerungskammern)	vernachlässigbar	ja	ja
Fremdversatz mit sehr wenigen Kalisalzmineralen (vor allem im Oberen Baufeld in der Südflanke)	vernachlässigbar	vernachlässigbar	ja

Die aus dem Deckgebirge zutretende Lösung ist in der bisher beobachteten Zusammensetzung an NaCl gesättigt sowie bezüglich $MgCl_2$ und $MgSO_4$ untersättigt. Sie kann Steinsalz nicht auflösen. Gegenüber Carnallitit und anderen Kalisalzen besteht aber ein relevantes Umlösepotenzial. Im Bezugskonzept /HMGU 2007/ ist dies wegen der Einleitung des Schutzfluids bis ins Grubenhöchste nicht möglich. Die Umlösungen im anstehenden Salzgestein und bereits eingebrachten Versatz sind daher im oberen Grubengebäude (oberhalb von 679 m Teufe) in der Stilllegungsoption Vollverfüllung potenziell größerer als im Bezugskonzept. Bei unveränderter Zusammensetzung der Deckgebirgslösung sind jedoch die Auswirkungen der Umlösung bei wirksamer Kapselung der Carnallititbereiche durch Sorelbetonbarrieren von ähnlich geringer Bedeutung wie im Bezugskonzept. Sie wirken sich nicht nachteilig auf die Langzeitsicherheit aus.

Falls sich die chemische Zusammensetzung der Deckgebirgslösung in Richtung einer NaCl-Untersättigung ändert, könnte diese Lösung auch Steinsalz auflösen. Die dann stärkeren Auf- und Umlösungen im Salzgestein und Versatz beeinträchtigen sowohl das Tragsystem des Grubengebäudes als auch den Transport von Radionukliden; beispielsweise können während des Volllaufens ausgeprägte Fließwege entstehen, die dann später zur Beschleunigung und Erhöhung des Schadstofftransports in der Grube führen. Die Lösungs- und Umlöseprozesse im anstehenden Gestein sind unter diesen Bedingungen von größerer Bedeutung als im Bezugskonzept, da relevante Entfestigungen des Gesteins und große, neue konvergenzaktive Volumina entstehen können. Die Auswirkungen auf das Systemverhalten im oberen Grubenbereich sind beim Stilllegungskonzept Vollverfüllung dadurch ungünstiger als beim Bezugskonzept, sowohl bezüglich der Prognose des Systemverhaltens als auch bezüglich der Schadstoffausbreitung.

6.1.3 Chemisches Milieu in den verschiedenen Grubenbereichen

Das chemische Milieu wird von der Zusammensetzung der Lösungen, Gase und Festphasen bestimmt, die sich einem chemischen Gleichgewichtszustand annähern. Geochemische Prozesse sind chemische und mikrobielle Reaktionen. Deren Qualität und Quantität hängen von den beteiligten reaktiven Stoffen ab.

Chemisches Milieu den LAW-Einlagerungskammern

Das initiale Milieu in einer Einlagerungskammer wird vor allem vom stofflichen Inventar der Abfallprodukte /BUC 2006a/ sowie von Menge und Zusammensetzung des noch einzubringenden Brucitmörtels und der noch einzubringenden technischen $MgCl_2$-Lösung bestimmt. Mit dem Einbringen der technischen $MgCl_2$-Lösung setzen die Wechselwirkungen zwischen dieser und den reaktiven Kammerinhaltsstoffen ein. Die wesentlichen Prozesse sind dabei

- die Korrosion von Metallen,
- die Korrosion des Zements der Abfallprodukte,
- die Umsetzung des Versatzstoffes Brucitmörtel,
- die mikrobielle Degradation von organischen Bestandteilen sowie
- die Umsetzung von Salzmineralen im Versturzsalz und im Wirtsgestein.

Diese Prozesse hängen voneinander ab. Entsprechend den unterschiedlichen stofflichen Inventaren der Abfallprodukte sowie den unterschiedlichen Mengen an Brucitmörtel und technischer $MgCl_2$-Lösung wird die Bedeutung der verschiedenen Prozesse in den einzelnen Einlagerungskammern variieren. Die in den Einlagerungskammern ablaufenden chemischen Reaktionen sind im Detail zwar komplex, lassen sich aber auf Basis chemischer Gesetzmäßigkeiten auf wenige Prinzipien zurückführen /INE 2006a/ und mit geeigneten geochemischen Modellen beschreiben. Die zeitlichen Verläufe (Kinetik) der Reaktionen hingegen unterscheiden sich teilweise deutlich bzw. sind für einige Reaktionen bisher nicht umfassend bekannt /INE 2006a/.

Metallkorrosion

Durch die Metallkorrosion, insbesondere die des Eisens, werden vor allem Wasserstoff und sekundäre Festphasen gebildet. Die Eisenkorrosion beeinflusst das chemische Milieu im Wesentlichen über die Einstellung der Redoxbedingungen.

Mit dem Einbringen der durch die Grubenluft an Sauerstoff gesättigten, technischen $MgCl_2$-Lösung in die Einlagerungskammern wird an den Außenseiten der Abfallbehälter aerob-feuchte Eisenkorrosion (zunächst ohne Wasserstoffbildung) einsetzen; an den Innenseiten der Behälter und den Metallteilen im Abfallprodukt hat die Korrosion durch Einwirken der Porenlösung des Abfallprodukts bereits begonnen. Sobald diese Korrosions- und auch mikrobielle Degradationsprozesse den gesamten Sauerstoff verbraucht haben, schlägt das Redoxmilieu um. In der Folge wird das Eisen unter den dann anaerob-feuchten Bedingungen mit deutlich geringerer Rate korrodiert, aber Wasserstoff gebildet (vgl. Kapitel 6.1.4).

Zementkorrosion

Im Kontakt mit der technischen $MgCl_2$-Lösung ist der Zementstein aus den Abfallprodukten (Matrix und Verlorene Betonabschirmungen, VBA) chemisch instabil. Die Zementkorrosion erfolgt in mehreren Schritten bis zur vollständigen Umsetzung des Zements in wenigen Jahrzehnten. Aus der initial stark alkalischen Porenlösung in der Zementmatrix des Abfallprodukts werden sich nach vollständiger Umsetzung des Zements in einer Einlagerungskammer je nach dem Verhältnis von Zement und Lösungsmenge alkalische, $MgCl_2$-reiche Lösungen (pH ≈ 7 bis 9) oder stark alkalische, $CaCl_2$-dominierte Lösungen (pH ≈ 9 bis 11) einstellen.

Anorganische Kohlenstoffverbindungen (siehe unten, Mikrobielle Degradation) bzw. gelöste Karbonatspezies werden mit Zement reagieren, wodurch sich Ca-haltige Karbonate bilden, welche die Karbonatkonzentration in Lösung und damit den pH-Wert puffern können /INE 2006a/.

Brucitumsetzung

Der in die Einlagerungskammern einzubringende Brucitmörtel enthält große Mengen an Brucit, $Mg(OH)_2$. Im Kontakt mit der technischen $MgCl_2$-Lösung wird Brucit schrittweise zu Sorelphasen umgesetzt. Bei einem Lösungsüberschuss erfolgt dies vollständig in wenigen Jahren. Durch intensive Nachlösung von Halit erfolgt die Umsetzung des Brucits zu Sorelphase vollständig. Die resultierende Lösung ist eine NaCl-Lösung mit merklichem aber geringem $MgCl_2$-Gehalt entsprechend dem Gleichgewicht der Sorelphase mit der Lösung. Dies setzt jedoch die vollständige Zugänglichkeit des Brucits voraus.

Bei der Bildung größerer Mengen an anorganischen Kohlenstoffverbindungen (siehe unten, Mikrobielle Degradation) werden Brucit und Sorelphasen mit den gelösten Karbonatspezies reagieren, wodurch sich Mg-Hydroxo(chloro)karbonate bilden, welche die Karbonatkonzentration und damit den pH-Wert im alkalischen Bereich puffern können /INE 2006a/.

Mikrobielle Degradation von organischen Stoffen

Die Abfälle enthalten beträchtliche Mengen an organischen Bestandteilen, z. B. Papier, Kunststoffe und organische Chemikalien /BUC 2006a/. Aus organischen Bestandteilen können sich durch mikrobielle Abbauprozesse anorganische Kohlenstoffverbindungen – wie gasförmiges oder gelöstes CO_2, Karbonatlösungsspezies und feste Karbonatphasen – bilden. Für die Entwicklung des chemischen Milieus ist die Konzentration an gelöstem CO_2 bzw. an Karbonatlösungsspezies bedeutsam, welche durch Carbonate, Hydroxocarbonate und andere carbonathaltige Feststoffe gepuffert wird (siehe oben).

Bei einem ungünstigen Verhältnis von Zement- und Brucitmenge zur Menge an anorgischem Kohlenstoff, d. h. bei einer höheren Stoffmenge an gelöstem CO_2 als an gelöstem Ca^{2+} und Mg^{2+} in einer Einlagerungskammer, wäre mittel- bis langfristig eine Verringerung des pH-Werts bis hin zu einer Versauerung des Milieus (pH ≈ 4 bis 7) nicht auszuschließen /INE 2006a/.

Nachlösung von Salzmineralen im Versatz und im anstehenden Gestein

Zum Zeitpunkt der Einleitung befindet sich die technische $MgCl_2$-Lösung weitgehend im Gleichgewicht mit den anstehenden Stein- und Kalisalzen sowie mit dem Salzversatz (mit Ausnahme von Bischofit, siehe dazu Kapitel 6.1.2). Durch die chemischen Reaktionen mit den Kammerinhaltsstoffen, insbesondere Zement, werden sich die Lösungszusammensetzungen jedoch ändern (siehe oben). In der Folge können Salzminerale, wie z. B. Anhydrit, Polyhalit, Carnallit, Kieserit und ggf. Halit nachgelöst werden, bis die Sättigungskonzentrationen in den Lösungen erreicht werden.

In einigen Einlagerungskammern sind neben Steinsalz auch Kalisalze, wie Carnallitit und polyhalitische bzw. kieseritische Übergangssalze aufgeschlossen /BfS 2009b/. Die verfügbaren Mengen an Kalisalzen sind jedoch so gering, dass der Einfluss auf das chemische Milieu unwesentlich ist. Dagegen ist Steinsalz unbegrenzt verfügbar und der Einfluss der Halitnachlösung auf die Lösungszusammensetzung eventuell relevant /INE 2006a/ (siehe Brucitumsetzung, oben).

Zeitliche Entwicklung des chemischen Milieus in den LAW-Einlagerungskammern

Mit der Zeit können sich die initialen Milieubedingungen signifikant verändern, vor allem durch die mikrobielle Degradation organischer Bestandteile zu CO_2 und den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern. Mikrobielle Degradation von organischen Stoffen zu CO_2 und die Bildung von neuen Karbonatlösungsspezies bzw. -festphasen werden das chemische Milieu in den Einlagerungskammern mit der Zeit verändern. Diese Veränderungen sind im Wesentlichen von der Menge und Art des organischen Materials in den Einlagerungskammern abhängig.

Durch hydraulische Wegsamkeiten zu benachbarten Grubenbauen und Lösungsbewegungen, die durch Konvergenz, Gasspeicherung und Konvektion angetrieben werden, kann ein mehr oder weniger starker Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern entweder mit technischer $MgCl_2$-Lösung aus dem Nahbereich der Einlagerungskammer oder mit Lösungen aus benachbarten Einlagerungskammern, deren Zusammensetzungen wiederum einer zeitlichen Veränderung unterliegen können, stattfinden. Die Veränderungen der Lösungszusammensetzung in einer Einlagerungskammer sind abhängig von der Größe und Art der zutretenden Lösung. Diese können von denen im Bezugskonzept abweichen. Es wird erwartet, dass das Lösungsvolumen in den Einlagerungskammern wegen anfänglich höherer Lösungsbewegung infolge höherer Konvergenzraten und geringerer Porenvolumina schneller ausgetauscht wird. Die Volumenströme und Strömungsrichtungen zwischen den einzelnen Einlagerungskammern und den benachbarten Grubenbauen sind für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung bisher noch nicht untersucht worden. Daher sind die langzeitigen Entwicklungen des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung gegenwärtig nicht sicher prognostizierbar.

Schlussfolgerung

Bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung ergeben sich im Hinblick auf das chemische Milieu in den Einlagerungskammern und dessen Entwicklungen im Vergleich mit

der Stilllegung gemäß dem zur Verfügung stehenden Bezugskonzept folgende Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten:

- Die das geochemische Milieu einer Einlagerungskammer und dessen Entwicklung bestimmenden chemischen Reaktionen bzw. Prozesse sind prinzipiell die gleichen.
- Das initiale chemische Milieu ist in etwa gleich, da sich Abfall- und Versatzmengen sowie initiale Lösungsmengen (Porenvolumen) nicht merklich unterscheiden.
- Die langzeitige Entwicklung des Milieus unter Berücksichtigung des Lösungsaustausches und der CO_2-Bildung kann ohne Spezialrechnungen nicht vorausgesagt werden. Der Austausch kann deshalb sowohl vorteilige als auch nachteilige Auswirkungen gegenüber dem Bezugskonzept aufweisen.

Die geringere Prognosefähigkeit des Systemverhaltens für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung gegenüber dem Bezugskonzept wird als geringfügig negativ eingeschätzt.

Chemisches Milieu in der Umgebung der LAW-Einlagerungskammern

Im Umfeld der Einlagerungskammern wird das chemische Milieu vor allem von der aus den Einlagerungskammern austretenden Lösungen, vom eingebauten Sorelbeton und von den aufgeschlossenen Gesteinen beeinflusst. Wichtig ist das chemische Milieu für

- evtl. Umlösung von aufgeschlossenem Carnallitit und Übergangssalz und
- die chemische Stabilität der technischen Bauwerke aus Sorelbeton, wie die Sorelbetonbarrieren und die Resthohlraumverfüllung.

In der Umgebung der Einlagerungskammern treten Lösungen mit Eigenversatz in Kontakt, der auch aufgefahrenen Carnallitit und Übergangssalz enthält. Dort setzen Umlöseprozesse ein, wodurch sich die aus den Einlagerungskammern austretenden Lösungen an Mg-Salzen aufsättigen, sofern sie diesbezüglich untersättigt sind. Die Aufsättigung würde auch an anstehenden Kalisalzen erfolgen. In Grubenbereichen mit Sorelbeton sind die anstehenden Kalisalze jedoch gekapselt, d. h. die Anströmflächen sind sehr gering und Umlösungen daher stark eingeschränkt, siehe Kapitel 6.1.2.

Laboruntersuchungen und Modellrechnungen belegen, dass Sorelbeton in der ursprünglichen technischen $MgCl_2$-Lösung chemisch langzeitstabil ist /INE 2002/. Aus den Einlagerungskammern treten jedoch – je nach dem Verhältnis von Zement und Lösungsmenge – mehr oder weniger an Ca-Salzen angereichert und/oder an Mg-Salzen untersättigte Lösungen aus. Im Kontakt mit solchen Lösungen befindet sich Sorelbeton nicht im chemischen Gleichgewicht mit der Lösung. Je nach Lösungszusammensetzung benötigt es einen geringem Umsatz von etwa 50 g bzw. 0,24 mol Sorelphasen pro kg H_2O (in Lösung) bei einer NaCl-Lösung bis sich der Sorelbeton und zementbeeinflusste Lösung im Gleichgewicht /INE 2002/ befinden[29], bei $CaCl_2$-dominierten Lösungen jedoch deutlich mehr. Aufgrund der begrenzten Mengen aus der Kammer austretenden Lösungen mit eventuellem Umlösepotenzial gegenüber Sorelphasen ist eine tiefgreifende Schädigung von Sorelbetonbauwerken nicht zu erwarten.

[29] Das entspricht einer Salzlösung mit 0,5 mol Mg^{2+} pro kg H_2O.

Die relevanten chemischen Prozesse in der Umgebung der Einlagerungskammern sind von etwa gleicher Bedeutung wie im Bezugskonzept. Ihre Auswirkungen sind daher prinzipiell als neutral im Vergleich zum Bezugskonzept zu bewerten.

Chemisches Milieu im oberen Baufeld in der Südflanke

Im Oberen Baufeld in der Südflanke ist das chemische Milieu oberhalb von 679 m Teufe von der zutretenden Deckgebirgslösung, vom eingebauten Sorelbeton und von den aufgeschlossenen Gesteinen geprägt. Bei einem stofflich weitgehend unveränderten Lösungszutritt ist aufgrund der relativ großen Mengen an Sorelbeton mit einer neutralen bis schwach alkalischen, Mg-haltigen Lösungszusammensetzung zu rechnen. Wichtig ist das chemische Milieu für

- die Umlösung von aufgeschlossenem Carnallitit und
- die chemische Stabilität der technischen Bauwerke aus Sorelbeton, wie die Verfüllung der Firstspalten, des MAW-Bereiches sowie der Tages- und Blindschächte.

Die derzeit zutretende Deckgebirgslösung besitzt nur einen sehr geringen Mg-Gehalt. Da die Sorelphasen erst bei 0,5 mol Mg^{2+} pro kg H_2O chemisch stabil /INE 2002/ sind, ist die Korrosion von Sorelbeton möglich. Die Löslichkeitsgrenze des Sorelphase wird nach einem geringen Umsatz erreicht (siehe oben). Es werden also verhältnismäßig geringe Mengen Sorelbeton korrodiert. Da zudem große Mengen an Sorelbetonversatz zur Hohlraumverfüllung vorhanden sein werden, werden die Umlösung von Sorelphasen und die Aufkonzentration der Deckgebirgslösung vor allem an diesen stattfinden. Das Korrosionspotenzial gegenüber den Sorelbetonbarrieren wird dadurch erheblich gemindert.

Die anstehenden Carnallititbereiche werden durch Sorelbetonbarrieren gekapselt, siehe Kapitel 6.1.2. Dadurch ist die Möglichkeit von Umlösung am Carnallitit zwar gering, aber aufgrund von Auflockerungszonen nicht ausgeschlossen. Es ist zu erwarten, dass die Umlösung langsam und in der Intensität sehr begrenzt verläuft, über lange Zeiten aber zur Aufsättigung der Lösung an Mg-Salzen führen wird. Gleiches gilt auch für die Firstspalt- und Resthohlraumverfüllung sowie auch für die Verfüllungen der Tages- und Blindschächte im Oberen Baufeld in der Südflanke mit Sorelbeton.

In der MAW-Kammer im oberen Grubengebäude wird ein schwach alkalisches, Mg-betontes Milieu erwartet. Das anfängliche chemische Milieu in der MAW-Kammer wird zwar von der zutretenden Deckgebirgslösung bestimmt, aber mit der Sorelbetonkorrosion langzeitig durch den umgebenden Sorelbeton gepuffert. Bei weitgehend unverändertem Salzlösungszutritt ist das chemische Milieu ähnlich dem im Bezugskonzept, wenn dort Lösung in die MAW-Kammer eindringt (vgl. /INE 2006a/).

Im Zuge der Konvergenz des Grubengebäudes wird sich die Grenzschicht zwischen der eingeleiteten technischen $MgCl_2$-Lösung und der überschichteten natürlich zugetretenen Deckgebirgslösung stetig nach geringeren Teufen verlagern (siehe Kapitel. 6.1.6).

Mit dem eventuellen Zutritt veränderter, an NaCl untersättigter Deckgebirgslösung ist keine wesentlich andere Entwicklung als bei normalem Deckgebirgszufluss zu erwarten, da sich

die NaCl-Untersättigung sehr rasch durch Auflösung von anstehendem Steinsalz und Steinsalz im Versatz (Fremdversatz und Eigenversatz) aufkonzentrieren wird.

Für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung ergibt sich folgende Einschätzung:

- Das chemische Milieu im Oberen Baufeld in der Südflanke unterscheidet sich zu Beginn deutlich, da anstelle der Einleitung von einem Schutzfluid Deckgebirgslösung zutritt. Da wie im Bezugskonzept von einer Rückhaltung von Schadstoffen in diesem Bereich kein Kredit genommen wird, ist das chemische Milieu in diesem Grubenbereich ohne Einfluss. Die Auswirkungen sind daher prinzipiell als neutral im Vergleich zum Bezugskonzept zu bewerten.
- Das chemische Milieu in der MAW-Kammer ist nach Auffüllung mit Deckgebirgslösung ähnlich dem im Bezugskonzept; die zu erwartenden Unterschiede sind gering. Die Auswirkungen sind daher prinzipiell als neutral im Vergleich zum Bezugskonzept /HMGU 2007/ zu bewerten.

Die Auswirkungen bezüglich der Umlösung sind bereits in Kapitel 6.1.2 besprochen worden.

6.1.4 Gasbildung

Gase sind zu allen Zeiten in der Grube vorhanden, während der Stilllegungsphase Luft unter Atmosphärendruck, zu späteren Zeiten komprimierte Luft – wenn zufließende Lösungen das Entweichen der Luft behindern – und Gase, die durch die Gasbildung im Grubengebäude entstehen. Gasbildende Stoffe liegen in den Einlagerungskammern (radioaktive Abfälle und Behälter) und in übrigen Grubenbauen (konventionelle Abfälle) vor.

Durch die folgenden Prozesse wird in der Nachbetriebsphase im Grubengebäude Gas gebildet:

- Anaerobe Korrosion von Metallen unter Bildung von Wasserstoff
- mikrobielle Degradation von organischen Bestandteilen
- radiolytische Spaltung bzw. Radiolyse[30] von Molekülen der Abfallmatrizes, der Versatzstoffe und der Lösung
- Bildung von Helium und radioaktiven Gasen durch radioaktiven Zerfall

Die Bildung von Wasserstoffgas dominiert sowohl die totalen Gasvolumina als auch die totalen Gasbildungsraten. Es folgt mit deutlich geringeren Gasvolumina die mikrobielle Umsetzung von organischen Bestandteilen, wobei sich vor allem CO_2 und CH_4 bilden. Zu frühen Zeiten bildet sich dabei bevorzugt CO_2, später verstärkt CH_4, wobei langzeitig ein ausgeglichenes Verhältnis der Gasvolumina erwartet wird /IST 2006a/. Das Verhältnis kann in Abhängigkeit der Entwicklung des chemischen Milieus stark variieren, sowohl zugunsten von CO_2 als auch zugunsten von CH_4. Radiolyse leistet einen im Vergleich zu den beiden zuvor genannten Prozessen vernachlässigbaren Beitrag zur Gasbildung. Die Bildung von Helium

[30] Unter Radiolyse wird die Zerlegung einer chemischen Verbindung unter Einwirkung einer ionisierenden Strahlung verstanden.

und radioaktiven Gasen durch radioaktiven Zerfall ist im Vergleich mit den anderen Prozessen sehr gering und kann gänzlich vernachlässigt werden.

Maßgebend für die pro Zeiteinheit kumuliert gebildeten Gasmengen sind u. a. die Inventare an gasbildenden Stoffen. Für die Gasbildung durch Metallkorrosion sind es die Inventare an Eisen, Aluminium und Zink, für die mikrobielle Gasbildung die Inventare an organischen Stoffen. Die Abfälle in den Einlagerungskammern beinhalten eine Vielzahl organischer Bestandteile, wie Zellulose, Mischabfälle, Bitumen und Kunststoffe. Die organischen Stoffe in den übrigen Grubenbauen sind u. A. Holz und Kunststoffe. Das stoffliche Inventar in den Einlagerungskammern ist in /BUC 2004/ nachvollziehbar berechnet worden, dagegen das Inventar an Gas bildenden Stoffen im übrigen Grubengebäude nur abgeschätzt worden.

Die korrosiven und mikrobiellen Gasbildungsraten hängen neben dem Inventar wesentlich vom chemischen Milieu ab (vgl. Kapitel 6.1.3). Durch das anfänglich neutrale bis schwach alkalische Milieu im übrigen Grubengebäude dürfte die Metallkorrosion, welche die Gasbildungsrate und -menge anfangs dominiert, dort schneller ablaufen als in den Einlagerungskammern, in denen ein alkalisches bis stark alkalisches Milieu erwartet wird.

Bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung ergeben sich im Hinblick auf die Gasbildung in den Einlagerungskammern im Vergleich mit der Stilllegung gemäß Bezugskonzept folgende Ähnlichkeiten:

- Die Gasbildung und deren zeitliche Entwicklung werden durch die gleichen chemischen und mikrobiellen Reaktionen bzw. Prozesse bestimmt.
- Die gebildeten Gesamtgasmengen sind in etwa gleich, da sich die Gas bildenden Inventare nicht deutlich unterscheiden.
- Die initialen Gasbildungsraten sind sehr ähnlich, da neben den Inventaren auch die initialen Milieubedingungen, insbesondere die pH-Werte, unverändert sind.

Der zeitliche Verlauf der Gasbildungsraten in den Einlagerungskammern kann wegen der ungewissen Entwicklung des geochemischen Milieus (vgl. Kapitel 6.1.3) nicht vorausgesagt werden. Die eingeschränkte Prognosefähigkeit für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung wird als geringfügig negativ eingeschätzt.

Der Zutritt von Deckgebirgslösung in das Obere Baufeld in der Südflanke und die hohen Sorelbetonmengen führen zu einem anderen chemischen Milieu in diesem Baufeld als im Bezugskonzept. Dies kann zu veränderten Gasbildungsraten führen. Wegen der geringen Inventare an Gas bildenden Stoffen in diesem Teil des Grubengebäudes und den somit geringen Gasmengen wird dieser Unterschied als neutral bewertet.

6.1.5 Gebirgsmechanische Entwicklung und Konvergenz der Grubenbaue

Bezüglich der gebirgsmechanischen Einwirkungen und Prozesse beim natürlichen Volllaufen in der Phase nach Schließung der Schächte bietet sich gleichfalls ein Vergleich zum Bezugskonzept /HMGU 2007/ an: Die Systemanalyse für das Bezugskonzept für ein zügiges Einleiten von Schutzfluid zeigte eine deutliche Aktivierung der Deckgebirgsverschiebungsraten in der gesamten Südflanke (bis zu den oberen Sohlen). Da in diesem Konzept die Einhal-

tung der degressiven (oder zumindest gleichbleibenden) Tendenz der Raten und der Ausschluss von dynamischen Aktivierungen im Deckgebirge gefordert wurden, war die Planung eines zusätzlichen pneumatischen Stützdruckes notwendig. Infolge der schnellen Schutzfluideinleitung konnte sich zügig ein hydrostatischer Stützdruck aufbauen, der die mit der Einleitung verbundenen Reaktionen Feuchtekriechen, Stabilitätsverringerung, Versatzdruckabfall und Deckgebirgsaktivierung kompensierte. Durch den hydrostatischen Innendruck entsteht ein robustes und prognostizierbares Systemverhalten. Die Resttragfähigkeit der Pfeiler und Schweben wurde als ausreichend bewertet.

In der Option Vollverfüllung sind folgende Einwirkungen zu beachten:

- Das im Vollverfüllkonzept auftretende langsame natürliche Volllaufen aller Porenräume und Hohlräume mit Deckgebirgslösung ist während des jeweiligen Füllens der Sohlen durch eine gebirgsmechanische Aktivierung (Feuchtekriechen, Stabilitätsverringerung, Versatzdruckabfall, Deckgebirgsaktivierung) charakterisiert, während dessen auf den oberen Sohlen eine weitere Versatzdruckerhöhung stattfindet. Eine zügige Stützung des Systems durch den hydrostatischen Druckaufbau, begleitet durch den pneumatischen Stützdruck, erfolgt nicht. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Deckgebirgslösung über singuläre Risse einen Weg in die tieferen Grubenfeldbereiche sucht und sich dort von unten nach oben aufstapelt. Eine großräumige Durchfeuchtung wird erst mit der Aufstapelung, nicht jedoch schon mit dem lokalen Fluss nach unten, angenommen. Inwieweit positive Effekte auf den oberen (noch trockenen Sohlen) wie geringere Deckgebirgsverschiebungsraten aufgrund höherer Versatzdrücke in den Abbauen, die durch die Firstspaltverfüllung unterstützt werden, oder ob negative Effekte wie stärkere Schädigungen in den Tragelementen und im Deckgebirge sowie die gebirgsmechanische Schwächung und Aktivierung des unteren Auflagers für die Südflanke (gefluteter Teufenbereich bis zur 700-m-Sohle) überwiegen, kann nur mit Modellrechnungen beurteilt werden. Gegenwärtig kann keine Aussage zur gebirgsmechanischen Zulässigkeit getroffen werden.
- In der Phase des natürlichen Volllaufens ist von einer zunehmenden Durchfeuchtung des Tragsystems mit Deckgebirgslösung auszugehen. Nach Abstimmung mit der BGR sind die Konsequenzen auf die Resttragfähigkeit des Steinsalzes zu untersuchen. Dies betrifft insbesondere die Wirkung eines hydrostatischen Druckaufbaus der Deckgebirgslösung in den Risssystemen der Tragelemente. Bei einer Durchfeuchtung der Versatzkörper kommt es grundsätzlich zu einem Tragwiderstandsabfall.
- Konsequenz: Die bisher als notwendig erachtete permanente Überprüfung und Anpassung der Prognoserechnungen gewinnt an Bedeutung, da sich das Systemverhalten zunehmend in nur schwer einzuschätzende Zustände bewegt, d.h. die Rechnungen stehen zunehmend unter Vorbehalt.
- Geht man von einem noch offenen Porenraum oberhalb der 700-m-Sohle von etwa 0,9 Mio. m^3 aus, würde in einer groben Abschätzung ein weiteres Zulaufen mit konstant 12 m^3/d den Porenraum in etwa 60 Jahren füllen (bei dieser Bilanz sind die Hochpressung von technischer $MgCl_2$-Lösung aus den Grubenbereichen unterhalb der 700-m-Sohle und der hydrostatische Druckaufbau berücksichtigt, zur Abschätzung vgl. auch Kap. 6.1.1). Für diese zeitliche Entwicklung sind die Resttragfähigkeit und Systement-

wicklung zu prüfen. Eine mögliche Reduzierung der NaCl-Sättigung bzw. eine Erhöhung der Zutrittsmengen werden bei dieser Abschätzung ausgeschlossen. Weiterhin wird eine Zersetzung des Carnallitits, der über die Hinterfahrungsstrecken bis zur 532-m-Sohle aufgeschlossen ist, nicht betrachtet (Abdämmung durch Sorelbeton).

Nach dem Aufbau eines hydrostatischen Stützdrucks durch die Füllung aller zugänglichen Porenräume mit Deckgebirgslösung bzw. durch Hochpressen der Lösungen aus den schon früher gefüllten Sohlen sowie nach dem Aufbau eines Überdruckes im verschlossenen Bergwerk wird das Systemverhalten robust und prognostizierbar. Die Entwicklung bis dahin muss hinsichtlich der ggf. durchzuführenden Konvergenzberechnung bezüglich des konvergenzaktiven Hohlraums, Versatzdrucks und Tragverhaltens im Bergwerk sowie der Deckgebirgsschädigung mit einem dreidimensionalen Ansatz berechnet werden. Der hierbei ermittelte (robuste) Ausgangzustand für die anschließende Lösungsauspressung kann dann mit einem zweidimensionalen Ansatz betrachtet werden, vergleichbar zur Konvergenzberechnung für das Bezugskonzept.

6.1.6 Fluidbewegung im Grubengebäude sowie Übertritte in das Deckgebirge

Unter Fluiden werden hier Flüssigkeiten und Gase zusammengefasst. Die Bewegung dieser Fluide ist Grundlage für den advektiven Transport von Schadstoffen, siehe Kapitel 6.1.8 und 6.1.10.

Die Gase im Grubengebäude umfassen die eingeschlossene Grubenluft (hauptsächlich Stickstoff) und die durch Korrosion von Metallen, mikrobielle Umsetzung von organischen Stoffen und Radiolyse gebildeten Gase (hauptsächlich Wasserstoff, aber auch Methan, CO_2 u.a.) (vgl. Kap. 6.1.4). Flüssigkeiten im Grubengebäude sind Lösungen verschiedener Mineralisation und Zusammensetzung, die entweder in die tieferen Bereiche des Grubengebäudes eingeleitet werden (vgl. Kapitel 4.6) oder dem Grubengebäude aus dem Deckgebirge zutreten. Diese Lösungen können sich anschließend durch Umlösungen am Versatz und am anstehenden Salzgestein oder Prozesse in den Einlagerungskammern in ihrer chemischen Zusammensetzung verändern (vgl. Kapitel 6.1.3).

Antriebe von Gasbewegungen im Grubengebäude sind die Gasbildungsprozesse, vor allem in den Einlagerungskammern, und der dichtebedingte Auftrieb des Gases innerhalb des Grubengebäudes. Das aufsteigende Gas kann dabei in verschiedenen Grubenbereichen temporär gespeichert werden: im Porenraum von Salzgrusversatz und unterhalb von geringdurchlässigen, ungefähr horizontal verlaufenden Schichten und solchen Schichten mit relativ hohem Gaseindringdruck (lokale Sperrschichten).

Antriebe von Lösungsbewegung im Grubengebäude sind neben dem Zutritt der Deckgebirgslösung drei Prozesse:

- konvergenzbedingte Verdrängung von Lösung aus dem Porenraum,
- Verdrängung von Lösung durch Speicherung von Gas in Grubenbereichen und
- dichtebedingte Konvektion.

Beschleunigend auf die Bewegung von Lösung wirken temporäre oder lokale Erhöhungen der Konvergenzrate, einsetzende Konvektion durch Dichteunterschiede und Kanalisierung (Konzentration der Bewegung auf bevorzugte Fließpfade und dadurch erhöhte Abstandsgeschwindigkeit)[31]. Bremsende Einflüsse auf die Fluidbewegung im Grubengebäude haben technische Barrieren und Gesteinsbereiche mit geringer Permeabilität bzw. hohem hydraulischen Widerstand sowie 2-Phasen-Prozesse bei gleichzeitigem Fluss von Lösung und Gas[32]. Der Sorelbetonversatz, der für die gebirgsmechanische Stabilisierung des Tragsystems der Schachtanlage in die „verbleibenden" Hohlräume eingebracht wird (vgl. Kapitel 4.5), kann sowohl kanalisierend als auch als lokale Barriere wirken.

Konvergenz der Grubenbaue und Gasbildung/Gasspeicherung bewirken eine allgemeine Lösungsbewegung vom Grubentiefsten zur Übertrittstelle in das Deckgebirge. Aufgrund von lokal unterschiedlichen hydraulischen Widerständen und 2-Phasen-Bedingungen werden dabei die unterschiedlichen Grubenbereiche in unterschiedlichem Maße „durchströmt". Im Fall von Einlagerungskammern beeinflusst die „Durchströmung", d.h. die Rate des Lösungsaustausches, die Entwicklung des chemischen Milieus (vgl. Kapitel 6.1.3) und kann die Rückhaltung von Schadstoffen mindern. Daraus leitet sich die Zielsetzung der Stilllegungsmaßnahmen hinsichtlich des Elements (2) des Sicherheitskonzeptes ab, den Lösungsaustausch in den Einlagerungskammern so gering als möglich zu halten. Dazu sind die technischen Maßnahmen zur Begrenzung der Lösungsbewegung in den und um die ELK so ausgelegt, dass

- unkontaminierte Lösung nach Möglichkeit an diesen vorbei gelenkt wird,
- der Durchströmung der Einlagerungskammern entgegengewirkt und der Lösungsaustausch gering gehalten wird,
- kontaminierte Lösung aus den ELK – soweit unter den gegebenen Bedingungen möglich – im Nahbereich derart gelenkt wird, dass eine möglichst große Transportverzögerung und Verdünnung erreicht werden kann und
- sich möglichst robuste und prognostizierbare Fließmuster und Transportpfade ausbilden.

Spezialrechnungen für /HMGU 2007/ haben gezeigt, dass es für die Mehrheit der ELK möglich ist, durch technische Maßnahmen in deren Umfeld (insbesondere durch die Errichtung von Strömungsbarrieren) den Lösungsaustausch innerhalb der ELK auf die Größenordnung von etwa einem vollständigen Austausch in wenigen 1000 bis einigen 10 000 Jahren zu begrenzen.

Durch das Einleiten der schweren technischen $MgCl_2$-Lösung bis ins Firstniveau der 700-m-Sohle und das Zutreten von leichterer Deckgebirgslösung – in Verbindung mit einer Kapselung der Carnallititaufschlüsse im Oberen Baufeld in der Südflanke (vgl. Kapitel 4.1.2 und 4.6) – wird das Grubengebäude hydraulisch in zwei Bereiche unterteilt: den unteren Bereich der technischen $MgCl_2$-Lösung und den oberen Bereich der zugetretenen und durch Umlösungsprozesse veränderten Deckgebirgslösung. Die beiden Bereiche werden durch eine Grenzschicht getrennt, in der die Lösungsdichte einen starken vertikalen Gradienten aufweist

[31] Kapillareffekte im Versatz können hier in der Regel vernachlässigt werden.

[32] Der Prozess der Lösung von Gas in Flüssigkeiten (Henry'sches Gesetz) kann hier vernachlässigt werden.

und die eine starke Barriere für Lösungsbewegung darstellt. Jeweils innerhalb der beiden Bereiche sind mäßige[33] konvektive Lösungsbewegungen zu erwarten. Im unteren Bereich dürften solche durch Wechselwirkungen der technischen $MgCl_2$-Lösung mit den Abfällen und in der Folge mit anderen Feststoffen (vgl. Kap. 6.1.3) ausgelöst werden. Im oberen Bereich dürften Umlösungen am Versatz, sowie (langsam) am gekapselten Carnallitit zu lokalen Dichteunterschieden und damit zu konvektiven Lösungsbewegungen führen. Mit der Gasbildung/Gasspeicherung und der Konvergenz der Grubenbaue im unteren Grubenbereich wird die (potenziell kontaminierte) technische $MgCl_2$-Lösung auch in höhere Grubenbereiche verdrängt und sich dadurch auch die Grenzschicht langsam nach oben bewegen.

Es ist wesentlich festzuhalten, dass sich die auf der 725-m- und der 750-m-Sohle eingelagerten Abfälle (d.h. die LAW) im unteren hydraulischen Bereich befinden. Aus diesen Abfällen mobilisierte Schadstoffe breiten sich – soweit sie nicht in den Einlagerungskammern zurückgehalten werden – vorwiegend im unteren Bereich aus. Solange die Grenzschicht bestehen bleibt, werden nur geringe Anteile der Schadstoffe aus den LAW in den oberen Bereich übertreten. Schadstoffe, die aus den in der Kammer 8a/511 eingelagerten MAW mobilisiert werden und aus dieser Kammer austreten, werden sich vorwiegend im oberen Bereich ausbreiten (vgl. auch Kapitel 6.1.8).

Ein Übertritt von Gas und Lösung in das Deckgebirge ist prinzipiell entlang der verschlossenen Tagesschächte und an der/den Übertrittstelle(n) vom Grubengebäude durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere möglich. Ein Entweichen von Gas oder Lösung entlang der Tagesschächte kann technisch verhindert werden[34] /HMGU 2007/.

Mobiles Gas wird im Grubenhöchsten akkumuliert und dort mit wachsendem Druck zunächst komprimiert. Durch das von unten nachströmende Gas entsteht im Grubenhöchsten eine Zone mit hoher Gas- und geringer Lösungssättigung (Gas-/Luftblase). Wenn deren Basis bis zur höchstgelegenen Verbindung zum Deckgebirge abgesunken ist, kann Gas durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere entweichen. Nach der gebirgsmechanischen Einschätzung für die Integrität der Steinsalz-Barriere in der Südflanke befindet sich die höchstgelegene Verbindung im Systemzustand des Jahres 2009 vermutlich unterhalb von 500 m Teufe. In /HMGU 2007/ führt dies zu einer Verzögerung des Gasübertritts in das Deckgebirge von etwa 1 000 Jahren. Sofern sich als Folge der anfänglich starken gebirgsmechanischen Bewegungen während des Volllaufens nach einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung eine Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere oberhalb von 500 m Teufe bildet, setzt der Gasübertritt in das Deckgebirge früher ein.

Lösung wird aus dem Grubengebäude ausgepresst, sobald der Lösungsdruck im Grubengebäude den ungestörten hydrostatischen Druck an der Übertrittstelle übersteigt. Der Lösungsdruck im Grubengebäude während der Lösungsauspressung ist hauptsächlich abhängig von der Konvergenz (vgl. Kapitel 6.1.5) und dem hydraulischen Widerstand, den das Deckgebirge der Lösungsauspressung entgegensetzt. Ein wachsender Druck wirkt der Konvergenz entgegen, d.h. es besteht eine positive, selbstregulierende Rückkopplung.

---

33 Bei einem Lösungszutritt aus dem Deckgebirge, der an NaCl nicht gesättigt ist, werden dagegen relativ starke konvektive Lösungsbewegungen auftreten.

34 bis auf eventuelle geringfügige, in Bezug auf die Langzeitsicherheit irrelevante Flüsse

Aufgrund der rechnerischen Analyse von verschiedenen Szenarien unter unterschiedlichen Randbedingungen für /HMGU 2007/ ist zu erwarten, dass bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung nach dem Einsetzen des Lösungsaustritts in das Deckgebirge dieser kurzzeitig (d.h. einige Jahre bis Jahrzehnte) mehrere 100 m^3/a erreicht, dann mit dem Rückgang von Konvergenz stetig abnimmt und nach 10 000 Jahren noch bei etwa 10 m^3/a liegen wird. Für die Bewertung kann davon ausgegangen werden, dass die Rate der Lösungsauspressung bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung während jeder Zeitperiode nach der Stilllegung geringer sein wird, als dies bei einer Stilllegung gemäß dem Bezugskonzept /HMGU 2007/ der Fall wäre.

Sofern sich die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere während der Stilllegungsphase und zu Beginn der Phase nach Stilllegung nicht in der Tiefe noch ausdehnt, erfolgt der Lösungsübertritt zwischen 500 m und 574 m (evtl. 595 m) Teufe. In diesem Fall wird zunächst Lösung aus dem oberen hydraulischen Bereich (Bereich der Deckgebirgslösung) in das Deckgebirge ausgepresst. Die Lösung aus dem unteren Bereich (Bereich der technischen $MgCl_2$-Lösung) kann erst in das Deckgebirge übertreten, wenn die Grenzschicht bis zur untersten Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere angestiegen ist oder sich durch einen Anstieg der Lösungsdichte im oberen Bereich aufgelöst hat. Selbst wenn sich die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere noch etwas ausdehnt, was aufgrund der fortlaufenden gebirgsmechanischen Bewegungen nicht ausgeschlossen werden kann, dürfte die Transportverzögerung für Schadstoffe aus den LAW durch diesen Effekt erheblich sein.

Es ist wesentlich festzuhalten, dass eine Transportverzögerung im Grubengebäude stärkere Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit hat als nur über den radioaktiven Zerfall: Je später Radionuklide die Übertrittsstelle in das Deckgebirge erreichen, umso stärker wird die Rate der Lösungsauspressung abfallen und umso geringer wird demzufolge die Austrittsrate der Radionuklide aus der Grube in das Deckgebirge (als Aktivitätsflüsse) sein. Zudem erfolgt nach den bestehenden Modellvorstellungen bei geringen Raten der Lösungsauspressung im Deckgebirge keine Ausbreitung entlang des ungünstigsten Ausbreitungspfads in das Exfiltrationsgebiet im Tal der Ammerbeek oberhalb des verstürzten Deckgebirges (vgl. Kapitel 6.1.9).

Wenn durch gebirgsmechanische Bewegungen eine hydraulische Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere in Verlängerung der Störung S2a, d.h. in rund 700 m Teufe, entstünde (vgl. Kapitel 2.2), hätte diese vermutlich eine relativ geringe Leitfähigkeit im Vergleich zu den heute bestehenden Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere zwischen 500 m und 574 m (evtl. 595 m) Teufe. Diese Einschätzung beruht auf der signifikant größeren Mächtigkeit der Steinsalz-Barriere in 700 m Teufe: Bewegungen im Deckgebirge dürften bei der in 700 m Teufe vorliegenden Barrierenmächtigkeit „höchstens“ dilatante Schädigungen im Steinsalz hervorrufen, was nur zu beschränkten Permeabilitätserhöhungen führen würde. Darüber hinaus wäre die Weglänge durch die Steinsalz-Barriere größer als in geringerer Teufe. Da zudem in größerer Teufe auch eine größere minimale Druckeinspannung und ein höherer hydraulischer Widerstand im Deckgebirge zu erwarten sind, wird der Möglichkeit einer hydraulischen Wegsamkeit durch die Steinsalz-Barriere in der Verlängerung der Störung S2a im Hinblick auf die Langzeitsicherheit nur eine verminderte Bedeutung

zugewiesen. Sie würde jedoch den Nachweis der Langzeitsicherheit komplexer machen und dadurch dessen Robustheit mindern.

Bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung ergeben sich hinsichtlich der Fluidbewegung im Grubengebäude und des Fluidübertritts in das Deckgebirge im Vergleich zum Bezugskonzept /HMGU 2007/ folgende Einschätzungen:

- Es entsteht eine hydraulische Trennung zwischen einem unteren Bereich (Bereich der technischen $MgCl_2$-Lösung) und einem oberen Bereich (Bereich der Deckgebirgslösung) im Grubengebäude, zwischen denen der Transport von Schadstoffen nur gering ist. Dieser Sachverhalt stellt im Hinblick auf die Ausbreitung von Schadstoffen aus den LAW einen signifikanten Vorteil dar, indem er die Systemrobustheit stärkt. Im Hinblick auf die Ausbreitung von Schadstoffen aus den MAW ist die Bedeutung der hydraulischen Trennung neutral.
- Die Lösungsbewegungen im unteren hydraulischen Bereich des Grubengebäudes sind vergleichbar bis geringer[35]. Dies ist ein neutraler bis günstiger Unterschied. Die Auswirkung der als Vorsorgemaßnahmen geplanten Firstspaltverfüllung mit Sorelbeton, siehe Kapitel 2.4, auf der 725-m- und der 700-m-Sohle wird in einer gesonderten Stellungnahme bewertet /ALSA-C 2009b/.
- Im oberen hydraulischen Bereich (Bereich der Deckgebirgslösung) sind die Lösungsbewegungen deutlich weniger gut prognostizierbar. Verstärkend wirken mögliche Auf- und Umlösungsprozesse, mindernd die generell weitergehende Verfüllung von Hohlräumen mit Sorelbeton und die stärker fortgeschrittene Konvergenz der Grubenbaue nach dem Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke. Der Einfluss der Firstspaltverfüllung mit Sorelbeton, siehe Kapitel 2.4, auf die Fluidbewegung ist nach der Stellungnahme /ALSA-C 2009a/ vermutlich gering.
- Erhebliche Unsicherheiten bestehen bei einem Zutritt von an NaCl ungesättigten Lösungen aus dem Deckgebirge in Bezug auf die in der Folge entstehenden Hohlräume durch die Aufsättigung der zugetretenen Lösung. Im Hinblick auf die Ausbreitung von Radionukliden aus den Abfällen (LAW und MAW) im Oberen Baufeld in der Südflanke ist dieser Aspekt nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts höchstens von mäßigem quantitativem Nachteil; er ist jedoch als Nachteil in Bezug auf die Systemrobustheit einzustufen.
- Aufgrund der weitergehenden Verfüllung von Hohlräumen mit Sorelbeton und der stärker fortgeschrittenen Konvergenz der Grubenbaue nach dem Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke sind der generelle Lösungsfluss vom Grubentiefsten zur Übertrittsstelle durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in das Hutgestein und die Rate der Lösungsauspressung in das Deckgebirge geringer als beim Bezugskonzept, sofern keine erheblichen Mengen an ungesättigter Lösung aus dem Deckgebirge zutritt. Unter der genannten Bedingung ist dies ein Vorteil des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung.

[35] geringer wegen der eher weitergehenden Verfüllung der Resthohlräume mit Sorelbeton; anfänglich ggf. auch höher wegen der stärkeren Konvergenz

- Die Möglichkeit, dass nach der Stilllegung größere Mengen an Lösung in das Grubengebäude zutreten, welche an NaCl ungesättigt sind, und dass in der Folge konvergenzaktiver Hohlraum und nicht prognostizierbare neue Wegsamkeiten geschaffen werden, ist als erheblicher Nachteil in Bezug auf die Systemprognostizierbarkeit und -robustheit einzustufen. Ob die quantitativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit erheblich sein können, muss durch spezielle Modellrechnungen bewertet werden.
- Der Übertritt von Gas aus der Grube in das Deckgebirge wird vermutlich in einem nicht quantifizierbaren Ausmaß früher erfolgen. Dies ist in der Tendenz für die Radionuklidausbreitung auf dem Lösungspfad als Vorteil, für jene auf dem Gaspfad als Nachteil einzustufen.

6.1.7 Rückhaltung und Mobilisierung von Radionukliden in den Einlagerungskammern

Die Schadstoffe in den Einlagerungskammern LAW werden durch die eingeleitete technische $MgCl_2$-Lösung (vgl. Kapitel 4.6) mobilisiert. Die Schadstoffe in der MAW-Kammer können erst zu einem späteren Zeitpunkt mobilisiert werden, wenn die aus dem Deckgebirge zutretende Lösung die Teufe dieser Kammer erreicht hat und in diese eindringen kann. Die Entwicklung des chemischen Milieus in den LAW- bzw. MAW-Einlagerungskammern sind u.A. wegen der verschiedenen Lösungen unterschiedlich (vgl. Kapitel 6.1.3). Daher wird im Folgenden die Rückhaltung und Mobilisierung in den Einlagerungskammern MAW und LAW getrennt angesprochen.

Die Rückhaltung und Mobilisierung der Schadstoffe in den Einlagerungskammern bestimmen die Ausgangssituation für den Schadstofftransport in der Grube. Beide Prozesse zusammen bestimmen die Lösungskonzentrationen der Schadstoffe in den einzelnen Einlagerungskammern. Dabei beschreibt die Mobilisierung den Übertritt der Schadstoffe aus den Behältern und Abfallmatrizes in die Lösung und die Rückhaltung alle Prozesse, die dazu führen, dass die Schadstoffe nicht in Lösung gehen sowie wieder aus der Lösung ausgefällt oder sorbiert werden. Mit Veränderung des chemischen Milieus kann es zu einer sekundären Mobilisierung durch Freisetzung von zuvor durch Ausfällung oder Sorption immobilisierten Schadstoffen kommen.

Die Mobilisierung beginnt zu dem Zeitpunkt, zu dem Lösung an die Abfallmatrix gelangt. Mit dem Einleiten der technischen $MgCl_2$-Lösung gelangt die Lösung an die LAW-Abfallgebinde, korrodiert die Abfallbehälter und anschließend die Abfallmatrizes. Dabei ist anzunehmen, dass ein Teil der Behälter von Beginn an undicht ist, sodass Schadstoffe sofort nach dem Lösungskontakt mobilisiert werden können. Die restlichen Behälter fallen im Laufe der Zeit aus, und deren Abfallmatrizes werden ebenfalls im Laufe der Zeit zersetzt, sodass letztlich eine Mobilisierung aller Schadstoffe zu erwarten ist. Je nach dem Behältertyp (Fass ohne oder Fass mit Verlorener Betonabschirmung (VBA)) und Abfallmatrix (Zement, Bitumen) dauern diese Prozesse unterschiedlich lang. Es ist davon auszugehen, dass spätestens nach einigen Jahrzehnten die Barrieren Abfallmatrizes und Fässer ausgefallen sind und die Mobilisierung aller Radionuklide möglich ist, ggf. gemindert durch die zuvor erwähnten Prozesse der Immobilisierung.

Die sich einstellenden Radionuklidkonzentrationen sind mit geeigneten geochemischen Modellen beschreibbar. Die so ermittelten Konzentrationen werden zur Berechnung des Radionuklidtransports aus den Einlagerungskammern heraus verwendet, siehe Kapitel 6.1.8. Das geochemische Milieu kann sich durch zufließende Lösungen aus benachbarten Grubenbauen (Lösungsaustausch) verändern (siehe Kapitel 6.1.3) und sich so auf die Mobilisierung und Rückhaltung auswirken. Dieser Effekt kann bei der Bestimmung der Elementkonzentrationen berücksichtigt werden.

Die in das Obere Baufeld in der Südflanke zutretende Deckgebirgslösung wird auch in die MAW-Kammer gelangen. Die MAW-Kammer ist vollständig mit Sorelbeton gefüllt, sodass sich fluidzugängliche Porenräume nur in dem überdeckten Fasskegel befinden. Es ist ohne Spezialrechnungen nicht abzuschätzen, wie weit die Kammer mit Lösung aufgefüllt wird, da sich unter der Sorelbetonglocke ein Luftpolster einstellen wird, das den Zutritt der Lösung behindert. Die Schadstoffe in der MAW-Kammer werden – wie oben bereits beschrieben – bei Lösungskontakt teilweise mobilisiert und auch zurückgehalten. Das chemische Milieu wird dabei im Wesentlichen durch das Verhältnis Abfall zu Lösung bestimmt. Das gesamte Porenvolumen in der MAW-Kammer bildet die Obergrenze für die Lösungsmenge, sodass aus diesem Volumen das minimale Verhältnis bestimmt werden kann. Die Sorelbetonglocke nimmt Aufgrund ihrer geringen Permeabilität nur sehr wenig an den Reaktionen teil und wirkt sich nur geringfügig auf das chemische Milieu aus. Das chemische Milieu und die korrespondierenden Radionuklidkonzentrationen können mit geeigneten geochemischen Modellen beschrieben werden.

Da es bei einem stofflich weitgehend unveränderten Lösungszutritt aus dem Deckgebirge kein andauernder Lösungsaustausch erwartet wird, werden sich die maximal möglichen Elementkonzentrationen in der MAW-Kammer (außer durch radioaktiven Zerfall) zeitlich kaum ändern. Bei einem an NaCl untersättigten Lösungszutritt aus dem Deckgebirge ist sehr wahrscheinlich davon auszugehen, dass diese Lösung bis zum Zutritt in die MAW-Kammer bereits an NaCl aufgesättigt ist. Die Aussagen zu Radionuklidfreisetzung aus der MAW-Kammer mit an NaCl gesättigter Deckgebirgslösung können somit auch für einen chemisch veränderten Deckgebirgszufluss übernommen werden.

Die Mobilisierung und Rückhaltung in den Einlagerungskammern wird im Stilllegungskonzept Vollverfüllung nach den gleichen Methoden wie im Bezugskonzept /HMGU 2007/ berücksichtigt. Dadurch ist ein guter Vergleich möglich. Für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung ergeben sich die folgenden Aussagen:

- Die Anfangszustände in den Einlagerungskammern LAW sind in beiden Konzepten vergleichbar, da jeweils technische $MgCl_2$-Lösungen in den unteren Grubenbereich eingeleitet werden und die Kammerinhaltstoffe und die Anfangsinventare sehr ähnlich sind.
- Die zeitliche Entwicklung der Mobilisierung und Rückhaltung in den Einlagerungskammern LAW unterscheidet sich in mehreren Prozessen vom Bezugskonzept /HMGU 2007/ aus folgenden Gründen:
    - Die Auswirkungen des Lösungsaustausches auf die Elementkonzentrationen sind in den Konzepten unterschiedlich (vgl. Kapitel 6.1.3).

- Die anfänglichen Fluiddrücke sind im Vollverfüllungskonzept geringer, dadurch nehmen die Gasvolumina schneller zu und die Lösungsvolumina schneller ab. Außerdem ist die Konvergenz anfangs stärker, wodurch die Lösungsvolumina auch schneller abnehmen. Zu Beginn wird damit voraussichtlich mehr schwach kontaminierte Lösung aus den LAW-Kammern gepresst, zu späteren Zeiten höher kontaminierte Lösung mit geringeren Raten.

Es ist ohne Modellrechnungen keine Aussage möglich, ob das Verhalten zur geringeren oder höheren Freisetzung von Schadstoffen aus den Einlagerungskammern führen wird, da die zeitliche Entwicklung der frühen Auspressung als auch die der gelösten Elementkonzentrationen derzeit nicht abgeschätzt werden können (siehe oben). Tendenziell ist die Mobilisierung aus den Abfallmatrizes als gleich und die Rückhaltung in den Einlagerungskammern LAW als ähnlich einzuschätzen.

Die Auswirkungen des Lösungsaustausches auf die zeitliche Entwicklung der Rückhalteprozesse sind in den beiden Stilllegungskonzepten unterschiedlich. Es ist nicht auszuschließen, dass der Unterschied signifikant ist, und dass sich im Stilllegungskonzept Vollverfüllung geringere Rückhalteeffekte ergeben. Die geringere Prognosefähigkeit der Rückhalteeffekte für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung wird als geringfügig negativ eingeschätzt.

- Die Mobilisierung der Schadstoffe in der MAW-Kammer kann sich von der Mobilisierung im Bezugskonzept unterscheiden, da die aus dem Deckgebirge zutretende Lösung eine andere chemische Zusammensetzung als das Schutzfluid im Bezugskonzept /HMGU 2007/ hat und sich dadurch das chemische Milieu und somit auch die Korrosionsraten der Abfallmatrizes unterscheiden wird. Da der Transport der Schadstoffe aus der Kammer gering ist, ist dieser Unterschied vernachlässigbar, so dass die Mobilisierung und Rückhaltung in der MAW-Kammer bezüglich des Radionuklidtransports als neutral angesehen werden kann.
- Bezüglich der Radionuklidmobilisierung und Rückhaltung aus bzw. in den Einlagerungskammern sind die beiden Konzepte ähnlich robust.

6.1.8 Radionuklidrückhaltung und -ausbreitung in der Grube und Übertritt in das Deckgebirge in Lösung

Auf Basis der in Kapitel 6.1.6 dargestellten Prozesse der Lösungs- und Gasbewegung im Grubengebäude wird der Transport von Schadstoffen in Lösung diskutiert. Für den Transport in der Gasphase siehe Kapitel 6.1.10.

Die aus den Abfällen mobilisierten Schadstoffe (vgl. Kapitel 6.1.7) breiten sich in der Lösung durch unterschiedliche Transportprozesse im Grubengebäude aus und treten im Laufe der Zeit teilweise in das Deckgebirge über. Auf diesem Weg kann der Transport durch weitere Prozesse verzögert, aber auch beschleunigt werden. Die Stilllegungsmaßnahmen sollen durch das Zusammenwirken aller Prozesse einen möglichst langsamen und geringen Transport bewirken. In der Grube sind die folgenden Prozesse zu berücksichtigen:

Transportprozesse:

- Advektion
- Konvektion
- Diffusion
- Dispersion

Verzögernde Prozesse:

- Verlängerung des Transportwegs
- Dichteschichtung im Grubengebäude
- Ausfällung und Sorption
- Matrixdiffusion

Beschleunigende Prozesse:

- Verdrängung von Lösung durch Gas (Verstärkung der Advektion)
- Verdrängung von Lösung durch Konvergenz (Verstärkung der Advektion)
- Kanalisierung

Diese Prozesse werden im Folgenden im Einzelnen angesprochen.

Der Transport von Lösungsinhaltsstoffen erfolgt advektiv und konvektiv mit der Lösung sowie dispersiv und diffusiv in der Lösung. Auf die antreibenden Kräfte bei Advektion und Konvektion wird in Kapitel 6.1.6 eingegangen. Der durch Konvektion ausgelöste Transport von Schadstoffen wird im Folgenden wie ein advektiver Transport betrachtet, sodass auf den Aspekt der Konvektion an dieser Stelle nicht eingegangen wird. Der Beitrag des Austausches von volatilen Schadstoffen zwischen Lösungs- und Gasphase (Henry'sches Gesetz) zum Transport ist gegenüber den anderen Transportprozessen in Lösung vernachlässigbar klein und wird daher nicht betrachtet.

Die Übertrittsstelle für Schadstoffe vom Grubengebäude in das Deckgebirge liegt in der Zone der desintegrierten Steinsalzbarriere in der Südflanke, siehe die Ausführungen in Kapitel 6.1.6. Ein Übertritt der Schadstoffe über die Tagesschächte kann vernachlässigt werden, denn der Übertritt von kontaminierter Lösung entlang eines Tagesschachtes wird – sofern er überhaupt auftritt – äußerst gering sein. In Kapitel 6.1.6 wird eine neue potenzielle Wegsamkeit in rund 700 m Teufe angesprochen, der jedoch keine signifikante Bedeutung beigemessen wird. Daher braucht diese potenzielle Wegsamkeit für den Transport von Schadstoffen nicht berücksichtigt zu werden.

Zu Beginn der Phase nach Stilllegung der Schachtanlage Asse II tritt die Deckgebirgslösung weiterhin in die Grube zu. In diesem Zeitbereich kommt es zu keinem Austritt kontaminierter Lösung in das Deckgebirge. Sobald die Grubenlösung aufgrund der Druckverhältnisse in das Deckgebirge ausgepresst wird, ist auch ein Austreten von Schadstoffen in das Deckgebirge möglich. Bestimmend für den Zeitpunkt des Einsetzens des Schadstoffübertritts in das Deckgebirge und die Rate des Schadstoffübertritts sind die oben aufgeführten Transportprozesse. Aufgrund der Dichteschichtung können zu frühen Zeiten – wenn überhaupt – nur

Schadstoffe aus der MAW-Kammer 8a/511 austreten, zu späteren Zeiten – wenn die schwerere technische $MgCl_2$-Lösung aus dem unteren hydraulischen Bereich der Grube die Übertrittsstelle ins Deckgebirge erreicht – auch Anteile der Schadstoffe aus den LAW-Bereichen.

Der Transport der Schadstoffe kann durch mehrere Prozesse und technische Maßnahmen verzögert oder in Einzelfällen beschleunigt werden. Zunächst wird auf die verzögernden Prozesse eingegangen.

Sorelbetonbarrieren, z.B. im Umfeld der Einlagerungsbereiche, können das Strömungsmuster der Lösung verändern (vgl. Kapitel 6.1.6) und dadurch den Transportpfad der Schadstoffe verlängern (Verzögerung durch Lenkung).

Durch die Dichteschichtung im Oberen Baufeld in der Südflanke (vgl. Kapitel 6.1.6) wird der Transport der auf der 725-m- und der 750-m-Sohle eingelagerten LAW zum Übertrittsort ins Deckgebirge verzögert. Aus diesen Abfällen mobilisierte Schadstoffe breiten sich – soweit sie nicht in den Einlagerungskammern zurückgehalten werden – überwiegend im unteren hydraulischen Bereich[36] aus. Solange die Grenzschicht bestehen bleibt, werden nur geringe Anteile der Schadstoffe – vorwiegend durch Diffusion – in den oberen Bereich übertreten; diese Verzögerung des Transports der Schadstoffe erfolgt so lange, bis es zum Konzentrationsausgleich durch Diffusion über die Grenzschicht gekommen ist. Schadstoffe, die aus den in der Kammer 8a/511 eingelagerten MAW mobilisiert werden und aus dieser Kammer austreten, werden sich vorwiegend im oberen hydraulischen Bereich ausbreiten und sind dadurch von der Verzögerung durch die Dichteschichtung nicht beeinflusst.

Eine Verzögerung durch Ausfällung und Sorption entlang der Transportwege im Grubengebäude ist prinzipiell möglich. Ausfällungen können bereits eintreten, wenn sich die Milieubedingungen auf dem Transportpfad geringfügig verändern, wie beispielsweise bei einem Übergang zwischen verschiedenen Versatzstoffen oder zwischen verschiedenen anstehenden Nebengesteinen. Radionuklide können sowohl eigene neue Festphasen bilden, die dann ausfallen, oder bei Ausfällung anderer Festphasen mit eingeschlossen werden (so genannte Mitfällung). Letzteres tritt u. a. bei Ausfällungen von Ca-Karbonaten und -sulfaten (Cs, Sr) sowie von Mg-Hydroxiden auf. Solche Prozesse werden vor allem im unteren hydraulischen Bereich in der Umgebung der Einlagerungskammern nahe der aufgeschlossenen aber auch gekapselten Carnallititbereiche auftreten, siehe Kapitel 6.1.3. Als sorbierende Festphase außerhalb der Einlagerungskammern werden insbesondere Sorelbeton und dessen Korrosionsprodukte angesehen. Wie bei den Modellrechnungen zu /HMGU 2007/ können diese Prozesse jedoch nicht berücksichtigt werden, weil keine standortspezifischen Daten für diese Rückhalteeffekte vorliegen.

Matrixdiffusion ist von Bedeutung bei kanalisiertem advektivem Transport (z. B. in einem Kluftwasserleiter oder – wie hier – bei einer Kanalisierung der Lösungsbewegung durch Permeabilitätskontraste, s. u.). Matrixdiffusion ist der diffusive Schadstoffaustausch zwischen dem durchströmten Poren- bzw. Kluftvolumen und den angrenzenden nicht durchströmten Porenräumen. Der Prozess verursacht eine Rückhaltung der Schadstoffe in den nicht durch-

[36] Durch die Dichteschichtung wird die Lösung in der Grube in einen unteren hydraulischen Bereich mit technischer $MgCl_2$-Lösung und einen oberen Bereich mit der zugetretenen Deckgebirgslösung unterteilt.

strömten Porenräumen, die so lange anhält, bis es zum Konzentrationsausgleich gekommen ist. Die Wirksamkeit des Prozesses hängt von der Diffusion zwischen den durchströmten und den nicht durchströmten Porenräumen ab. Diese könnte durch lokale Ausfällungen oder Rekristallisationen behindert sein. Diesem diffusiven Austausch – aber auch Ausfällungen und Rekristallisationen – wirkt zudem die konvergenzbedingte Lösungsverdrängung aus dem nicht durchströmten Porenvolumen in das durchströmte Porenvolumen entgegen.

Der Transport der Schadstoffe kann zwischen den Einlagerungsbereichen und dem Übertrittsort ins Deckgebirge durch folgende Prozesse beschleunigt werden.

Die Strömungswiderstände der Wegsamkeiten im Grubengebäude (mit unterschiedlichen Materialien versetzte Grubenbaue, Sorelbetonbarrieren, desintegrierte Bereiche in Pfeilern und Schweben) weisen Kontraste auf, die u.A. zu der oben genannten Lenkung des Schadstofftransports führen. Diese inhomogenen Permeabilitätsverteilungen können jedoch auch eine Lösungsbewegung und damit einen advektiven Transport auf bevorzugten Pfaden hervorrufen. Dieser Effekt wird Kanalisierung genannt. Dabei ist zwischen kleinräumiger Kanalisierung innerhalb einzelner Grubenbaue und großräumiger Kanalisierung im Maßstab von Grubenbereichen zu unterscheiden. Kanalisierung führt stets zu einer Erhöhung der Transportgeschwindigkeiten im durchströmten Poren- und Kluftvolumen. Die weiter oben beschriebene Matrixdiffusion wirkt diesem beschleunigenden Effekt entgegen.

Eine kleinräumige Kanalisierung in einem Grubenbau bewirkt einen schnellen Transport der Schadstoffe innerhalb des Grubenbaus. Durch die übliche Annahme einer instantanen Durchmischung im Porenvolumen eines Grubenbaus wird diese Auswirkung abgedeckt, so dass die zusätzliche Berücksichtigung der kleinräumigen Kanalisierung nicht erforderlich ist.

Im Oberen Baufeld in der Südflanke wird der Transport großräumig durch die relativ gering durchlässigen Schweben in den Kammerreihen 1 und 9 und – untergeordnet – durch den Hauptpfeiler kanalisiert. Das präzise Ausmaß dieser Kanalisierungen ist ungewiss, liegt jedoch voraussichtlich zwischen 20 %, entsprechend einer Durchströmung von nur einer Kammerreihe im Osten und einer im Westen des Baufeldes, und 80 %, entsprechend einer Durchströmung von allen Kammerreihen außer den beiden Kammerreihen 1 und 9. Durch die Dichteschichtung im Oberen Baufeld in der Südflanke werden die Auswirkungen dieser Kanalisierungen abgeschwächt, denn die aufsteigende, schwerere Lösung wird sich in angrenzende Grubenbaue mit leichterer Lösung ausbreiten.

Die Transportprozesse in der Grube und beim Übertritt in das Deckgebirge lassen sich denjenigen des Bezugskonzepts vergleichend gegenüberstellen. Für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung ergeben sich dabei die folgenden Einschätzungen[37]:

- Der advektive Transport ist zu Beginn der Phase nach Stilllegung der Schachtanlage Asse II wegen des geringen Fluiddrucks, der starken Konvergenz (wegen Durchfeuchtung und geringen Fluiddrucks) und der gasbedingten Verdrängungseffekte stark ausgeprägt. Dies ist bezüglich der Rückhaltung von Schadstoffen eine ungünstige Eigen-

[37] Dabei wird jeweils zwischen zwei zeitlichen Phasen unterschieden: Beginn der Phase nach Stilllegung der Schachtanlage Asse II (= geringe Fluiddruck-Verhältnisse) und Zeitbereich nach Volllaufen der Grube mit Deckgebirgslösung (= hohe Fluiddruck-Verhältnisse)

schaft des Konzepts. Allerdings ist einschränkend hinzuzufügen, dass diese Phase des Volllaufens relativ kurz ist (einige Jahrzehnte, siehe Kapitel 6.1.5) und dass die kontaminierte Lösung die Übertrittsstellen ins Deckgebirge oberhalb 574 m (bzw. 595 m) Teufe in dieser Phase nicht erreichen wird.

- Durch die Verfüllung aller verbleibenden Hohlräume in den Grubenbauen mit Sorelbeton ist das konvergenzaktive Volumen kleiner als beim Bezugskonzept, das diese Verfüllung nicht im gleichen Umfang vorsah. Außerdem werden die nach Verfüllung noch verbliebenen Hohlräume durch den geringen Gegendruck des Fluids durch Konvergenz schnell verkleinert. Dies führt zu einer mittel- bis langfristig geringeren Lösungsbewegung als beim Bezugskonzept und ist eine günstige Eigenschaft des Konzepts. Es lässt sich allerdings wegen abweichender Schadstoffkonzentrationen nicht einschätzen, ob die verringerten Fluidströme auch zu einem geringeren advektiven Transport führt, oder ob die potenziell höheren Schadstoffkonzentrationen den Prozess überwiegen.
- Sobald die Grube mit Deckgebirgslösung gefüllt ist, steigt der Fluiddruck an, wodurch die durch Gasbildung und Gasspeicherung verursachten Lösungsbewegungen schwächer werden: Die Gasvolumina werden zunächst durch den Druckaufbau in allen Grubenbauen kleiner, wodurch die Advektion verringert wird, da Lösung in die vorher von Gas eingenommenen Volumina nachströmt. Durch weitere Gasbildung werden die Gasvolumina wieder vergrößert, so dass der advektive Transport wieder zunehmen kann. Insgesamt nehmen in diesem Zeitbereich die Auswirkungen des gasbedingten Transports ab; dies ist eine günstige Eigenschaft des Konzepts.
- Eine Prognose, ob der advektive Transport im Stilllegungskonzept Vollverfüllung generell geringere oder höhere Konsequenzen hat als im Bezugskonzept, ist nicht möglich. Wesentliche Voraussetzungen für diese Prognose wären die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung der Konvergenz in allen Bereichen des Grubengebäudes und die Kenntnis der zeitlichen Verläufe der Mobilisierung in den Einlagerungsbereichen. Die Prozesse bestimmen den advektiven Transport; z.B. hängt die Radionuklidkonzentration in der Lösung wesentlich von der zeitlichen Entwicklung der mobilisierten Radionuklidmengen ab. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 6.1.7 sind hierzu aber keine belastbaren Aussagen möglich. Bezüglich der großräumigen Kanalisierung im Oberen Baufeld in der Südflanke ist das Stilllegungskonzept Vollverfüllung günstiger, denn die Dichteschichtung führt zu einer Abschwächung der Kanalisierung.
- Zwischen dem durch Dichteschichtung hydraulisch getrennten unteren Bereich der technischen $MgCl_2$-Lösung und dem oberen Bereich der Deckgebirgslösung ist der Transport von Schadstoffen nur gering. Dieser Sachverhalt stellt im Hinblick auf die Ausbreitung von Schadstoffen aus den LAW-Bereichen einen signifikanten Vorteil dar, indem er die Systemrobustheit stärkt. Im Hinblick auf die Ausbreitung von Schadstoffen aus den MAW ist die Bedeutung der hydraulischen Trennung neutral.
- Ein möglicher Zutritt von an NaCl ungesättigten Lösungen aus dem Deckgebirge ist bezüglich der Ausbreitung von Schadstoffen aus den Abfällen (LAW und MAW) im Oberen Baufeld in der Südflanke nach Einschätzung der Autoren dieses Berichts höchstens von mäßigem quantitativem Nachteil; er ist jedoch als Nachteil in Bezug auf die Prognosefähigkeit und die Systemrobustheit einzustufen.

- Eine großräumige Konvektion im oberen hydraulischen Bereich des Oberen Baufelds in der Südflanke beeinflusst hauptsächlich den – gemäß Kapitel 6.1.7 geringen – Transport der Schadstoffe aus der MAW-Kammer. Obwohl die Ausprägung der Konvektion nicht prognostiziert werden kann – insbesondere wenn die zutretende Deckgebirgslösung nicht an NaCl gesättigt ist – wird wegen der relativ geringen aus der MAW-Kammer transportierten Schadstoffmengen davon ausgegangen, dass das Stilllegungskonzept Vollverfüllung keine negativen Auswirkungen durch diese Konvektion aufweist
- Die Auswirkungen konvektiver Prozesse im Nahbereich der LAW-Abfälle sind als vergleichbar groß wie im Bezugskonzept zu bewerten.
- Die Vorsorgemaßnahmen Firstspaltverfüllung und Resthohlraumverfüllung mit Sorelbeton (siehe Kapitel 4.5) können den Schadstofftransport kanalisieren. Die Kanalisierungen gemäß Stilllegungskonzept Vollverfüllung sind etwas ungünstiger als im Bezugskonzept, da sie generell den Transport beschleunigen und bei der Vollverfüllung potenziell höhere Schadstoffkonzentrationen auftreten. Dieser Effekt wird aber im Oberen Baufeld in der Südflanke durch die Dichteschichtung abgeschwächt.
- Der Übertritt der Schadstoffe aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge erfolgt zeitlich verzögert, da die Grube zunächst mit Deckgebirgslösung gefüllt sein muss. Dies ist gegenüber dem Bezugskonzept als positiv zu bewerten, da der mögliche Einfluss der kurzlebigen Radionuklide auf die potenzielle Strahlenexposition reduziert wird.
- Es ist zu erwarten, dass das Maximum des Übertritts von Schadstoffen aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge zu einem Zeitpunkt erfolgt, bei dem die Auspressrate von Lösung aus dem Grubengebäude bereits stark abgenommen hat. Diese Kombination der Transportverzögerung in der Grube mit der zeitlichen Abnahme der Lösungsauspressung ist beim Stilllegungskonzept Vollverfüllung stärker ausgeprägt als beim Bezugskonzept und als positiv zu bewerten.
- Dispersion und Diffusion sind von gleicher Bedeutung wie im Bezugskonzept und ihre Auswirkungen sind als gleich zu bewerten.
- Rückhalteeffekte, wie beispielsweise Sorption am Sorelbeton und an dessen Korrosionsprodukten, sofern dieser durch die zutretende Deckgebirgslösung korrodiert wird, können den Transport von Schadstoffen verzögern. Da größere Mengen Sorelbeton eingebracht werden sollen, ist dies für das Stilllegungskonzept Vollverfüllung als positiv einzuschätzen.

6.1.9 Radionuklidrückhaltung und -transport im Deckgebirge in Lösung

Wesentlich für die Radionuklidausbreitung im Deckgebirge in Lösung ist die Grundwasserbewegung im Deckgebirge. Diese wird bestimmt durch

- die Grundwasserneubildung und die räumliche Anordnung der Gebiete mit Grundwasserneubildung einerseits und Vorflutern und Exfiltrationsgebieten andererseits (vgl. Kapitel 2.1.4),
- die Verbreitung, Mächtigkeit und Permeabilität von hydrogeologischen Einheiten und Wegsamkeiten (vgl. Kapitel 2.1.4),

- die (zeitabhängige) Rate der Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude[38]
- Dichte- und Viskositätsunterschiede von oberflächennahem Grundwasser (Süßwasser), salzhaltigem Deckgebirgswasser in größerer Tiefe und austretender Lösung aus dem Grubengebäude. Die Eigenschaften der letztgenannten liegt zwischen jener von gesättigter NaCl-Lösung und jener der in die Grube eingeleiteten technischen $MgCl_2$-Lösung. Die technische $MgCl_2$-Lösung weist eine deutlich höhere Dichte und eine deutlich höhere Viskosität als gesättigte NaCl-Lösung auf.

Die Radionuklidausbreitung in Lösung und die resultierenden Radionuklidkonzentrationen im Deckgebirge werden bestimmt durch

- den advektiven Transport der Radionuklide mit dem bewegten Grundwasser,
- die Dispersion, d.h. das Mischen von Lösungen unterschiedlicher Zusammensetzung, gekoppelt an den advektiven Transport,
- die Diffusion, angetrieben durch Konzentrationsgradienten und unabhängig von der Lösungsbewegung,
- Rückhalteprozesse (Sorption an Festphasen und Fällung bei Überschreiten von Löslichkeitsgrenzen) und
- den radioaktiven Zerfall (und ggf. Bildung von Tochternukliden).

Die Auswirkungen dieser Prozesse am Standort Asse können im Rahmen der bestehenden konzeptuellen Modellvorstellungen und der verfügbaren Daten prognostiziert werden. Zu den konzeptuellen Modellvorstellungen bestehen noch offene Fragen, die nach Ansicht der Autoren allerdings nicht zu einer Unterschätzung der potenziellen Auswirkungen, d.h. der Langzeitsicherheit, führen können. Für die Durchführung einer Langzeitsicherheitsanalyse erfordern die verfügbaren Daten, entweder konservative Vereinfachungen vorzunehmen (z.B. die Vernachlässigung von Rückhalteprozessen durch Sorption und Fällung im Deckgebirge) oder relativ große Bandbreiten für Systemdaten anzusetzen (z.B. in Bezug auf die hydraulische Leitfähigkeit der Wegsamkeiten im Rötaquitard (*so2-so4*) zwischen Rötanhydrit und Muschelkalk in der Flanke des Grubengebäudes).

Im Rahmen der Analyse der Langzeitsicherheit in /HMGU 2007/ und späteren, ergänzenden Arbeiten wurden die Grundwasserbewegung mit und ohne Lösungsauspressung aus dem Grubengebäude sowie die Radionuklidausbreitung im Deckgebirge in Lösung intensiv untersucht. Sie führten – bei Vernachlässigung von Sorptions- und Fällungsprozessen – zu folgenden Hauptergebnissen:

- Für die Bewertung der Langzeitsicherheit sind drei Ausbreitungspfade zu betrachten. Diese führen von der Übertrittsstelle aus dem Grubengebäude in der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere (1) in das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im verstürzten Deckgebirge (vD-Amm), (2) in das Exfiltrationsgebiet im Taleinschnitt der Ammerbeek im Muschelkalk (m-Amm) und (3) in das Exfiltrationsgebiet im

[38] Nach Einschätzung der Autoren kann der Einfluss des Gasaustritts aus dem Grubengebäude auf die Grundwasserbewegung im Deckgebirge in ausreichender Näherung vernachlässigt werden.

Taleinschnitt des Rothebachs und östlich davon bis zur Querstörung Wittmar-Ost im Muschelkalk (m-Witt)[39].

- Die Ausbreitung von Grubenlösung bis in oberflächennahes Grundwasser ist entlang aller Pfade mit einer erheblichen Verdünnung mit Grundwasser geringer Dichte verbunden. Grundwasser hoher Salinität kann in den genannten Exfiltrationsgebieten aus hydraulischen Gründen nicht bis in Oberflächennähe gelangen. Dies wird durch die beobachteten Salinitätswerte von Quellen und Oberflächengewässern bestätigt. Dieser Sachverhalt bewirkt auch eine erhebliche Minderung der durch Freisetzungen aus dem Grubengebäude verursachten potenziellen Radionuklidkonzentrationen im oberflächennahen Grundwasser gegenüber den Konzentrationen in der Grubenlösung beim Übertritt in das Deckgebirge.
- Die relative Bedeutung der drei Ausbreitungspfade verändert sich mit der Zeit und mit Änderungen der Auspressrate.
- Der Ausbreitungspfad in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm führt entlang des Rötanhydrit (*so1A*) in das verstürzte Deckgebirge und durch dieses in das oberflächennahe Grundwasser oder den Vorfluter. Aufgrund von Dichteeffekten erfolgt die Ausbreitung entlang dieses Pfades nur, sofern die Lösungsauspressrate aus der Grube in das Deckgebirge einen gewissen Schwellenwert überschreitet. Dieser Schwellenwert hängt u.a. von der hydraulischen Leitfähigkeit der Wegsamkeiten durch den Rötaquitard (*so2-so4*) in der Südflanke des Grubengebäudes ab. Die Transportzeiten (ohne Sorption) sind relativ kurz und betragen einige 100 Jahre.
- Die Ausbreitung in das Exfiltrationsgebiet m-Witt erfolgt zunächst entlang von Wegsamkeiten durch den Rötaquitard (*so2-so4*) in der Tiefe des Grubengebäudes. Diese können aufgrund von bergbaubedingten Verformungen eine erhöhte Leitfähigkeit aufweisen (insbesondere der Scherdeformationsbereich S3/D9). Die weitere Ausbreitung erfolgt dann im Muschelkalk nach Westen. Bei relativ hoch durchlässigen Wegsamkeiten durch den Rötaquitard gelangt Grubenlösung entlang dieses Pfades mit der geringsten Verdünnung bis in Oberflächennähe. Die Transportzeit bis in das Exfiltrationsgebiet, bemessen als Zeitdauer bis zum Erreichen des Konzentrationsmaximums von langlebigen Radionukliden, die aus der Grube freigesetzt wurden, beträgt mehrere 10 000 Jahre (ohne Rückhaltung durch Sorption). Maßgebend für das Konzentrationsmaximum in diesem Exfiltrationsgebiet sind nicht die Rate des Radionuklidübertritts aus der Grube in das Deckgebirge oder die Konzentration in der ausgepressten Grubenlösung, sondern die kumuliert bis etwa 10 000 Jahre aus der Grube ausgetretenen Radionuklidmengen (Aktivitäten).
- Die Ausbreitung in das Exfiltrationsgebiet m-Amm erfolgt ebenfall durch den Rötaquitard (*so2-so4*), entweder entlang der für den vorgenannten Ausbreitungspfad relevanten Wegsamkeiten in der Tiefe des Grubengebäudes oder nach einem Hochpressen entlang des Rötanhydrit über relativ untiefe Wegsamkeiten. Die Charakteristiken der Ausbreitung entlang dieses Pfades sind deshalb eine Mischung aus jenen der Ausbreitung ent-

[39] Die Exfiltration in diese Gebiete schließt auch den Schadstoffübertritt in die quartären Talfüllungen und den Schadstofftransport mit dem Grundwasserfluss in diesen Talfüllungen nach Süden in die Remlinger Mulde und – aus dem Exfiltrationsgebiet vD-Amm – nach Norden in die Schöppenstedter Mulde mit ein.

lang der beiden anderen Pfade. Sowohl die Verdünnungsrate als auch die Transportzeit liegen im Bereich des einen oder des anderen Ausbreitungspfads oder dazwischen.

- Relativ ungünstigste Bedingungen hinsichtlich Langzeitsicherheit liegen vor, wenn die Wegsamkeiten durch den Rötaquitard (*so2-so4*) in den Muschelkalk wenig durchlässig sind und gleichzeitig die Transportverzögerung in der Grube derart gering ist, dass Radionuklide früh, noch in Verbindung mit einer hohen Rate der Lösungsauspressung, in das Deckgebirge übertreten können. In diesem Fall dominiert der Ausbreitungspfad in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm mit kurzer Transportzeit und ungünstig niedriger Verdünnung.

Bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung ergeben sich nach dem bisher Gesagten folgende für die Radionuklidausbreitung im Deckgebirge relevanten Unterschiede zu den Verhältnissen bei einer Stilllegung gemäß /HMGU 2007/:

- Als Folge der stärkeren gebirgsmechanischen Bewegungen nach Stilllegung der Schachtanlage kann die kumulierte Leitfähigkeit der Wegsamkeiten durch den Rötaquitard (*so2-so4*) in den Muschelkalk größer sein. Ist das der Fall, weisen der potenziell ungünstige Ausbreitungspfad in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm und der entsprechende Zweig des Pfads in das Exfiltrationsgebiet m-Amm eine geringere Bedeutung auf. Dies ist ein neutraler bis günstiger Unterschied.
- Sofern die gleichen gebirgsmechanischen Bewegungen jedoch auch neue kanalisierende Wegsamkeiten in Fallrichtung im Rötanhydrit (*so1A*) schaffen (z.B. entlang der Querstörung der Ammerbeek), dann fällt die Verschiebung der relativen Bedeutung der verschiedenen Pfade geringer aus oder sie ist sogar vernachlässigbar gering.
- Sofern der Zutritt von an NaCl ungesättigter Deckgebirgslösung beim Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke ausbleibt oder höchstens von mäßigem Ausmaß ist, ist eine geringere Rate der Lösungsauspressung zu erwarten. Dies ist ein günstiger Unterschied.
- Die zu Beginn der Auspressphase ausgepresste Lösung wird Deckgebirgslösung sein, die sich in der Grube durch Umlösung am Versatz und am anstehenden Gestein verändert hat. Ihre Dichte wird geringer als jene des Schutzfluids gemäß /HMGU 2007/ sein. Dadurch werden Dichteeffekte weniger stark wirken, was einen nachteiligen Unterschied darstellt. In Bezug auf die Radionuklidausbreitung betrifft dies allerdings nur die Radionuklide aus den MAW.
- Die Transportverzögerung in der Grube für Radionuklide aus den LAW wird eher stärker, aufgrund der dichtebedingten Grenzschicht (vgl. Kapitel 6.1.8) in jedem Fall robuster als im Bezugskonzept /HMGU 2007/ sein, u.a. wegen eines geringeren Einflusses von kanalisierenden Effekten. Dies ist ein günstiger Unterschied, insbesondere in Verbindung mit der vermutlich niedrigeren Rate der Lösungsauspressung.

In Bezug auf die vermutlichen quantitativen Auswirkungen weist eine Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung gegenüber dem Bezugskonzept eher Vorteile auf. Sie führt jedoch – wie in Bezug auf andere Systemteile – auch in Bezug auf den Systemteil „Deckgebirge“ auf größere Ungewissheiten, d.h. eine schlechtere Prognostizierbarkeit, und eine geringere Robustheit des Gesamtsystems. Diese Bewertung beruht auf der Einschätzung der möglichen

relativen Bedeutung des potenziell ungünstigen Ausbreitungspfads in das Exfiltrationsgebiet vD-Amm. In Bezug auf die Ausbreitung in das Exfiltrationsgebiet m-Witt, der langzeitsicherheitsbestimmenden Ausbreitung bei bestehenden Wegsamkeiten durch den Rötaquitard (*so2-so4*) und wirksamer Transportverzögerung im Grubengebäude, sind die Verhältnisse für beide Stilllegungsoptionen gleich und die Langzeitauswirkungen hängen „nur“ von den bis ca. 10 000 Jahren kumuliert aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austretenden Radionuklidmengen (Aktivitäten) ab.

6.1.10 Radionuklidtransport in der Gasphase

Die großen Mengen an Metallen und organischen Stoffen, welche mit den Abfällen in das Grubengebäude eingebracht wurden, werden aufgrund von Korrosion und mikrobieller Zersetzung zur Bildung entsprechend großer Gasmengen führen (vgl. Kapitel 6.1.4). Dadurch bildet sich im Grubengebäude eine Gasphase.

Bei der Gasbildung entstehen volatile Verbindungen, die auch Radionuklide aus dem Abfall enthalten können. Dadurch können Radionuklide in die Gasphase gelangen. Grundsätzlich möglich ist dies für folgende Radionuklide: ^{3}H (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 zu erwartenden Zeit bis zum beginnenden Gasübertritt aus der Grube in das Deckgebirge ist nur das ^{14}C in der volatilen Verbindung $^{14}CH_4$ für die Radionuklidfreisetzung auf dem Gaspfad von potenzieller Bedeutung.

Die Gase (ggf. mit einem gewissen Gehalt an radioaktiven volatilen Molekülen) fließen in der Grube vom Ort ihres Entstehens gegen das Grubenhöchste ab, wobei ein Teil im Porenraum des Versatzes oder unterhalb von lokalen Sperrschichten gespeichert wird (vgl. Kapitel 6.1.6). Im oberen Teil des Grubengebäudes bildet sich ein Gaspolster aus. Wenn das Gaspolster die oberste Wegsamkeit durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere erreicht, fließt das Gas in das Deckgebirge ab. Im Deckgebirge steigt Gas entlang der vorliegenden Wegsamkeiten weiter auf und gelangt schließlich in die Biosphäre. Die Freisetzung von Radionukliden als gasförmige Verbindungen (volatile Radionuklide) wird als “Freisetzung über den Gaspfad“ bezeichnet.

Die Freisetzung von volatilen Radionukliden auf dem Gaspfad (im wesentlichen ^{14}C in der Verbindung $^{14}CH_4$) hängt von folgenden Prozessen ab:

- Übergang des Radionuklids in eine volatile Verbindung und Übertritt des entstehenden Moleküls in die Gasphase, abhängig vom chemischen Milieu, der Löslichkeit der volatilen Verbindung, der Gas- und Lösungsmenge in der Einlagerungskammer sowie der Konzentration der gleichen, jedoch nicht radioaktiven Verbindung in der Einlagerungskammer,
- Aufstieg der Gasphase (mit örtlich unterschiedlichem Gehalt an Radionukliden) bis in das Grubenhöchste mit lokaler Gasspeicherung im Porenvolumen und unter lokalen Sperrschichten entlang der Aufstiegspfade (mit vermutlich relativ kleinen Fließquerschnitten der Aufstiegspfade),

- Akkumulation der aufsteigenden Gase im Grubenhöchsten (Bildung eines Gaspolsters), wobei die Untergrenze des Gaspolsters mit zunehmender Gasmenge im Grubenhöchsten absinkt und sich die Radionuklidkonzentration im Gaspolster räumlich ausgleicht,
- Beginn des Gasübertritts aus der Grube in das Deckgebirge, sobald die Untergrenze des Gaspolsters bis zur höchstgelegenen Wegsamkeit durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere abgesunken ist, verbunden mit dem Übertritt von Radionukliden in das Deckgebirge,
- Aufstieg der Gasphase (mit einem Radionuklidgehalt entsprechend jenem im Gaspolster im Grubenhöchsten) durch das Deckgebirge bis in die Biosphäre, wiederum mit Gasspeicherung im Porenraum und unter lokalen Sperrschichten entlang der Aufstiegspfade.

Während des gesamten Aufstiegs von Gas von den Abfällen bis in die Biosphäre, d.h. sowohl im Grubengebäude als auch im Deckgebirge, erfolgt ein Austausch von volatilen radioaktiven und nicht radioaktiven Molekülen zwischen der Gasphase und der angrenzenden Flüssigphase. Für Methan in Form des $^{14}CH_4$ und der entsprechenden nichtradioaktiven Verbindung $^{12}CH_4$,heißt dies, dass $^{14}CH_4$ und $^{12}CH_4$ im Verhältnis der entsprechenden Isotope in der Gasphase bis zur Löslichkeitsgrenze aus der Gasphase in die Flüssigphase übertreten. Sofern die Flüssigphase bereits gelöstes Methan enthält, setzt nach Erreichen der Löslichkeitsgrenze ein Austauschprozess ein, wobei $^{14}CH_4$ aus der Gasphase in die Flüssigphase und $^{12}CH_4$ aus der Flüssigphase in die Gasphase übertreten. Insgesamt führt dies zu einer Minderung des Gesamt-Methan-Anteils ($^{14}CH_4$+$^{12}CH_4$) und zusätzlich zu einer Minderung des $^{14}CH_4$: $^{12}CH_4$-Verhältnisses in der Gasphase.

Die Rate, mit der $^{14}CH_4$ aus der Grube in das Deckgebirge übertritt, ergibt sich aus der Gasaustrittsrate aus der Grube und der $^{14}CH_4$–Konzentration im Gaspolster zum Zeitpunkt des Austritts.

Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse für /HMGU 2007/ wurden Radionuklidtransport und -freisetzung in der Gasphase quantitativ, d.h. auch mit Modellrechnungen, analysiert. Dabei wurden verschiedene vereinfachende konservative Annahmen getroffen. Eine wichtige Annahme war die Annahme der instantanen Bildung von $^{14}CH_4$ im Unterschied zur allmählichen Bildung des nicht radioaktiven mikrobiellen Methans. Dadurch werden die $^{14}CH_4$–Konzentration im Gaspolster im Grubenhöchsten und somit auch die Austrittsrate in das Deckgebirge (in Bq/a) überschätzt. Eine weitere wichtige Vereinfachung war die Vernachlässigung der $^{14}CH_4$–Rückhaltung im Grubengebäude durch Übertritt in die Flüssigphase. Die dritte zu erwähnende Vereinfachung war die völlige Vernachlässigung der Barrierenwirkung des Deckgebirges. Unter diesen Bedingungen hängt die berechnete potenzielle Strahlenexposition, d.h. einer der Indikatoren für die Bewertung der Langzeitsicherheit der Stilllegungsoption, von folgenden Größen ab:

- dem Zeitpunkt, zu dem der Gasübertritt aus der Grube in das Deckgebirge einsetzt,
- die kumulierte Rate der Gasbildung im Grubengebäude zum Zeitpunkt des Beginns des Gasübertritts aus der Grube,

- die maximale Rate des Gasübertritts aus der Grube (diese wird relativ kurze Zeit nach dem Einsetzen des Gasübertritts erreicht) und
- die $^{14}CH_4$–Konzentration im Gaspolster im Grubenhöchsten zum Zeitpunkt des Beginns des Gasübertritts aus der Grube.

Je nach dem Expositionspfad in der Biosphäre ist dabei die Übertrittsrate von $^{14}CH_4$ in das Deckgebirge (als Aktivitätsfluss, d.h. in Bq/a) oder die $^{14}CH_4$–Konzentration in der übertretenden Gasphase (in Bq/m^3_{STP}) bestimmend für die berechnete potenzielle Strahlenexposition.

Bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung ergeben sich im Hinblick auf die Freisetzung von volatilen Radionukliden in der Gasphase im Vergleich zum Bezugskonzept folgende Einschätzungen:

- In Bezug auf die Gasbildung und die Bildung von $^{14}CH_4$ sind keine signifikanten Unterschiede zu erwarten; mindestens können keine signifikant günstigeren Verhältnisse bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung angenommen werden (vgl. Kapitel 6.1.3 und 6.1.4).
- Aufgrund der weitergehenden Verfüllung der unverfüllten Hohlräume mit Sorelbeton gemäß Kapitel 4.5 und der geringeren Porosität des Salzversatzes nach Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke werden der Gasaufstieg zum Grubenhöchsten und die Bildung des Gaspolsters rascher erfolgen. Unter der Voraussetzung der o.g. Konservativitäten ist dieser Effekt nachteilig.
- Aufgrund der stärkeren gebirgsmechanischen Verformungen während des Volllaufens des Oberen Baufelds in der Südflanke können sich die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere nach oben ausdehnen und im Bereich des Grubenhöchsten neue Wegsamkeiten entstehen. In Verbindung mit dem vorher genannten Effekt setzt der Gasübertritt in das Deckgebirge früher ein. Dies ist ein nachteiliger Unterschied.
- Die maximale Gasauspressrate hängt von vielen Bedingungen, u.a. von den Gasbildungsraten und den Konvergenzraten der Grubenbaue zum entsprechenden Zeitpunkt ab. Insgesamt sind die Zusammenhänge aber zu komplex und die Ungewissheiten zu groß, um eine begründete vergleichende Bewertung in Bezug auf die maximale Gasauspressrate vorzunehmen.

In Bezug auf die Langzeitauswirkungen durch Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad werden keine erheblichen Unterschiede zwischen einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung und dem Bezugskonzept erwartet. Je nach dem relativen Einfluss der genannten Prozesse können die Auswirkungen bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung größer oder kleiner sein.

6.1.11 Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen von chemischen und chemotoxischen Stoffen

Wie bereits in Kapitel 2.3 ausgeführt, befindet sich in den eingelagerten Abfallgebinden auch eine Vielzahl von chemischen und chemotoxischen Stoffen, die beim Übertritt in das oberflä-

chennahe Grundwasser dieses gefährden können. Für die Langzeitsicherheitsanalyse wurde das in den Einlagerungskammern befindliche Inventar an chemischen und chemotoxischen Stoffen kammerspezifisch abgeschätzt, einschließlich Bandbreite /BUC 2006a/. Das Inventar dieser Stoffe im Fremdversatz und das Inventar, welches mit dem Schutzfluid und anderen Versatzstoffen gemäß Konzept /HMGU 2007/ in die Grube eingetragen worden wäre, wurde ebenfalls nachvollziehbar abgeschätzt /BUC 2006c/. Dagegen wurde das im Rahmen der Abfallbeseitigung des Bergbaubetriebs außerhalb der Einlagerungskammern verkippte Inventar chemischer und chemotoxischer Stoffe bisher nicht erhoben (vgl. auch Kapitel 2.3).

Durch Kontakt mit der technischen $MgCl_2$-Lösung oder der zutretenden Deckgebirgslösung werden die chemischen und chemotoxischen Stoffe analog den Radionukliden mobilisiert und gehen in eine transportfähige Phase über (vgl. Kapitel 6.1.7). Die Stoffe breiten sich wie die Radionuklide im Grubengebäude (vgl. Kapitel 6.1.8) und Deckgebirge (vgl. Kapitel 6.1.9) aus und können letztlich in Oberflächenwässer oder oberflächennahes Grundwasser gelangen. Im Rahmen der Langzeitsicherheitsanalyse für eine Stilllegung gemäß dem Bezugskonzept /HMGU 2007/ wurde das Gefährdungspotenzial durch die chemischen und chemotoxischen Stoffe in der Schachtanlage am Standort abgeschätzt. Dies erfolgte mittels einfacher Berechnungen, wobei einige vereinfachende konservative Annahmen getroffen wurden. Unter diesen Bedingungen hängen die berechneten potenziellen Konzentrationen der Wasser gefährdenden Stoffe im Oberflächenwasser oder im oberflächennahen Grundwasser von folgenden Größen ab:

- dem stoff- bzw. elementspezifischen Inventar
- ggf. der wirksamen Elementlöslichkeit in einer Einlagerungskammer und Rückhaltung durch Sorption
- dem Lösungsvolumen im Grubenbereich bei der Mobilisierung
- dem Verdünnungsfaktor für den Ausbreitungspfad im Grubengebäude und im Deckgebirge

Die Untersuchungen im Zusammenhang mit dem Referenzkonzept /HMGU 2007/ zeigten, dass für keines der betrachteten Elemente die Grenzkonzentration bzw. der Prüfwert der wasserrechtlich relevanten Stoffe im Grundwasser überschritten wird /BUC 2006b/, /BUC 2006c/. Für folgende Elemente beträgt das Verhältnis des Maximalwertes zum Grenzwert mehr als ein Zehntel: Cl (Verhältnis zum Grenzwert: 0,12), Mg (0,35), Pb (0,11), Sb (0,20) und U (0,11).

Bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung ergeben sich im Hinblick auf die Freisetzung von chemischen und chemotoxischen Stoffen im Vergleich zum Bezugskonzept folgende Unterschiede bzw. Ähnlichkeiten:

- Das Inventar an eingebrachten Sorelbaustoffen wird höher sein.
- Die Konzentrationen aus den Inventaren in den Einlagerungskammern sind geringfügig höher (inventarbestimmt), wegen des geringeren initialen Porenvolumens, oder sehr ähnlich (löslichkeitsbegrenzt), wegen des weitgehend unveränderten Milieus.

- Die Verdünnungsfaktoren im Grubengebäude sind voraussichtlich kleiner, da die Porenvolumina in der Grube nach dem Volllaufen geringer sind.
- Die Verdünnungsfaktoren im Deckgebirge sind voraussichtlich vergleichbar.

Diese Aussagen lassen den Schluss zu, dass die Konzentrationen der wassergefährdenden Stoffe etwas höher sein werden[40]. Es ist bei diesen Aussagen zu berücksichtigen, dass für die Mobilisierung und die Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen das Inventar der chemotoxischen Stoffe mit einer Bandbreite von + 50 % angenommen wurde[41]. Die Unterschiede zum Bezugskonzept /HMGU 2007/ bezüglich der Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen von chemischen und chemotoxischen Stoffen sind demnach als geringfügig negativ zu bewerten.

Anzumerken bleibt, dass der Grad der Unterschätzung des Inventars außerhalb der Einlagerungskammern nach /BUC 2006c/ für einige chemotoxische Stoffe nicht angegeben werden kann. Aus diesen Gründen kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei einer Neuberechnung unter Einbeziehung dieser bisher unbekannten Inventare sowohl für das Bezugskonzept als auch für das Konzept Vollverfüllung eine Überschreitung von Grenzkonzentrationen bzw. Prüfwerten im Grundwasser eintreten kann.

6.2 Bewertung des Gesamtsystems

Die Bewertung des Gesamtsystems betrifft die Langzeitsicherheit, die Prognostizierbarkeit und die Robustheit. Sie ist insofern vorläufig, als sie sich nicht auf Berechnungen abstützen kann und lediglich auf einem umfangreichen Systemverständnis und qualitativen Vergleichen mit einem System beruht, für das umfangreiche Modellrechnungen durchgeführt wurden (gemäß Bezugskonzept /HMGU 2007/, vgl. auch Einleitung zu Kapitel 6.1).

6.2.1 Langzeitsicherheit

In Kapitel 6.1 wurden die möglichen Entwicklungen der Schachtanlage Asse II nach einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung und die Auswirkungen hinsichtlich der Langzeitsicherheit gegliedert nach den möglichen sicherheitsrelevanten Prozessen diskutiert und bewertet. Die Bewertung erfolgte dabei in Bezug auf die möglichen Entwicklungen der Schachtanlage bei einer Stilllegung gemäß dem Bezugskonzept /HMGU 2007/. Für dieses Stilllegungskonzept wurden umfangreiche Analysen zur Langzeitsicherheit durchgeführt (/HMGU 2007/ und verschiedene ergänzende Arbeiten). Insgesamt kommen diese Analysen für eine Stilllegung zu folgenden Schlüssen (allerdings ohne Bestätigung durch ein formelles Planfeststellungsverfahren):

---

40 Dies betrifft jedoch nicht Mg als vermeintlich „kritischstes“ Element und Cl, welche durch die Konzentration in der mit den Salzgesteinen im Gleichgewicht stehenden technischen $MgCl_2$-Lösung bzw. dem Schutzfluid im Bezugskonzept /HMGU 2007/ bestimmt werden, nicht aber durch die eingebrachten Mg-basierten Baustoffe wie Sorelbeton.

41 Hiervon ausgenommen sind U, Th und Pu, da diese bereits für die Bestimmung des Aktivitätsinventars an der oberen Grenze abgeschätzt wurden.

- Die für den Lösungspfad berechnete potenzielle Strahlenexposition bei vollständiger lokaler Selbstversorgung mit Lebensmitteln liegt im Bereich von 0,3 mSv/a (Wert von § 47 StrlSchV für die effektive Dosis), ohne Beregnung von Weiden und Ackerland mit radionuklidhaltigem Grundwasser in geringem, jedoch signifikantem Maß darunter.
- Diese Aussage zur potenziellen Strahlenexposition über den Lösungspfad beruht auf der Vernachlässigung von Rückhalteeffekte im Deckgebirge durch Sorption aufgrund einer ungenügenden Datenlage. Abschätzungen zeigen, dass die Rückhaltung im Deckgebirge durch Sorption die potenzielle Strahlenexposition erheblich verringern dürfte.
- Die für den Gaspfad berechnete potenzielle Strahlenexposition variiert je nach Expositionspfad in der Biosphäre zwischen Werten, die um mehrere Größenordnungen unter dem Wert von 0,3 mSv/a liegen, und Werten knapp unterhalb von 0,3 mSv/a. Die letztgenannten Werte betreffen durchwegs die Kombination eines wenig wahrscheinlichen, ungünstigen Expositionspfads in der Biosphäre mit ungünstigen Verhältnissen in der Schachtanlage.

Der Vergleich der möglichen Entwicklungen der Schachtanlage nach einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung mit jenen nach einer Stilllegung gemäß dem Bezugskonzept in Kapitel 6.1 führt auf die in Tab. 5 zusammengefassten Bewertungen der Unterschiede.

Tab. 5: Zusammenfassung der Bewertung des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung im Vergleich mit dem Bezugskonzept /HMGU 2007/ hinsichtlich Langzeitsicherheit in Kapitel 6.1

Prozessgruppen bzw. Aspekte der Systementwicklung	**Bewertung des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung** (im Vergleich zum Bezugskonzept)
Volllaufen des Oberen Baufelds in der Südflanke	- vorteilhaft aufgrund des späteren Beginns der Lösungsauspressung in das Deckgebirge - vorteilhaft aufgrund der geringeren konvegenzaktiven Volumen bei Beginn der Lösungsauspressung in das Deckgebirge (bei Ausbleiben eines mengenmäßig erheblichen Zutritts von an NaCl ungesättigter Lösung) - erheblich ungünstiger in Bezug auf die Prognostizierbarkeit (vgl. gesonderte Bewertung in Kapitel 6.2.2)
Mögliche Gesteinsum- und -auflöseprozesse	- neutral im hydraulischen Bereich der technischen $MgCl_2$-Lösung: es sind ebenfalls keine signifikanten Umlösungen zu erwarten - neutral im hydraulischen Bereich der Deckgebirgslösung bei Zutritt von an NaCl gesättigter Lösung: es sind keine Umlösungen mit signifikantem Einfluss auf die Langzeitsicherheit zu erwarten - ungünstiger bei abnehmender Sättigung der zutretenden Lösung an NaCl wegen der Auswirkungen auf das Tragsystem und die Radionuklidausbreitung - erheblich ungünstiger bezüglich der Prognostizierbarkeit bei Zutritt von an NaCl ungesättigter Lösung
Chemisches Milieu in den verschiedenen Grubenbereichen	- neutral bezüglich des Radionuklidtransports aus den LAW-Kammern für den Zeitraum vom Einleiten der technischen $MgCl_2$-Lösung bis zu einer Veränderung des initialen chemischen Milieus - günstiger oder ungünstiger bezüglich des Radionuklidtransports aus den LAW-Kammern für den Zeitraum nach einer Veränderung des initialen chemischen Milieus - neutral bezüglich der Radionuklidausbreitung im Oberen Baufeld in der Südflanke bei Zutritt von an NaCl-gesättigter Lösung - geringfügig ungünstiger bezüglich der Prognostizierbarkeit der zeitlichen Entwicklung des Milieus in den LAW-Kammern, wobei die Entwicklung voraussichtlich rascher erfolgen wird und größeren Ungewissheiten hinsichtlich der Auswirkungen des Lösungsaustausches unterliegt - geringfügig ungünstiger bezüglich der Radionuklidmobilisierung und -ausbreitung für Radionuklide aus der MAW-Kammer

Prozessgruppen bzw. Aspekte der Systementwicklung	**Bewertung des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung** (im Vergleich zum Bezugskonzept)
Gasbildung	- günstiger oder ungünstiger bezüglich des Radionuklidtransports für den Zeitraum nach einer Veränderung des initialen chemischen Milieus - neutral in Bezug auf die Rate der Gasbildung und deren zeitlicher Entwicklung für den Zeitraum eines stabilen initialen Milieus (im Rahmen der Prognostizierbarkeit) - geringfügig ungünstiger wegen eingeschränkter Prognostizierbarkeit der Gasbildung wegen Ungewissheiten in Bezug auf das chemische Milieu in den Einlagerungskammern
Gebirgsmechanische Entwicklung und Konvergenz der Grubenbaue	- vorteilhaft aufgrund höherer Versatzdrücke und dadurch verringerter Deckgebirgsverschiebungsraten - vorteilhaft nach Volllaufen der Grube wegen geringerem verbleibendem konvergenzaktivem Volumen und geringeren Konvergenzraten - ungünstiger, da sich erst nach Volllaufen und (relativ spätem) Aufbau eines hydrostatischen Stützdrucks im Porenraum ein robustes und prognostizierbares Konvergenzverhalten einstellt - erheblich ungünstiger während der Phase des Volllaufens aufgrund der gebirgsmechanischen Anregung (Feuchtekriechen, Stabilitätsverringerung, Versatzdruckabfall, Deckgebirgsaktivierung) ohe pneumatischen Stützdruck und ohne zügigen hydraulischen Druckaufbau im stärker geschädigten Tragsystem; mit der Konsequenz, dass eine Prognose und Bewertung der Systementwicklung bis zum Erreichen von hydrostatischen Druckverhältnissen aus gebirgsmechanischer Sicht gegenwärtig noch nicht möglich ist
Fluidbewegung im Grubengebäude sowie Übertritte in das Deckgebirge	- deutlich vorteilhaft aufgrund der hydraulischen Trennung durch einen Dichtesprung zwischen technischer $MgCl_2$-Lösung und zugetretener Deckgebirgslösung (Grenzschicht), wirksam für Bewegung der technischen $MgCl_2$-Lösung - vorteilhaft in Bezug auf die Lösungsauspressrate in das Deckgebirge bei anhaltender Sättigung der vorher zugetretenen Deckgebirgslösung an NaCl - ungünstiger wegen stärkeren Lösungsbewegungen während der Phase des Volllaufens - ungünstiger in Bezug auf die Gasausbreitung und den Gasübertritt in das Deckgebirge hinsichtlich Gaspfad

Prozessgruppen bzw. Aspekte der Systementwicklung	**Bewertung des Stilllegungskonzepts Vollverfüllung** (im Vergleich zum Bezugskonzept)
Rückhaltung und Mobilisierung von Radionukliden in den Einlagerungskammern	- neutral bezüglich Robustheit und Prognostizierbarkeit auf der Basis von Modellrechnungen - neutral in Bezug auf Radionuklidtransport aus der MAW-Kammer - nicht prognostizierbar (günstiger oder ungünstiger) in Bezug auf Radionuklidtransport aus LAW-Kammern für den Zeitraum nach einer Änderung des initialen chemischen Milieus, da dieses relevante Elementkonzentrationen bestimmt
Radionuklidrückhaltung und -ausbreitung in der Grube und Übertritt in das Deckgebirge in Lösung	- vorteilhaft in Bezug auf die Ausbreitung von Radionukliden aus den LAW nach Volllaufen der Grube - ungünstiger bezüglich der geringeren Prognostizierbarkeit der Radionuklidausbreitung im Bereich der technischen $MgCl_2$-Lösung während der Phase des Volllaufens - ungünstiger in Bezug auf die Radionuklidausbreitung aus den MAW, jedoch gesichertes Ausbleiben eines Radionuklidübertritts in das Deckgebirge während der Phase des Volllaufens - ungünstiger wegen geringerer Robustheit und Prognostizierbarkeit bei Zutritt von an NaCl untersättigter Deckgebirgslösung
Radionuklidrückhaltung und -transport im Deckgebirge in Lösung	- vorteilhaft in Bezug auf die potenziell ungünstigen Ausbreitungspfade - neutral in Bezug auf den wahrscheinlich sicherheitsrelevanten Ausbreitungspfad
Radionuklidtransport in der Gasphase	- keine erhebliche Abweichung erwartet (Auswirkungen können größer oder kleiner sein) - wenig belastbare Bewertung

In quantitativer Hinsicht weicht das Stilllegungskonzept Vollverfüllung bezüglich der Langzeitauswirkungen hinsichtlich Ausbreitung und eventueller Freisetzung von Radionukliden vielfach in günstiger, teilweise aber auch in nachteiliger Weise vom Bezugskonzept /HMGU 2007/ ab. Diese Abweichungen können i.A. nicht quantitativ eingestuft und gegeneinander abgewogen werden. Der Umstand, dass die für das Bezugskonzept /HMGU 2007/ ermittelten potenziellen Strahlenexpositionen im Bereich der Maxima nur relativ wenig unterhalb des Werts von 0,3 mSv/a liegen, führt deshalb zu folgender Aussage:

Eine Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung führt nach Ansicht der Autoren zu einem System, das im Rahmen der bestehenden Bedingungen radiologisch langzeitsicher ist. Es kann jedoch nicht belastbar vorhergesagt werden, ob der Nachweis gelingen wird, dass der Wert von 0,3 mSv/a für die effektive Dosis mit hoher Wahrscheinlichkeit und hohem Konfidenzgrad für alle zu betrachtenden Szenarien zuverlässig unterschritten wird.

Eine Aussage, zu welchem Ergebnis ein radiologischer Langzeitsicherheitsnachweis führen wird, kann nur auf der Basis von speziellen Modellrechnungen zu den Auswirkungen der im vorliegenden Bericht angesprochenen Prozesse formuliert werden.

Diese Aussage gilt gleichfalls für die Prognose der gebirgsmechanischen Systementwicklung: Bis zum Aufbau eines hydrostatischen Stützdrucks im zugänglichen Porenraum des Bergwerks (zzgl. des Überdrucks als Folge der Lösungsauspressung in das Deckgebirge) ist von einem labilen Systemverhalten auszugehen, dessen Bewertung nur mit speziellen Modellrechnungen möglich ist. Aufgrund der sehr komplexen gebirgsmechanisch positiven und negativen Entwicklungen ist eine Abschätzung ohne Modellrechnungen nicht möglich.

6.2.2 Prognostizierbarkeit

Für die Bewertung des Systems Schachtanlage Asse II hinsichtlich Langzeitsicherheit – und damit für die Bewertung einer Stilllegungsoption – ist die Prognostizierbarkeit ein wesentlicher Aspekt. Sie umfasst die Antworten auf die folgenden Fragen:

- Kann die Szenarienanalyse für die Phase nach Stilllegung in ausreichender Vollständigkeit und Zuverlässigkeit durchgeführt werden?
- Können die Auswirkungen von eventuellen Störfällen während der Stilllegungsphase auf die Systementwicklung nach Stilllegung (oder nach Abbruch der Stilllegungsarbeiten) in ausreichender Zuverlässigkeit eingegrenzt werden?
- Sind die sicherheitsrelevanten Parameter bekannt oder können sie erhoben werden?
- Sind die sicherheitsrelevanten Prozesse modellierbar?
- Ist ein robuster Sicherheitsnachweis zu erwarten?[42]

Das Einleiten der technischen $MgCl_2$-Lösung bis in die Firstteufe der 700-m-Sohle und das Trockenbelassen des verbleibenden fluidzugänglichen Volumens oberhalb der 700-m-Sohle ermöglichen zu Beginn der Phase nach Stilllegung das Zutreten von Deckgebirgslösung. Deckgebirgslösung wird so lange zutreten, bis die Grube vollgelaufen ist. Weder die Rate des Lösungszutritts und deren zeitliche Entwicklung (und damit die Dauer der Phase des Volllaufens) noch die Zusammensetzung der zutretenden Lösung sind prognostizierbar oder auch nur innerhalb von plausiblen Bandbreiten eingrenzbar.

Die gebirgsmechanische Prognostizierbarkeit ist auch bei einem weiteren Zutritt von an NaCl gesättigter Lösung eingeschränkt, da die Phase mit Feuchtekriechen ohne nennenswerte Stützung durch einen hohen Fluiddruck relativ lang anhält. Dadurch müssen Prognosen in aller Voraussicht den Korridor der Erfahrungen verlassen. Die eingeschränkte Prognostizierbarkeit betrifft sowohl das Grubengebäude und die südlich angrenzende Steinsalz-Barriere als auch das Deckgebirge in der Südflanke. Aufgrund der Ungewissheiten der gebirgsmechanischen Verformungen im Oberen Baufeld in der Südflanke kann auch die Wirksamkeit der Kapselung der Carnallititaufschlüsse oberhalb der 700-m-Sohle gemäß Kapitel 4.1.2 nicht ohne Vorbehalt unterstellt werden. Bei einem Zutritt von erheblichen Mengen von an

[42] Auf den Aspekt der Robustheit wird in Kap. 6.2.2 gesondert eingegangen.

NaCl ungesättigter Deckgebirgslösung entsteht durch deren Aufsättigung an Halit im Grubengebäude konvergenzaktives Volumen. Dieses kann weder in Bezug auf den Ort noch auf die Geometrie prognostiziert werden. In diesem Fall ist vermutlich zudem die Wirksamkeit der Kapselung der Carnallititaufschlüsse oberhalb der 700-m-Sohle vermindert. Bei einem erheblichen Zutritt von an NaCl ungesättigter Lösung ist die gebirgsmechanische Prognostizierbarkeit des Systems gegenwärtig als nicht mehr gegeben einzustufen.

Damit sind sowohl die Systementwicklung während der Phase des Volllaufens als auch der Systemzustand zu Beginn der Lösungsauspressung in das Deckgebirge höchstens in einer großen Bandbreite eingrenzbar. Dies hat mehr oder weniger starke, ungünstige Auswirkungen auf die Prognostizierbarkeit vieler anderer Aspekte der Systementwicklung.

Abgesehen von den Langzeitfolgen der stärkeren gebirgsmechanischen Verformungen zu Beginn der Phase nach Stilllegung und jenen von eventuellen Auf- und Umlösungen (Entstehung neuer Wegsamkeiten, Änderung der Lösungsdichte im oberen Bereich in der Grube) wird die hydraulische Prognostizierbarkeit des Systems durch die Autoren als ausreichend für einen Langzeitsicherheitsnachweis eingestuft. Die hydraulische Trennung in einen oberen und einen unteren Grubenbereich durch eine Grenzschicht mit hohem Gradienten der Lösungsdichte wirkt sich stabilisierend auf die hydraulischen Verhältnisse aus und fördert dadurch die Prognostizierbarkeit.

Die hydrochemische Prognostizierbarkeit betrifft in erster Linie die Einlagerungskammern, die Gasbildung in diesen und die Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen. Aufgrund der etwas stärkeren konvergenzbedingten Lösungsbewegungen in der Phase des Volllaufens ist die hydrochemische Prognostizierbarkeit etwas schlechter als bei einer Stilllegung gemäß Bezugskonzept einzustufen. Die Autoren halten die hydrochemische Prognostizierbarkeit der Verhältnisse in den LAW-Kammern jedoch noch für ausreichend für einen Langzeitsicherheitsnachweis.

Abgesehen von der eingeschränkten bis schlechten Prognostizierbarkeit der Auswirkungen von gebirgsmechanischen Prozessen ist die Prognostizierbarkeit in Bezug auf die Radionuklidausbreitung in Lösung und jene in der Gasphase mit dem Bezugskonzept vergleichbar und damit ausreichend für einen Langzeitsicherheitsnachweis. Die bereits oben erwähnte hydraulische Trennung durch eine dichtebedingte Grenzschicht mindert u.a. die mögliche Kanalisierung des Transports von Radionukliden aus den LAW oberhalb der 700-m-Sohle und bewirkt dadurch eine Verbesserung der Prognostizierbarkeit in Bezug auf die Kanalisierung des Transports.

Insgesamt ist die Prognostizierbarkeit des Systems in signifikantem Ausmaß schlechter als bei einer Stilllegung gemäß HMGU 2007. Die eingeschränkte bis schlechte gebirgsmechanische Prognostizierbarkeit und die sich daraus ergebenden Einschränkungen der Prognostizierbarkeit in vielen anderen Aspekten stellen ein ernst zu nehmendes Hindernis für einen erfolgreichen Nachweis der Langzeitsicherheit dar. Sie beeinträchtigen u.a. die Robustheit des Nachweises.

6.2.3 Robustheit

Das System Schachtanlage Asse II ist nach der Stilllegung robust, wenn sich Variationen der Systemeigenschaften am Ende der Stilllegungsphase und solche der äußeren Einflüsse während der Phase nach Stilllegung (jeweils im Rahmen der bestehenden Ungewissheiten) nur mäßig auf die Systementwicklung und insbesondere die resultierenden Folgen in der Biosphäre auswirken. Aufgrund der für das Referenzkonzept durchgeführten Modellrechnungen konnte das System Schachtanlage Asse II als relativ robust eingestuft werden /HMGU 2007/. Eine Einschränkung der Robustheit bestand in Bezug auf den Beginn des Radionuklidübertritts in das Deckgebirge in Verbindung mit der Rate der dann noch erfolgenden Lösungsauspressung aus der Grube.

In Bezug auf die Systemrobustheit weist das Stilllegungskonzept Vollverfüllung die Vorteile der hydraulischen Trennung des oberen vom unteren hydraulischen Bereich des Grubengebäudes durch eine dichtebedingte Grenzschicht und der – im Vergleich mit den Verhältnissen beim Bezugskonzept /HMGU 2007/ – vermutlich niedrigeren Rate der Lösungsauspressung bei vergleichbarer Radionuklidrückhaltung im Grubengebäude auf. Aufgrund der wesentlich größeren Bandbreite der Ungewissheiten in Bezug auf die gebirgsmechanischen Aspekte und deren Auswirkungen auf die anderen Aspekte des Systems (vgl. Kapitel 6.2.2) sowie der sich daraus ergebenden größeren Bandbreite der möglichen Zustände mit einem breiteren Spektrum an potenziell sicherheitsrelevanten Prozessen ist die Schachtanlage Asse II bei einer Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung gleichwohl nicht als robustes System einzustufen.

Die Ungewissheiten in Bezug auf die gebirgsmechanischen Aspekte in der Phase des Volllaufens und deren Auswirkungen auf viele andere Aspekte des Gesamtsystems bzw. die diesbezüglich eingeschränkte bis schlechte Prognostizierbarkeit können reduziert werden, sofern sich die Phase des Volllaufens verkürzen ließe oder der Stützdruck für das Tragsystem erhöht werden könnte. Dies würde sich entweder bei schnellerem Volllaufen der Grube mit einer an NaCl gesättigten Lösung oder bei einer besseren, über den Zeitraum des Volllaufens anhaltenden Konturstabilisierung des Grubengebäudes ergeben.

7. Zusammenfassung und sicherheitstechnische Bewertung

Das Stilllegungskonzept Vollverfüllung zeichnet sich dadurch aus, dass die Stilllegungsmaßnahmen kein Hantieren mit den Abfällen, kein Eindringen in die Einlagerungskammern (abgesehen vom Stoßen von Bohrungen in den Firstbereich zum Einbringen von Versatzmaterial) und kein Auffahren von größeren Hohlräumen, welche die Resttragfähigkeit des Systems zusätzlich schwächen würden, beinhalten.

Die umzusetzenden Stilllegungsmaßnahmen entsprechen weitgehend dem Stand der Technik. Insgesamt führt dies zu einer hohen Planungssicherheit, einer relativ kurzen Stilllegungsphase (vom Entscheid bis zum Abschluss der Stilllegung, vorbehaltlich von Zeitverzögerungen aus dem Bewilligungsverfahren) und höchstens geringen Strahlenexpositionen des Personals. Eine radiologische Beeinträchtigung der Bevölkerung aufgrund der Umsetzung der Stilllegungsmaßnahmen kann ausgeschlossen werden.

Die aufgrund des gebirgsmechanischen Zustands der Grube und der ungewissen Entwicklung des Lösungszutritts bestehenden Risiken während der Stilllegungsphase sind im Stilllegungskonzept Vollverfüllung begrenzt, denn die Eintrittswahrscheinlichkeiten einer Abnahme der Resttragfähigkeit des Systems und eines auslegungsüberschreitenden Lösungszutritts sind wegen des Verzichts auf größere Auffahrungen und der verhältnismäßig kurzen Stilllegungsphase gering. Mit fortschreitender Umsetzung der Stilllegungsmaßnahmen nehmen auch die potenziellen Auswirkungen der Störfälle ab, da die „ordentlichen“ Maßnahmen die Notfallmaßnahmen ergänzen und ersetzen. Bei der Umsetzung der Stilllegungsmaßnahmen wird kein Systemzustand geschaffen, bei dem das Eintreten eines der beiden Störfälle besonders ungünstige Auswirkungen zur Folge hätte.

In Bezug auf die Stilllegungsphase ist die Option Vollverfüllung als günstig zu bewerten.

Nach der Stilllegung gemäß dem Konzept Vollverfüllung zeichnet sich das System Schachtanlage Asse II dadurch aus, dass die Abfälle noch an den Orten sind, wo sie eingelagert wurden. Durch den Verzicht auf eine Nassverwahrung der Grube oberhalb der 700-m-Sohle ergibt sich nach Abschluss der Stilllegungsarbeiten eine Phase, während der Lösung aus dem Deckgebirge zutritt und die Grube vollläuft. Während dieser Zeit nimmt das Resthohlraumvolumen in der Grube durch Konvergenz stark ab, wobei noch keine Lösung und somit auch keine gelösten Radionuklide aus der Grube entweichen können. Dies sind günstige Merkmale der Stilllegungsoption. Einschränkend ist anzuführen, dass diese Phase des natürlichen Volllaufens und der erhöhten Hohlraumverringerung nur relativ kurz – wahrscheinlich einige Jahrzehnte – andauert. Außerdem ist die Systementwicklung während dieser Phase nicht prognostizierbar und auch nicht in einer zweckmäßigen Bandbreite einzugrenzen. Die größte Unsicherheit rührt dabei von der nicht mit Sicherheit anhaltenden Sättigung der zutretenden Lösung an NaCl her.

Nach dem Volllaufen der Grube setzt das Auspressen von Lösung und – davon ist auszugehen – mit der Zeit auch das Austreten von Radionukliden in das Deckgebirge ein. Der Verzicht auf die Nassverwahrung der Grube oberhalb der 700-m-Sohle führt zu einer Systementwicklung in der Phase nach Volllaufen der Grube, bei der die Radionuklidausbreitung in der Grube langsamer und die Lösungsbewegung stabiler erfolgt sowie die Lösungsauspres-

sung in das Deckgebirge geringer ist als in einem System mit Nassverwahrung der gesamten Grube. Allerdings schränkt die schlechte Prognostizierbarkeit der Systementwicklung während der Phase des Volllaufens auch die Prognostizierbarkeit der Phase mit möglichem Radionuklidaustritt in das Deckgebirge ein.

Insgesamt kommen die Autoren dieses Berichts zur Gesamtbewertung, dass die Langzeitentwicklung des Systems Schachtanlage Asse II im Rahmen der bestehenden Verhältnisse sicher ist. Es kann jedoch nicht belastbar vorhergesagt werden, ob der Nachweis geführt werden kann, dass der Wert von 0,3 mSv/a für die effektive Dosis mit hoher Wahrscheinlichkeit und hohem Konfidenzgrad für alle zu betrachtenden Szenarien zuverlässig unterschritten wird. Wesentliche Ursache dafür ist die relativ schlechte Prognostizierbarkeit der Systementwicklung, welche als Preis für die Vorteile der zusätzlichen Begrenzung der Radionuklidausbreitung und der geringen Lösungsauspressrate in der Phase nach Volllaufen der Grube aufgefasst werden kann. Für die Nachweisführung der Langzeitsicherheit der stillgelegten Schachtanlage mit verbleibenden Abfällen in der Grube muss angemerkt werden, dass aufgrund von fehlenden Standortdaten die Rückhalteprozesse von Radionukliden durch Sorption im Deckgebirge nicht quantitativ berücksichtigt werden können.

Aufgrund der relativ schlechten Prognostizierbarkeit der Systementwicklung kann die gemäß der Option Vollverfüllung stillgelegte Schachtanlage auch nicht als robust eingestuft werden.

Fazit: Nach Ansicht der Autoren dieses Berichts ist die gemäß der Option Vollverfüllung stillgelegte Schachtanlage langzeitsicher, die Systementwicklung ist jedoch relativ schlecht prognostizierbar und das Systemverhalten deshalb nicht robust. Es ist nicht gewährleistet, dass der Nachweis der Langzeitsicherheit geführt werden kann. Sofern die Prognostizierbarkeit der Systementwicklung ohne erhebliche, anderweitige Nachteile verbessert wird, ist die Vollverfüllung jedoch im Hinblick auf die Langzeitsicherheit eine zur weiteren Verfolgung zu empfehlende Option.

8. Literaturverzeichnis

/ALSA-C 2009a/ Stellungnahme zur vorgesehenen Firstspalt- und Resthohlraumverfüllung im oberen Baufeld in der Südflanke mit Sorelbeton. AF-Colenco AG, NRG Petten, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Memo ALSA-C-7.3M-CO189 (Rev. 1), 13.03.2009

/ALSA-C 2009b/ Stellungnahme zur vorgesehenen Firstspalt- und Resthohlraumverfüllung in der Südflanke auf der 725-m- und der 700-m-Sohle mit Sorelbeton. AF-Colenco AG, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. (in Ausarbeitung)

/ASS 2009a/ Systembeschreibung für die Modellierung von Transportvorgängen im Baufeld an der Südflanke. Volumenbilanz Stand 2009 und hydraulische Parameter. Asse GmbH, August 2009.

/BfS 2009a/ Risswerk der Schachtanlage Asse II. BfS, Juni 2009.

/BfS 2009b/ Strategische Optionen im Hinblick auf auslegungsüberschreitende Ereignisse in der Schachtanlage Asse II. BfS, Juni 2009.

/BfS 2009c/ Beschreibung der Lagerbereiche der Abfälle. Erstellt von Asse GmbH. BfS, März 2009.

/BfS 2009d/ Störfallanalyse Asse – Einschätzung der möglichen Entwicklung des Lösungszutritts während der Betriebsphase der Schachtanlage Asse II. BfS, Stand 12.06.2009

/BMU 2001a/ Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bekanntmachung der Dosiskoeffizienten zur Berechnung der Strahlenexposition, Bundesanzeiger 160 (Beilage), S. 18786, 2001.

/BMU 2001b/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung – StrlSchV) vom 20.07.2001 (BGBl. I S.1714, (2002 I S. 1459)), zuletzt geändert durch Art. 2 G v. 29.08.2008 (BGBl. I 1793).

/BUC 2004/ Bestimmung des Inventars an chemischen und chemotoxischen Stoffen in den eingelagerten radioaktiven Abfällen der Schachtanlage Asse, Buchheim, B.; Meyer, H. (GSF); Tholen, M. (GSF), Buchheim Engineering, 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.

/BUC 2006c/ Ergänzende Stellungnahme zur Prüfung auf Einhaltung der wasserrechtlichen Bestimmungen von chemischen und chemotoxischen Stoffen der eingelagerten Abfälle und Versatzstoffe unter Berücksichtigung der Versatzmaterialien der Südflanke in der Schachtanlage Asse; Buchheim/ Meyer/Stolzenberg, 2006.

/COL 2005a/ Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht 4927/01 Rev. 03, Colenco Power Engineering AG, Juni 2005.

/COL 2006a/ Forschungsbergwerk Asse – Szenarienentwicklung, Bericht 4927/07, Colenco Power Engineering AG, November 2006.

/GSF 2002/ Bestimmung des nuklidspezifischen Aktivitätsinventars der Schachtanlage Asse, Abschlussbericht, GSF - FB Asse, Gerstmann, M., Meyer, H., Tholen, M., August 2002.

/GSF 2006a/ Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase. Bericht, Rev. 03; GSF FB Asse, Januar 2006.

/HMGU 2007/ Schließung der Schachtanlage Asse II – Sicherheitsbericht mit Prüfunterlagen und ausgewählten Arbeitsunterlagen. Antragsunterlagen für die Genehmigungsbehörden; eingereicht durch HMGU (damals GSF), Januar 2007.

/HMGU 2008/ Geotechnische Messungen an einer Pilotströmungsbarriere. Heydorn, M.; Teichmann, L; Meyer, T.; HMGU, Schachtanlage Asse. Vortrag auf der Konferenz „Messen in der Geotechnik 2008“; TU Braunschweig, 23.10.2008.

/IfG 2005/ Tragfähigkeitsbewertung des Carnallititbaufeldes der Schachtanlage Asse. Institut für Gebirgsmechanik (IfG) GmbH, Leipzig, Juli 2005.

/IfG 2009/ Gebirgsmechanische Zustandsanalyse und Prognose auf der Basis von Standortdaten sowie 3D-Modellrechnungen. Institut für Gebirgsmechanik (IfG) GmbH, Leipzig, März 2009.

/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.

/IST 2009a/ Ableitung von Vorsorgemaßnahmen der Schachtanlage Asse II. Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH. ISTec-A-1453. Garching, April 2009.

/IST 2009b/ Sicherheitsüberprüfung der Störfallvorsorge der Schachtanlage Asse II. Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH. ISTec-A-1237. Garching, April 2009.