

**HelmholtzZentrum münchen**

Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt

**Entwicklung und Beschreibung  
des Konzepts zur Schließung  
der Schachtanlage Asse**

Stand: 10.03.2008

Revisionsnummer: 06



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>2. Standortbedingungen</b> .....	<b>7</b>
2.1 Geologische Situation .....	7
2.2 Hydrogeologische Situation.....	10
2.3 Schachanlage Asse II.....	11
2.3.1 Auffahrungen des Grubengebäudes .....	11
2.3.2 Einlagerung von radioaktiven Abfällen.....	13
2.4 Gebirgsmechanische Situation.....	18
2.5 Lösungs- und Gaszutritte .....	20
2.6 Schlussfolgerungen.....	22
<b>3. Entwicklung des Systems ohne Schutzfluideinleitung</b> .....	<b>24</b>
3.1 Entwicklung in der Betriebsphase .....	24
3.2 Natürliches Volllaufen des Grubengebäudes in der Nachbetriebsphase .....	25
3.3 Schlussfolgerungen.....	25
<b>4. Rückholung</b> .....	<b>27</b>
<b>5. Sicherheitskonzept</b> .....	<b>28</b>
<b>6. Auswahl geeigneter Schließungsmaßnahmen</b> .....	<b>31</b>
6.1 Maßnahmen zur Stabilisierung des Tragsystems .....	31
6.1.1 Potenzielle Stabilisierungsmaßnahmen für die Betriebsphase .....	33
6.1.2 Auswahl der Stabilisierungsmaßnahmen.....	37
6.1.3 Generelle Anforderungen an die Stabilisierungsmaßnahmen .....	37
6.1.4 Grundsätzliche technische Machbarkeit der Schutzfluideinleitung .....	38
6.2 Maßnahmen zur Begrenzung der Schadstoffmobilisierung.....	39
6.2.1 Potenzielle Maßnahmen in den Einlagerungskammern.....	41
6.2.2 Auswahl der Maßnahmen in den Einlagerungskammern .....	45
6.2.3 Generelle Anforderungen an die Mg-Depots .....	45
6.2.4 Grundsätzliche technische Machbarkeit .....	46
6.3 Maßnahmen zur Begrenzung und Lenkung der Lösungsbewegung.....	46
6.3.1 Potenzielle Maßnahmen .....	47
6.3.2 Alternative technische Konzepte.....	51
6.3.3 Auswahl der Maßnahmen zur Begrenzung der Lösungsbewegung .....	52
6.3.4 Generelle Anforderungen.....	53
6.3.5 Maßnahmen in der MAW-Kammer .....	55
6.3.6 Technische Machbarkeit .....	56
6.4 Maßnahmen zur Begrenzung des Austritts von Lösungen und Schadstoffen in das Deckgebirge .....	57
6.4.1 Potenzielle Maßnahmen .....	57
6.4.2 Auswahl der Maßnahmen zur Begrenzung des Austritts von Lösung .....	58
6.4.3 Spezifische Anforderungen für die Resthohlraumverfüllungen .....	59
6.4.4 Spezifische Anforderungen für das Schutzfluid .....	60

6.5	Maßnahmen zum Vermeiden von neuen hydraulischen Wegsamkeiten .....	61
6.6	Maßnahmen zum Vermeiden von Fluidbewegungen über Tagesschächte .....	62
6.6.1	Potenzielle Maßnahmen .....	62
6.6.2	Technische Konzepte.....	63
6.6.3	Auswahl der Maßnahmen zum Vermeiden von Fluidbewegungen über Tagesschächte .....	63
6.6.4	Generelle Anforderungen.....	65
6.6.5	Grundsätzliche technische Machbarkeit .....	65
6.7	Einleitregime für das Schutzfluid.....	66
6.7.1	Technische Konzepte.....	66
6.7.2	Festlegung des Einleitregimes .....	67
<b>7.</b>	<b>Grundlegendes Konzept für die Schließung der SchachtanlageASSE</b>	
	<b>II .....</b>	<b>69</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
	<b>Anlagen .....</b>	<b>72</b>

## 1. Einleitung

In der Schachanlage Asse II wurden von 1909 bis 1964 Kali- und Steinsalze gewonnen. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen wurden von 1967 bis 1978 insgesamt 125 787 Gebinde mit schwach- und mittelradioaktiven Abfällen eingelagert. Nach der Einstellung der Einlagerung radioaktiver Abfälle wurden ausschließlich Forschungs- und Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die mit der Auflösung des Instituts für Tief Lagerung der GSF am 30. Juni 1995 beendet worden sind. Mit dem Schreiben vom 13.12.1995 teilte der Bundesminister für Forschung und Technologie der GSF mit, dass Vorbereitungen zur Schließung der Schachanlage Asse II zu treffen sind.

Die Schließung der Schachanlage erfolgt nach den Vorschriften des Bundesberggesetzes (BBergG). Gemäß § 53 BBergG ist für die Schließung ein Rahmenabschlussbetriebsplan einzureichen, der eine Darstellung der Durchführung der Schließungsmaßnahmen sowie Nachweise enthält, dass die in § 55 BBergG bezeichneten Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt werden. Dies sind

- der Schutz von Mensch und Umwelt vor der Schädigung durch ionisierende Strahlung radioaktiver Abfälle,
- die Vermeidung schädlicher Verunreinigungen oder sonstiger nachteiliger Veränderungen des Grundwassers und
- die Begrenzung von Senkungen an der Tagesoberfläche.

Die vorliegende Unterlage zum Schließungskonzept legt das iterative Vorgehen zur Entwicklung des Konzepts für die Schließung der Schachanlage Asse II dar. Dabei werden die in verschiedenen Iterationsschritten untersuchten alternativen Schließungsmaßnahmen, die bis ins Stadium einer Konzeptplanung betrachtet worden sind, bewertet. Das im Ergebnis der Entwicklung festgelegte Schließungskonzept für die Schachanlage Asse II bildet die Grundlage für den Langzeitsicherheitsnachweis.

Grundsätzlich ist hervorzuheben, dass es sich bei der Schachanlage Asse nicht um ein für den Zweck der Endlagerung radioaktiver Stoffe geplantes und angelegtes Bergwerk handelt. Es diente über einen Zeitraum von ca. 60 Jahren der Mineralgewinnung. Diesem Zweck entsprechend wurden die Baufelder angelegt und dimensioniert. In der sich anschließenden Zeit von ca. 35 Jahren, in der die Grube als Forschungseinrichtung genutzt wurde, waren insbesondere die Abbaue im Baufeld der Südflanke in unmittelbarer Nähe zum Deckgebirge noch unverfüllt. Nach Abschluss der Forschungsarbeiten wurden diese Abbaue in der Zeit von 1995 bis 2004 verfüllt. Die Arbeiten zur Vorbereitung der Schließung und zum Nachweis der Langzeitsicherheit wurden im Jahr 2000 aufgenommen.

Aus der Historie der Schachanlage Asse heraus haben sich Tatsachen am Standort ergeben, die bei der Entwicklung des Schließungskonzeptes zu berücksichtigen und zum Teil auch nicht mehr beeinflussbar sind. In diesem wesentlichen Punkt unterscheidet sich die Schachanlage Asse von anderen Standorten oder geplanten Endlagerbergwerken entscheidend.

Für die Schließung der Schachanlage Asse kommen drei grundlegende Konzepte in Frage:

1. Verschluss des Bergwerks ohne Einleitung eines Schutzfluids
2. Verschluss des Bergwerks mit Einleitung eines Schutzfluids
3. Rückholung der radioaktiven Abfälle

In dieser Unterlage wird dargelegt, dass lediglich mit der Einleitung eines Schutzfluids der sichere Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre gewährleistet werden kann.

In Kapitel 2 werden die Standortbedingungen, die das Sicherheits- und Schließungskonzept für die Schachanlage entscheidend beeinflussen, zusammenfassend erläutert. In Kapitel 3 werden die im Fall einer sogenannten trockenen Verwahrung zu erwartenden relevanten Aspekte der Prognose für das Gesamtsystem am Standort in der Betriebs- und Nachbetriebsphase dargelegt. Bei dieser Art der Verwahrung wird auf die Ausführung von Schließungsmaßnahmen mit Ausnahme der Schachtverschlüsse verzichtet und das Grubengebäude einer natürlichen Flutung überlassen. Die Konsequenzen einer solchen Entwicklung werden erläutert und zeigen, dass eine derartige Verwahrung nicht den Anforderungen genügt. Darauf aufbauend werden die zur Zielerreichung zugrunde zu legenden Anforderungen für das Sicherheits- und Schließungskonzept am Standort hergeleitet und begründet. Die Variante der Rückholung der radioaktiven Abfälle wird in Kapitel 4 diskutiert. Die entsprechenden Elemente des Sicherheitskonzepts sind in Kapitel 5 beschrieben. In Kapitel 6 werden die verschiedenen Schließungsmaßnahmen hinsichtlich der Sicherheit, der Funktionalität und ihrer technischen Machbarkeit verglichen und bewertet, die bevorzugten Maßnahmen begründet sowie generelle Anforderungen für diese Maßnahmen genannt. In Kapitel 7 wird das Gesamtkonzept für die Schließung der Schachanlage Asse II zusammengefasst.

## 2. Standortbedingungen

Die Standortbedingungen umfassen die geologische, gebirgsmechanische und hydrogeologische Situation im Grubengebäude der Schachanlage Asse II und im angrenzenden Deckgebirge sowie die Auswirkungen der bergbaulichen Aktivitäten vom Auffahren bis zum Verfüllen des Grubengebäudes. Einige dieser Bedingungen wirken sich in entscheidendem Ausmaß auf den Betrieb der Schachanlage bis zu deren Schließung (Betriebsphase) und auch auf die möglichen Entwicklungen nach der Schließung der Schachanlage (Nachbetriebsphase) aus.

In der Salzstruktur Asse wurden neben dem Bergwerk Asse II auch die Bergwerke Asse I und Asse III für die Gewinnung von Kali- und Steinsalz aufgefahren. Die Bergwerke Asse I und Asse III sind bereits Anfang des 20. Jahrhunderts abgesoffen bzw. aufgegeben worden. Die Mächtigkeit des Sicherheitspfeilers aus ungestörtem, hydraulisch dichtem Salzgestein beträgt zwischen Asse II und Asse I mindestens 470 m sowie zwischen Asse II und Asse III mindestens 2.800 m. Asse I und Asse III sind für die sichere Verwahrung der Schachanlage Asse II ohne Bedeutung, da sie sich weder gegenwärtig noch künftig auf relevante gebirgsmechanische und hydrogeologische Standortbedingungen auswirken.

Die Standortbedingungen, die das Sicherheits- und Schließungskonzept für die Schachanlage Asse II entscheidend prägen, werden nachfolgend erläutert.

### 2.1 Geologische Situation

Die geologische Situation bestimmt die geologische Barriere am Standort und bildet die Grundlage für die hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Bedingungen.

Die Salzstruktur Asse-Heeseberg ist eine durch salztektonische Prozesse entstandene, NW-SE-orientierte Hebungsstruktur im Subherzynen Becken nördlich des Harzes. Die Asse stellt den nordwestlichen Abschnitt der Struktur dar. Die Salzstruktur bildete sich durch Aufstieg von Zechsteinsalz. Hierbei drang Salzgestein zwischen die Schichten des Oberen und Mittleren Buntsandstein ein und richtete dadurch in der Südflanke die hangenden Schichten steil auf. In der Nordflanke wurde die Schichtenfolge des Deckgebirges weniger steil aufgerichtet (Abbildung 2.1). Bei der Bildung sind nur die salinaren Schichten der Staßfurt-, Leine- und Aller-Serie aufgerichtet worden. Die basalen, nichtchloridischen Schichten der Staßfurt-Serie und das liegende Zechstein sind nicht in den Salzsattel einbezogen.

Die Staßfurt-Serie setzt sich im Bereich der Schachanlage aus einer Folge von Steinsalz, polyhalitischem und kieseritischem Übergangssalz sowie carnallitischem Kalisalz zusammen. Die spröde reagierenden Schichten des Gebänderten Deckanhydrit, Grauen Salzton und Hauptanhydrit liegen nur als isolierte Brocken oder kleine Schollen vor; sie stellen keine hydraulischen Wegsamkeiten über größere Entfernungen dar. Die Leine-Serie besteht aus einer mächtigen Abfolge von Steinsalz; ein Kaliflöz ist hier nicht ausgebildet. Teilweise lösungsführende, bis zu 3 m mächtige Anhydritbänke wurden im Anhydritmittelsalz der Leine-Serie erbohrt. Das Anhydritmittelsalz keilt nach der Kulmination im Scheitel der Salzstruktur in der Südflanke mit zunehmender Teufe aus und hat unter Umständen Kontakt

mit dem Oberen Buntsandstein (Röt) oberhalb des Grubengebäudes (Abbildung 2.1). Westlich der SchachanlageASSE streicht das Anhydritmittelsalz am Salzspiegel aus und steht dort mit dem Hutgestein in Kontakt. Hydraulische Wegsamkeiten zwischen den beiden Kontakten über größere Entfernungen können nicht ausgeschlossen werden. Ein hydraulischer Kontakt mit dem Grubengebäude ist – mit Ausnahme der Tagesschächte – jedoch ausgeschlossen, da zwischen den Anhydritbänken und dem Grubengebäude das Leine-Steinsalz intakt ist.

Der Salzspiegel liegt ca. 300 m unter der Geländeoberfläche. Am Salzspiegel werden leicht lösliche Minerale gelöst (Subrosion), zurück bleiben unlösliche und schwer lösliche Bestandteile und Umwandlungsprodukte, wie beispielsweise Ton und Gips. Diese bilden das Hutgestein. Die Subrosion führt lokal zur Volumenreduktion des Gesteins und durch salztektonische Verformungen zu einer grabenartigen Struktur mit gegeneinander verkippten Schollen. Dieser Gebirgsbereich wird als verstütztes Deckgebirge bezeichnet. Über das verstützte Deckgebirge kann Grundwasser zum Salzspiegel vordringen.

Die Salzstruktur wird von mesozoischen Gesteinen (Deckgebirge) überlagert und flankiert. An der Nordflanke liegen gering durchlässige Schichten des Unteren und Mittleren Buntsandstein konkordant auf Zechstein. An der Südflanke liegt der Obere Buntsandstein (Röt) diskordant auf Zechstein. Die liegenden Schichten (Röt 1) bestehen aus Anhydrit, Steinsalz bzw. Mergel und können hydraulisch durchlässig sein. Die etwa 100 m mächtigen Schichten des Röt 2 bis 4 weisen dagegen Einschaltungen toniger Gesteine auf, die auf eine geringe Durchlässigkeit schließen lassen. Darauf folgen die Schichten des Muschelkalk, die mit Ausnahmen grundwasserleitend sind.

Durch die Position des Röt 1 in der Südflanke sind der Rötanhydrit (so1A) verkarstet sowie das Röt-salz (so1Na) und das Zechstein am Salzspiegel subrodiert. Beobachtungen in der Bohrung Remlingen 1 lassen vermuten, dass der Rötanhydrit bis etwa 50 m unterhalb des Salzspiegels – d. h. oberhalb des Grubengebäudes – verkarstet ist und dadurch eine erhöhte hydraulische Durchlässigkeit aufweisen kann. Damit besteht zwischen dem verkarsteten Bereich des Rötanhydrit und dem bergbaubedingt aufgelockerten Bereich des Röt an der Flanke des Grubengebäudes eine Zone, in der der Rötanhydrit weder verkarstet noch bergbaubedingt aufgelockert ist. Über diesen Gebirgsbereich kann Grundwasser an der Südflanke des Salzsattels vordringen.

Im Zuge der Strukturbildung waren im Deckgebirge Störungszonen entstanden. Diese sind durch nachfolgende tektonische Bewegungen mehrfach reaktiviert worden. Störungen können Kontakte zwischen hydraulischen Wegsamkeiten herstellen, aber auch unterbrechen. Über Störungen können grundwasserleitende Schichten im Muschelkalk mit der Flanke des Salzsattels hydraulisch verbunden werden (Abbildung 2.1).

Die gebirgsmechanischen Beanspruchungen infolge des Bergbaus haben Auswirkungen, denn sie führen – je nach Gesteinseigenschaften – zu Rissen und Klüften. Spröde reagierende Gesteine, wie Anhydrite oder Sandstein, können hierdurch durchlässiger werden. Das Röt 1 in der Südflanke, insbesondere der Rötanhydrit wurde bei der Strukturbildung tektonisch und zusätzlich bergbaubedingt gebirgsmechanisch überprägt und muss deshalb – besonders in der Flanke des Grubengebäudes – als hydraulisch durchlässig eingestuft

werden. Gesteine mit einem hohen Tonanteil und Salzgesteine reagieren hingegen plastisch. Das trifft auf die tonigen Schichten des Röt 2 bis 4 zu, die jedoch durch intensive Scherspannungen mechanisch beansprucht worden sind (siehe Kapitel 2.4). Auch über diesen Bereich können grundwasserleitende Schichten im Muschelkalk mit der Flanke des Salzsattels hydraulisch verbunden werden.

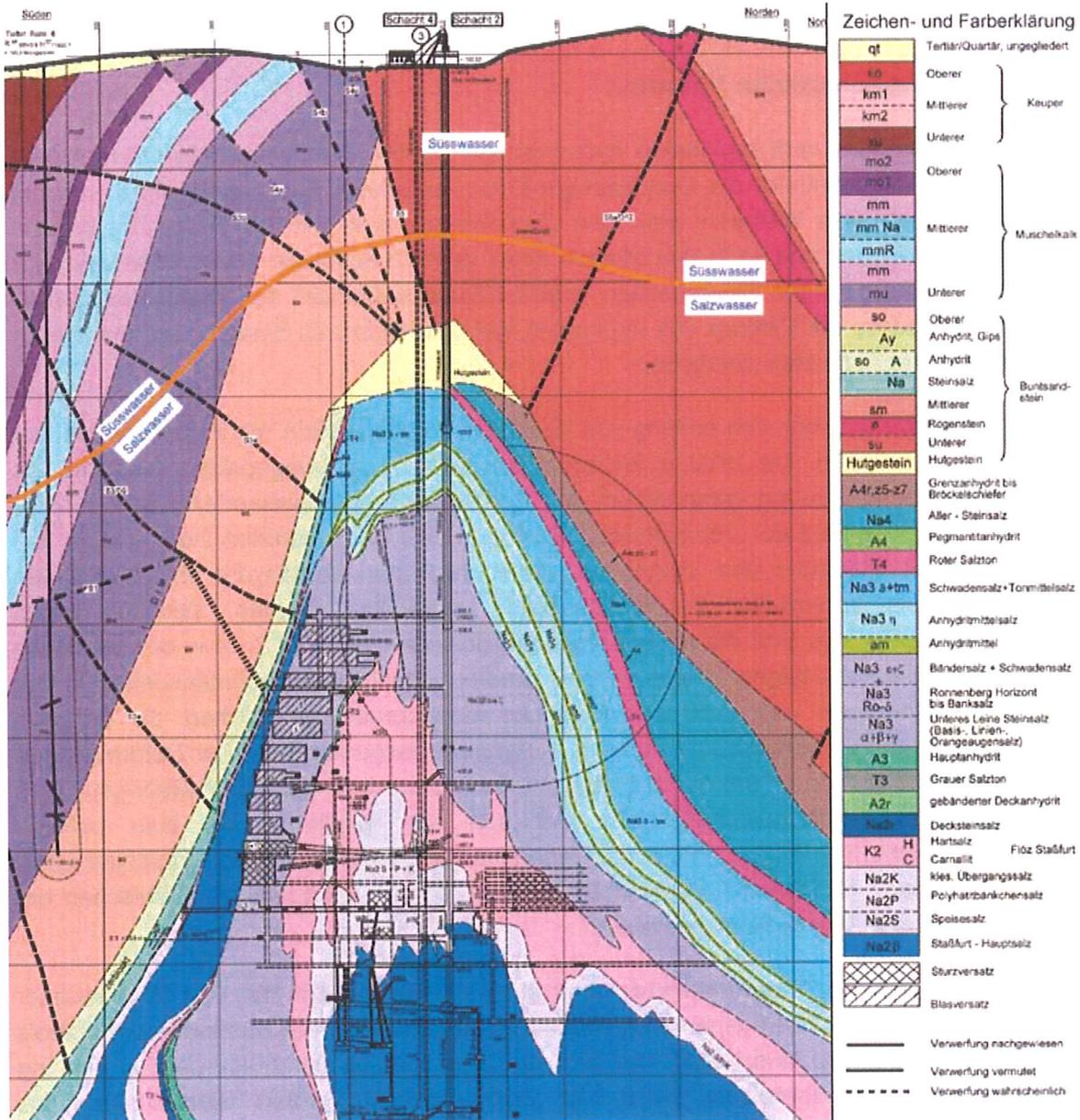


Abb. 2.1: Repräsentativer Schnitt durch den Asse-Salzsattel in querschlägiger Richtung mit geologischen Formationen und Störungszonen

Für das Sicherheits- und Schließungskonzept der Schachtanlage Asse II sind folgende geologische Gegebenheiten maßgebend:

- Das Wirtsgestein der Schachtanlage Asse II besteht sowohl aus Steinsalz als auch aus Kalisalz, die nichtchloridischen (durchlässigen) Schichten – wie z. B. der Hauptanhydrit – sind von untergeordneter Bedeutung.

- Das Leine-Steinsalz in der Nordflanke und im Scheitel bildet eine wirksame geologische Barriere, in der Südflanke ist die Wirksamkeit der Steinsalz-Barriere eingeschränkt.
- Die Barrierewirkung des Oberen Buntsandstein ist in der Südflanke durch salztektonische und gebirgsmechanische Beanspruchungen ebenfalls eingeschränkt.

## 2.2 Hydrogeologische Situation

Die Struktur Asse ist vom regionalen hydraulischen System durch tiefe Muldenstrukturen getrennt. Zum einen nimmt die Durchlässigkeit der regionalen Grundwasserleiter mit der Tiefe deutlich ab. Des Weiteren weist das Grundwasser eine mit der Tiefe zunehmende Salzmineralisation auf und ist in den Mulden somit deutlich schwerer als oberflächennahes Grundwasser mit geringer Mineralisation. Beide Effekte behindern den regionalen Grundwasserfluss, sodass der Einfluss des regionalen hydrogeologischen Systems auf die lokalen Bedingungen der Asse sehr gering ist.

Das Grundwasser bewegt sich entlang von diskreten Wegsamkeiten mit Eigenschaften von Kluffgrundwasserleitern. Die lokalen Bedingungen stellen eine ausgeprägte Wechselfolge von Grundwasserleitern und -geringleitern dar. Bedeutsame grundwasserleitende Horizonte im unmittelbaren Umfeld der Schachthanlage befinden sich im verstürzten Deckgebirge und im Muschelkalk. Aufgrund von Verkarstung kann auch der Rötanhydrit im Bereich des Salzspiegels als potenzieller Grundwasserleiter angesehen werden. Wichtige lokale Grundwassergeringleiter sind die tonig-mergeligen Schichten des Röt 2 - 4 in der Südflanke und die gering durchlässigen Schichten des Unteren und Mittleren Buntsandstein in der Nordflanke. Störungen und gebirgsmechanische Beanspruchung erhöhen die integrale Durchlässigkeit der Grundwassergeringleiter. Aufgrund gebirgsmechanischer Deformationen in der Südflanke ist von einem durch Scherspannung stark beanspruchten Gebirgsbereich auszugehen (Scherdeformationsbereich), der von der Salzflanke bis zum Unteren Muschelkalk reicht (Kapitel 2.4). In diesem Gebirgsbereich kann die integrale Durchlässigkeit – trotz der tonigen Schichten – deutlich erhöht sein, sodass Wegsamkeiten zwischen der Salzflanke und dem Muschelkalk bestehen.

Die Durchlässigkeit der Wegsamkeiten nimmt mit der Tiefe deutlich ab. Das Grundwasser weist mit zunehmender Tiefe einen steigenden Salzgehalt auf. In der Südflanke des Sattels gelangen Wässer in den Muschelkalk und bewegen sich vorwiegend strukturparallel. Entlang des Scherdeformationsbereiches oder von Störungszonen können Salzlösungen das geringleitende Röt 2 - 4 durchdringen und bis zur Salzflanke gelangen. Aus dem verstürzten Deckgebirge und Hutgestein fließt Grundwasser zu und gelangt bis zum Salzspiegel. Die Fließwege am Salzspiegel stehen im hydraulischen Kontakt mit dem Rötanhydrit, über den Salzlösung an der Südflanke des Salzsattels bis zum Scherdeformationsbereich vordringen kann.

Für das Sicherheits- und Schließungskonzept der Schachthanlage Asse II sind folgende hydrogeologische Gegebenheiten maßgebend:

- Das Grundwasser kann im Scheitel bis zum Salzspiegel und in der Südflanke bis zur Salzflanke vordringen.
- Der Salzgehalt des Grundwassers steigt mit der Tiefe an; im Tiefenbereich der Schachanlage Asse II steht NaCl-reiche Salzlösung an.
- Im Bereich der Schachanlage Asse II hat sich in tektonisch vor- und gebirgsmechanisch überprägten Gebirgsbereichen die Durchlässigkeit erhöht.

## 2.3 Schachanlage Asse II

### 2.3.1 Auffahrungen des Grubengebäudes

Die Schachanlage Asse II besteht aus den Tagesanlagen und dem Grubengebäude. Das Grubengebäude besteht aus drei großen Baufeldern und dem Tiefenaufschluss (Abbildung 2.2). Es erstreckt sich über 22 Sohlen von 474 m bis 996 m Teufe und wurde über zwei Tagesschächte erschlossen.

Das *Baufeld in der Südflanke* der Asse-Struktur wurde von 1916 bis 1964 im Leine-Steinsalz (Na3, Jüngerer Steinsalz) aufgefahren. Es umfasst Abbaue von der 750-m-Sohle bis zur 490-m-Sohle, die auf 13 Sohlen zumeist in neun Abbaureihen angeordnet sind. Das Baufeld erstreckt sich im Streichen über ca. 650 m. Der Südstoß des Baufeldes befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Deckgebirge. Insgesamt wurden etwa 3,4 Mio. m<sup>3</sup> Steinsalz abgebaut.

Von 1985 bis 2004 sind die Abbaue fast vollständig mit Salzgrus aus der Auffahrung des Tiefenaufschlusses (Eigenversatz) und von der Halde Ronnenberg (Fremdversatz) verfüllt worden. Auf der 532-m- und 490-m-Sohle befinden sich noch teilversetzte Abbaue, die als Infrastrukturräume genutzt werden. Für die Verfüllmaßnahme wurden nördlich der Abbaue im Firstniveau der Sohlen Abbaubegleitstrecken aufgefahren; in diesen Strecken steht bis zur 553-m-Sohle teilweise Carnallit an. Das anfallende Salzhaufwerk wurde in die Abbaue verstrzt. Die Abbaubegleitstrecken unterhalb der 595-m-Sohle sind weitgehend mit Salzgrus verfüllt, oberhalb von 595 m Teufe zumeist noch unverfüllt (alle Angaben zum Stand der Verfüllung: Ende 2007).

Das *Baufeld im Sattelkern* wurde von 1927 bis 1964 im Staßfurt-Steinsalz (Na2, Älteres Steinsalz) aufgefahren. Es umfasst Abbaue von der 775-m- bis zur 725-m-Sohle. Das Baufeld erstreckt sich im Streichen, d. h. in Ost-West-Richtung, über 350 m bis 550 m. Insgesamt wurden etwa 0,45 Mio. m<sup>3</sup> Steinsalz abgebaut. Das Baufeld ist bereits fast vollständig mit Eigenversatz verfüllt. Im östlichen Bereich auf der 775-m- und 750-m-Sohle gibt es noch teilversetzte Abbaue.

Das *Carnallitbaufeld* wurde in der Nordflanke der Salzstruktur von 1909 bis 1925 im Kalisalz der Staßfurt-Serie (K<sub>2</sub>C, Carnallit) aufgefahren. Das Baufeld erstreckt sich im Streichen entlang der Nordflanke über etwa 600 m und vertikal von etwa 750 m bis 710 m Teufe. Insgesamt wurden ca. 1,0 Mio. m<sup>3</sup> Kalisalz abgebaut. Bereits während der Salzgewinnung wurden die Hohlräume weitgehend mit Rückständen aus der Kaliaufbereitung (Altversatz)

verfüllt. Im Firstniveau sind die Abbaue in den 90er Jahren mit Eigenversatz nachverfüllt worden.

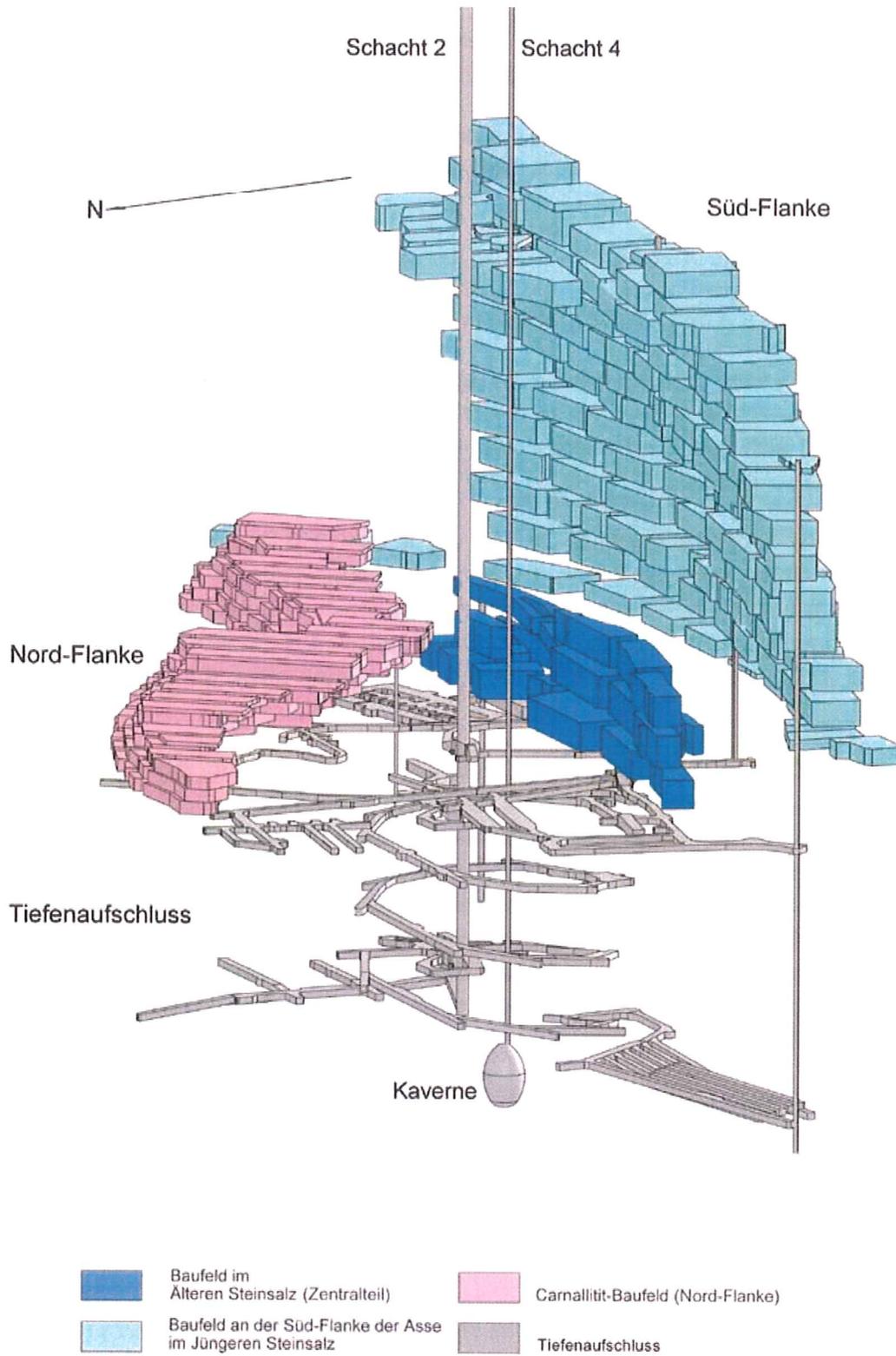


Abb. 2.2: Dreidimensionale Darstellung des Grubengebäudes der Schachanlage Asse II

Der *Tiefenaufschluss* umfasst die Auffahrungen vom Grubentiefsten in 996 m Teufe bis einschließlich der 800-m-Sohle, die von 1984 bis 1992 zu Forschungszwecken im Älteren Steinsalz erstellt wurden. Hier steht nur in geringem Umfang Carnallit an. Das Ausbruchvolumen beträgt ca. 240.000 m<sup>3</sup>. Gegenwärtig erfolgen die Verfüllung des Tiefenaufschlusses mit Salzgrus, Sorelbeton und Hartgesteinsschotter sowie die Auffüllung des Porenraums mit Schutzfluid. Diese Arbeiten sind durch einen Sonderbetriebsplan zugelassen.

Die Schachtanlage ist über die *Tagesschächte* Asse 2 und Asse 4 erschlossen worden. Schacht Asse 2 wurde zu Beginn der Gewinnungsphase abgeteuft und erreichte zunächst eine Teufe von 764 m. Im Jahr 1985 wurde er bis auf 950 m Teufe erweitert. In den 70er Jahren wurde der Schacht Asse 4 bis in 926 m Teufe abgeteuft. Die Tagesschächte stehen im Steinsalz und Carnallit und sind bisher nicht verfüllt. Unterhalb des Schachts Asse 4 wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten eine Kaverne bis in 996 m Teufe im Steinsalz aufgefahren. Die Kaverne ist mit Hartgesteinsschotter, Sorelbeton und Schutzfluid vollständig verfüllt.

Eine Wendelstrecke führt von der obersten bis zur tiefsten Sohle und ist oberhalb 900 m Teufe nicht verfüllt. Sie ist oberhalb von 750 m Teufe auf jeder Sohle an das Baufeld in der Südflanke angeschlossen. Vom Grubentiefsten bis in 532 m Teufe steht teilweise Carnallit an.

Die Infrastruktur der Schachtanlage umfasst neben den Abbauen und Tagesschächten eine Vielzahl von Strecken, Blindschächten, Rolllöchern, Gesenken und Bohrungen, welche im Steinsalz und Carnallit stehen und sowohl einzelne Abbaue als auch Baufelder verbinden (Abbildung 2.2). Strecken und Rolllöcher sind vor allem von der 800-m- bis zur 700-m-Sohle nur teilweise, Blindschächte und Gesenke zumeist nicht verfüllt.

### **2.3.2 Einlagerung von radioaktiven Abfällen**

Die Einlagerung der radioaktiven Abfälle erfolgte zwischen 1967 und 1978 im Rahmen der Forschungstätigkeit nach dem Stand von Wissenschaft und Technik. Die Gesamtaktivität der Abfälle betrug am 01.01.2005 noch  $2,9 \cdot 10^{15}$  Bq. Davon entfielen  $1,8 \cdot 10^{15}$  Bq auf die schwachradioaktiven Abfälle (LAW) und  $1,1 \cdot 10^{15}$  Bq auf die mittelradioaktiven Abfälle (MAW).

#### *Einlagerungsorte*

Die Abfälle sind in zehn Abbauen im Baufeld in der Südflanke auf der 750-m-Sohle und in einem Abbau auf der 511-m-Sohle sowie im Baufeld im Älteren Steinsalz in je einem Abbau auf der 750-m- und der 725-m-Sohle eingelagert worden. Die Einlagerungskammern liegen fast ausschließlich im Steinsalz. Auf der 750-m-Sohle befinden sich von West nach Ost die Einlagerungskammern 10/750, 8/750, 4/750, 5/750, 6/750, 7/750, 11/750, 12/750, 2/750 und 1/750 (Abbildung 2.3). Die Einlagerungskammern 2/750(Na<sub>2</sub>) und 7/725(Na<sub>2</sub>) liegen übereinander im westlichen Teil des Baufeldes im Älteren Steinsalz (Abbildung 2.3 und 2.4). In diesen Einlagerungskammern wurden LAW-Abfälle eingelagert.

Die Einlagerungskammer 8a/511 befindet sich im Steinsalz der Leine-Serie (Na3) auf der 511-m-Sohle nördlich der Abbaureihe 8 des Baufeldes in der Südflanke (Abbildung 2.5). Die Einlagerungskammer enthält vor allem MAW-Abfälle.

### *Einlagerungstechnik*

In den Einlagerungskammern auf der 750-m- und 725-m-Sohle wurden 124.486 Abfallgebände eingelagert. Ungefähr die Hälfte der Abfälle ist in zementierten bzw. betonierten Matrices eingebettet, die übrigen Abfälle sind nur teilweise in einer Matrix eingebunden. Die Gebände befinden sich in einem Transportbehälter aus Stahlblech. Etwa 12 % der Gebände sind zusätzlich mit einer äußeren Abschirmung aus Normal- oder Schwerbeton (verlorene Betonabschirmung, VBA) ummantelt. Die Abfallgebände wurden in die Einlagerungskammern gestapelt oder abgekippt bzw. verstürzt. Sie wurden teilweise mit Salzgrus abgedeckt, um die Direktstrahlung zu reduzieren. In die Einlagerungskammer auf der 511-m-Sohle wurden 1.293 MAW-Gebände und acht LAW-Gebände eingelagert. Diese Abfälle sind in Zement oder Bitumen eingebettet. Die Gebände befinden sich ebenfalls in Behältern aus Stahlblech. Sie wurden mittels Abseiltechnik in der Einlagerungskammer abgelegt.

Die meisten Einlagerungskammern sind nicht mehr zugänglich. Da sie zum Zeitpunkt der Einlagerung nicht nochmals vermessen und die Mengen des verstürzten Salzhaufwerks nicht dokumentiert worden sind, wurden die geometrischen und volumetrischen Daten systematisch geschätzt und sind somit mit Ungewissheiten behaftet. Aufgrund der abgelaufenen Konvergenzprozesse konnten die heutigen geometrischen Parameter nur über Analogieschlüsse kalkuliert werden und sind somit mit weiteren Ungewissheiten behaftet.

Die Einlagerungskammern sind sowohl untereinander als auch mit angrenzenden Abbauen durch horizontale und vertikale Auffahrungen im Sohlen- und Firstniveau sowie durch Auflockerungszonen in den Pfeilern und Schweben verbunden. Die Auffahrungen wurden entweder mit Salz verfüllt oder durch Dämme aus Salzbeton und/oder Bitumenemulsionen verschlossen. Die Verschlüsse bilden einen wirksamen Schutz vor Direktstrahlung, weisen jedoch nur eine eingeschränkte hydraulische Barrierewirkung auf.

Für das Sicherheits- und Schließungskonzept der SchachtanlageASSE II sind in Bezug auf das Grubengebäude folgende Gegebenheiten von besonderer Bedeutung:

- Das Bergwerk wurde für die Salzgewinnung und nicht gezielt für die Endlagerung radioaktiver Abfälle aufgefahren.
- Neben Steinsalz ist Carnallit großflächig aufgeschlossen.
- Die Einlagerungskammern sind mit benachbarten Grubenbauen über eine Vielzahl von Wegsamkeiten hydraulisch verbunden.
- Es liegen noch unverfüllte Hohlräume in einigen Einlagerungskammern, im Nahbereich der Einlagerungskammern und in wenigen Grubenbauen der großen Baufelder vor.

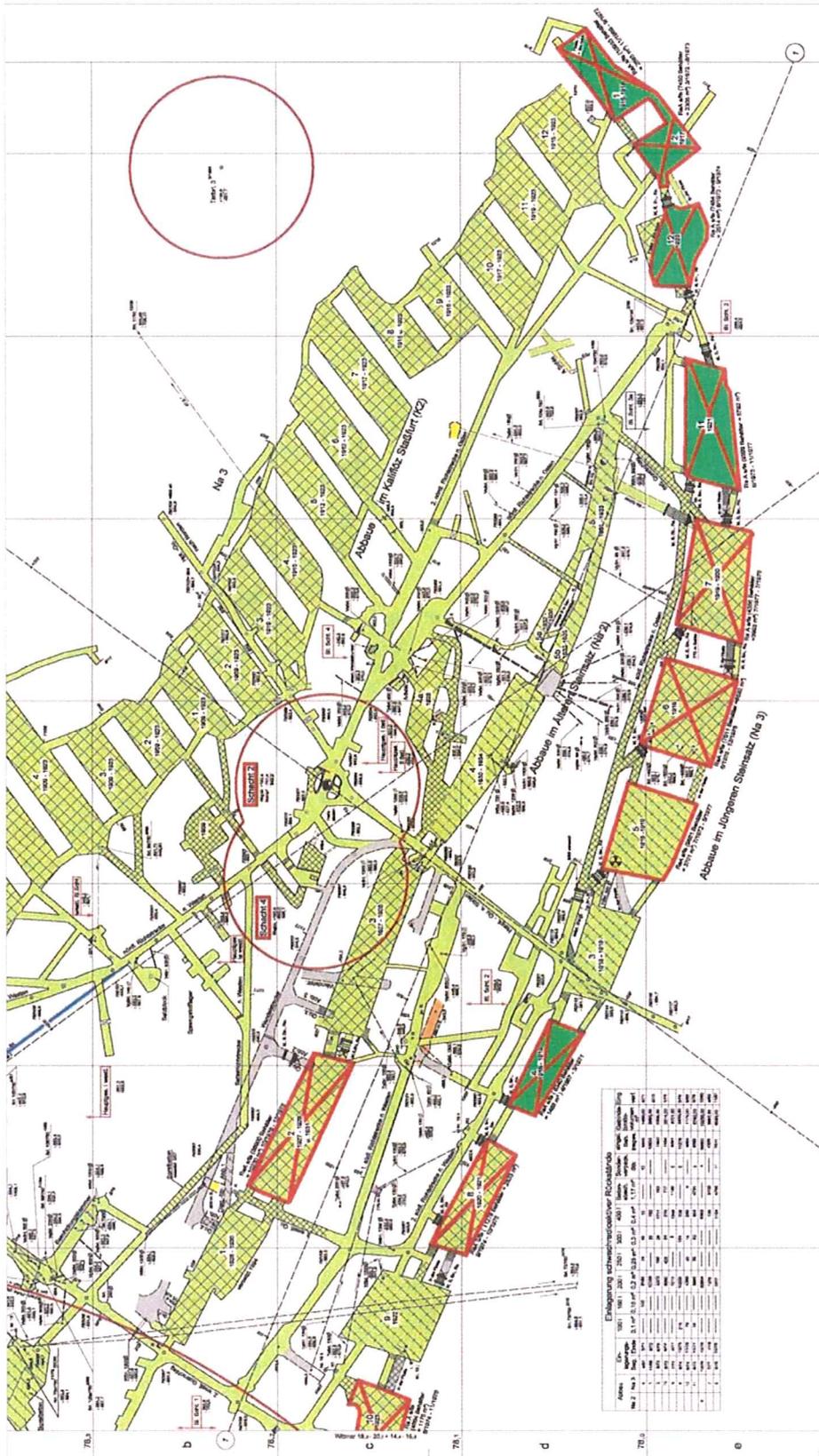


Abb. 2.3: Ausschnitt des Sohlenrisses der 750-m-Sohle – mit LAW-Einlagerungskammern (rot umrandet)



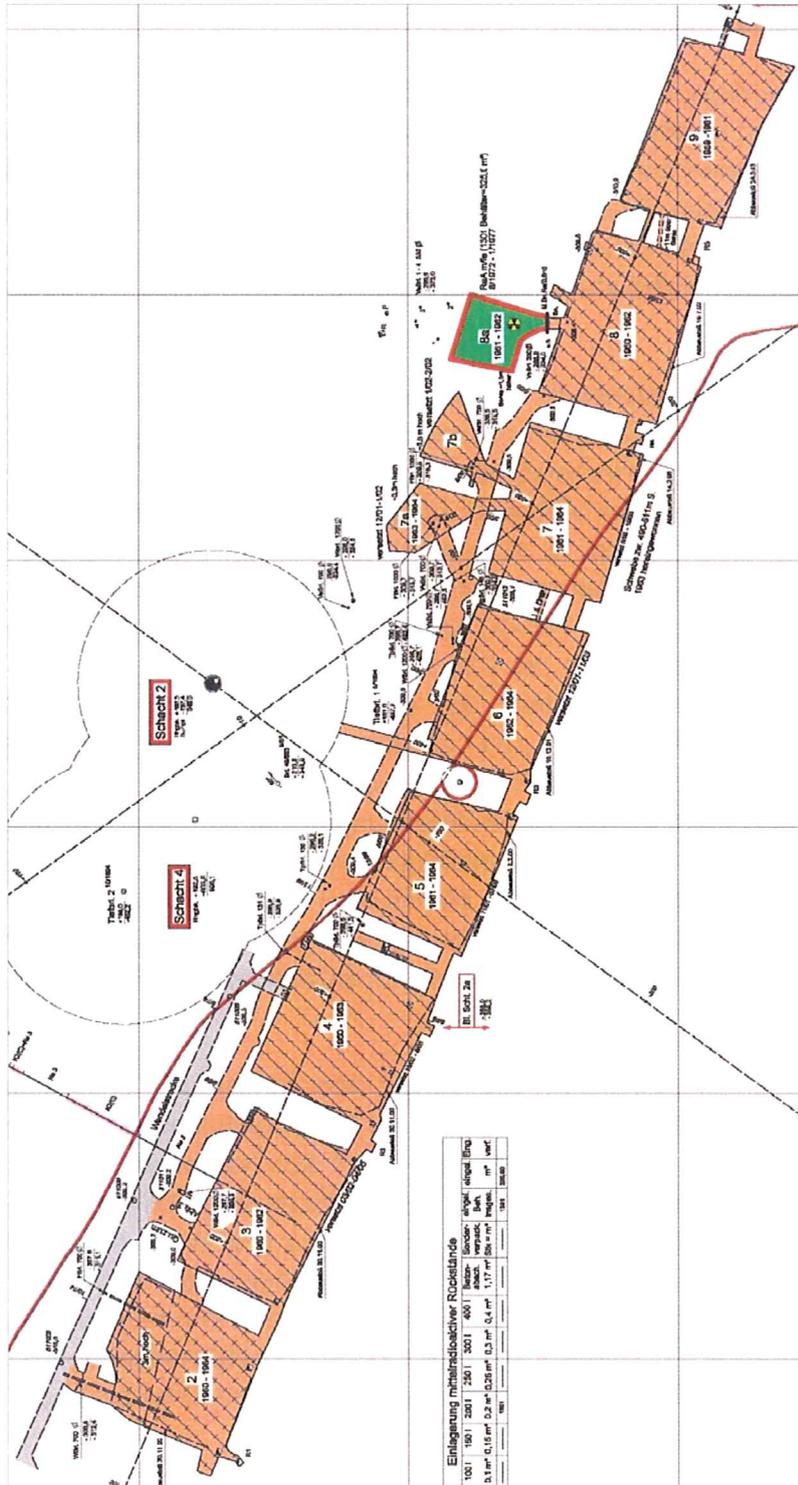


Abb. 2.5: Ausschnitt des Sohlenrisses der 511-m-Sohle – mit MAW-Einlagerungskammer (rot umrandet)

## 2.4 Gebirgsmechanische Situation

Die gebirgsmechanische Situation wird von den geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten sowie von den bergbaulichen Aktivitäten vom Auffahren bis zum Verfüllen des Grubengebäudes bestimmt.

Die Schachtanlage Asse II wurde im Salinar der Leine- und Staßfurt-Serie aufgefahren, in der Südflanke bis in unmittelbarer Nähe des Deckgebirges. Das Baufeld in der Südflanke bestimmt aufgrund seiner Lage, Größe, starken Durchbauung und langen offenen Standzeit die gebirgsmechanischen Reaktionen des Gesamttragsystems aus Grubengebäude und Deckgebirge. Die folgende Darstellung konzentriert sich daher auf dieses Baufeld und das Deckgebirge. Eine ausführlichere Analyse der gebirgsmechanischen Gegebenheiten enthält /IfG 2006a/.

In der Südflanke wurden insgesamt 131 Abbaue aufgefahren. Auf den 13 Sohlen sind zu meist neun Abbaue in streichender Richtung nebeneinander angeordnet. Ein Abbau ist durchschnittlich 60 m lang (streichend), 40 m breit (querschlägig) und 15 m hoch. Die Pfeiler und Schweben zwischen den Abbauen stellen die Tragelemente des Baufeldes dar. Zwischen den Abbauen stehen 12 m breite Pfeiler – mit Ausnahme des 20 m breiten Hauptpfeilers zwischen den Abbaureihen 4 und 5. Die Schweben oberhalb der 700-m-Sohle sind 6 m mächtig. Zwischen der 700-m- und 725-m-Sohle weisen die Schweben Mächtigkeiten von 8,5 m sowie zwischen der 725-m- und 750-m-Sohle von 14 m auf. Die Tragelemente sind nur begrenzt standfest. Ein solches Tragsystem reagiert nachgiebig mit Kriechverformungen, Entfestigung und lokalen Bruchprozessen auf den wirkenden Gebirgsdruck. Hiervon werden zunächst die Konturen der Pfeiler und Schweben erfasst, sodass die dort nicht mehr aufnehmbaren Spannungen von den noch triaxial eingespannten Pfeiler- und Schwebenkernen (Existenz allseitiger Druckeinspannung) übernommen werden. Wenn durch Entfestigung und Dilatanz (Auflockerung) auch Kernzonen der Pfeiler und Schweben an Tragfähigkeit verlieren, erfolgt eine weitere Lastumverteilung auf benachbarte noch tragfähige Pfeiler und Schweben sowie schließlich auf die Baufeldränder und das Deckgebirge.

Das Deckgebirge an der Südflanke des Sattels wird zunehmend in die Lastumverteilung einbezogen. Sowohl die Messungen als auch die Modellrechnungen für die Betriebsphase zeigen übereinstimmend, dass vor allem im Bereich des horizontalen querschlägigen Verschiebungsmaximums in der Südflanke die meisten Schweben vollständig durchgebrochen sind. Hier existieren noch äußere Schwebenringe. Die Pfeiler im oberen Baufeld in der Südflanke (oberhalb von 700 m Teufe) sind durch Auflockerungen von Rissen durchzogen. Dagegen haben im unteren Baufeld in der Südflanke (unterhalb von 700 m Teufe) die Pfeiler und Schweben teilweise die Tragfähigkeitsgrenze noch nicht überschritten. Insbesondere die Schweben weisen aber aufgrund der auch hier ablaufenden Schädigungen eine merklich erhöhte Durchlässigkeit auf.

Die ablaufende Entfestigung der Tragelemente im Baufeld an der Südflanke erforderte eine vollständige Verfüllung aller Abbaue. Anfang des Jahres 2004 waren fast alle Abbaue – bis auf wenige Ausnahmen zur Aufnahme der zur Schließung notwendigen Infrastruktur – mit Salzgrus verfüllt. Die In-situ-Messungen zeigen, dass sich bis zur Gegenwart zwar noch

keine signifikanten Versatzdrücke aufgebaut haben, jedoch eine Verdämmung der Pfeilerkonturen stattfindet, die der weiteren Pfeilerentfestigung entgegenwirkt. Diese Wirkung wird durch die degressive Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten und die seit Anfang der Verfüllung 1995 leicht abnehmende mikroseismische Aktivität im Grubengebäude nachgewiesen.

Die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellrechnungen weisen darauf hin, dass sich mit dem Lastabtrag auf das südlich angrenzende Deckgebirge und der Verringerung der minimalen Druckeinspannung Trennflächen im Deckgebirge öffneten und es dadurch zum Aufbau von Lösungsdrücken in Abhängigkeit vom hydraulisch wirksamen Durchtrennungsgrad kam. Durch die im Deckgebirge anstehenden Lösungsdrücke hat sich in Abhängigkeit von dem zunehmenden hydraulisch wirksamen Durchtrennungsgrad die Mobilität des Deckgebirges erhöht. Die Komplexität dieser über Jahrzehnte andauernden Spannungsumlagerungen konnte mit umfangreichen In-situ-Messungen nachgewiesen sowie mit spezifischen Stoffgesetzen und Modellen nachgebildet werden. Laborversuche am Leine-Steinsalz belegen, dass auch bei den geringen minimalen Druckeinspannungen der Tragelemente der Südflanke nach der Überschreitung der maximalen Festigkeit keine vollständige Entfestigung eintritt, sondern sich Restfestigkeitsplateaus ausbilden /IfG 2006a/.

Die Modellrechnungen zeigen weiterhin, dass sich die Festigkeitsüberschreitungen im südlich angrenzenden Deckgebirge auf einen so genannten Scherdeformationsbereich zwischen 500 m und 574 m Teufe konzentrieren. Die Lokation des Scherdeformationsbereiches stimmt mit Resultaten der mikroseismischen Ortungen überein. In diesem Gebirgsbereich befindet sich auch die Übertrittsstelle von Salzlösung aus dem Deckgebirge in das Grubengebäude (Kapitel 2.5).

Das das Baufeld in der Südflanke umgebende Leine-Steinsalz ist stark beansprucht und aufgelockert. Es ist von einer durchgehenden Auflockerungszone auszugehen.

Für das Sicherheits- und Schließungskonzept der Schachtanlage Asse II sind folgende gebirgsmechanische Gegebenheiten maßgebend:

- Das Tragsystem befindet sich in einem Grenzzustand der dilatanten Entfestigung mit Überzugswirkungen auf das unmittelbare Deckgebirge.
- Das Resttragniveau der Pfeiler wird durch die Stützwirkung der Schwebenringe und des Versatzes erhalten. Die weiter anhaltende Beanspruchung durch das Deckgebirge und die daraus resultierenden Zunahmen der Verformungen der Pfeiler und Schweben führen jedoch zu weiterer Schädigung.
- Das Leine-Steinsalz im oberen Bereich der Südflanke und das südlich angrenzende Deckgebirge (Röt) sind durch Scherdeformationen stark beansprucht.
- Das Baufeld in der Südflanke ist von einer durchgehenden Auflockerungszone flankiert, die eine erhöhte Durchlässigkeit aufweist.

## 2.5 Lösungs- und Gaszutritte

Seit Abteufen des Schachtes Asse 2 wurden Zutritte von Salzlösungen unterschiedlicher Menge und Herkunft beobachtet. Das Versiegen und die chemischen Zusammensetzungen der Lösungszutritte vor 1988 lassen darauf schließen, dass diese aus isolierten Reservoiren in der Salzformation stammten oder früher versickerte Betriebslösungen waren. Aus diesen Gründen sind die Salzlösungs- und Gaszutritte vor 1988 für die Betriebssicherheit und die Entwicklungen in der Nachbetriebsphase nicht von Bedeutung.

Dagegen ist der gegenwärtige Salzlösungszutritt mit einer aufgefangenen Menge von rund  $12 \text{ m}^3$  pro Tag ins Baufeld in der Südflanke von Bedeutung. Bezüglich der Herkunft dieser Lösungen wird aus vorliegenden umfangreichen Untersuchungen abgeleitet, dass sie aus dem Oberen Buntsandstein stammen und mit grundwasserführenden Schichten in Verbindung stehen. Die zeitliche Entwicklung der Zutrittsrate im Baufeld in der Südflanke zeigt einen Anstieg, als dessen Ursache eine fortschreitende gebirgsmechanische Deformation im Bereich der Zutrittspfade angesehen wird. Dies verursachte zunehmend neue hydraulische Kontakte mit lösungsführenden Wegsamkeiten. Seit 1998 ist die chemische Zusammensetzung der aufgefangenen Lösungen weitgehend konstant. Diese Lösungen sind an NaCl und  $\text{CaSO}_4$  gesättigt, jedoch an  $\text{MgCl}_2$  und  $\text{MgSO}_4$  untersättigt. Im Kontakt mit Carnallit würden Kalisalze, wie beispielsweise Carnallit und Kieserit, aus diesem herausgelöst werden.

Der Lösungsübertritt aus dem Deckgebirge in die Grube erfolgt über eine Zone, in der das anstehende Steinsalz durch die bergbaubedingte gebirgsmechanische Beanspruchung seine Funktion als Schutzschicht verloren hat (desintegrierte Steinsalzbarriere). Diese erstreckt sich von 500 m bis 574 m Teufe. Nach dem Übertritt dringt die Salzlösung unter dem Einfluss der Gravitation durch aufgelockerte Gebirgsbereiche nahe der Kontur der Abbaue (Abbildung 2.6, gelb markiert) oder durch verfüllte Abbaue zu den Auffangstellen. Die Lösung wird im Abbau 3 der 658-m-Sohle, in einer Strecke entlang des nördlichen Stoßes der Abbaue 1 bis 4 der 725-m-Sohle und im nordwestlichen bzw. nordöstlichen Zugang von Abbau 9 auf der 750-m-Sohle aufgefangen.

Die Synthese der Ergebnisse aus den Untersuchungen führt zu einem konzeptuellen Modell für Herkunft und Fließpfade der zutretenden Lösung (Abbildung 2.6). Für das Sicherheits- und Schließungskonzept der Schachanlage Asse II sind im Zusammenhang mit dem Salzlösungszutritt folgende Gegebenheiten maßgebend:

- Ein wahrscheinlicher Zuflusspfad im Deckgebirge kann aus dem Unteren Muschelkalk über den Scherdeformationsbereich und Störungszonen durch den Oberen Buntsandstein und weiter zur Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere verlaufen.
- Weiterhin kann auch Salzlösung aus dem verstürzten Deckgebirge über den Oberen Buntsandstein dem Scherdeformationsbereich zufließen.
- Der Zutritt der Salzlösung zum Grubengebäude erfolgt durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere zwischen 500 m und 574 m Teufe.



## 2.6 Schlussfolgerungen

Die entscheidenden Standortbedingungen für das Sicherheits- und Schließungskonzept der Schachanlage Asse II sind

- die gebirgsmechanische Beanspruchung und Entfestigung des Salzgesteins und des in der Südflanke angrenzenden Deckgebirges, resultierend in einer nur noch geringen Resttragfähigkeit des gesamten Tragsystems,
- der kontinuierliche Zutritt einer an  $\text{MgCl}_2$  und  $\text{MgSO}_4$  untersättigten Salzlösung aus dem Deckgebirge durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere sowie
- der großflächige Aufschluss von Carnallit und die weitreichenden Auflockerungszonen im gesamten Grubengebäude.

Diese Standortbedingungen prägen im Zusammenhang die Entwicklungen in der Betriebs- und Nachbetriebsphase und bestimmen deren Prognosesicherheit. Dies wird nachfolgend erläutert.

Die konkreten Fließwege der Salzlösung im Zutrittsbereich sind nicht bekannt und können auch nicht ermittelt werden. Aufgrund der Erkenntnisse zu den hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Bedingungen ist eine gesicherte Prognose des Lösungszutritts aus dem Deckgebirge weder im Hinblick auf die Zuflussrate noch auf die NaCl-Lösungssättigung möglich. Eine grundlegende Verbesserung des Kenntnisstandes ist nicht zu erwarten. Da die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere und die durchgehende Auflockerungszone des Baufeldes in der Südflanke bis zu den Einlagerungskammern reicht, wird in der Nachbetriebsphase die zutretende Salzlösung in jedem Fall mit den Abfällen in Kontakt gelangen. Eine dauerhafte und vollständige Abdichtung der Zuflusspfade im Deckgebirge durch Injektionen oder andere technische Maßnahmen ist nicht möglich, da die minimale Gebirgsspannung im Scherdeformationsbereich und die anhaltenden Scherbeanspruchungen keine dauerhafte Druckeinspannung der injizierten Gebirgsbereiche gewährleisten. Das Gebirge würde wieder aufreißen. Der Zutrittsbereich im Salzgestein kann ebenfalls nicht dauerhaft abgedichtet werden. Einerseits ist das Leine-Steinsalz hier nur geringmächtig und in diesem stark beanspruchten Bereich nur durch geringe Druckeinspannung gekennzeichnet. Andererseits weist der Versatz in den Abbauen noch keine relevante Stützwirkung auf. Damit fehlt das für eine dauerhafte Abdichtung notwendige Widerlager. Erfahrungen aus dem Salzbergbau zeigen, dass Abdichtmaßnahmen von Lösungszutritten selbst unter günstigen Bedingungen die Zutrittsraten nur für wenige Jahre reduzieren /Sch 1999/. Damit scheidet die Möglichkeit einer langfristig wirksamen Abdichtung des Lösungszutritts in der Südflanke aus.

Darüber hinaus ist es auch nicht möglich, die Abfallgebinde in den Einlagerungskammern durch technische Maßnahmen vollständig zu umschließen und somit vor dem Kontakt mit Lösung dauerhaft zu schützen. Über die Auflockerungszonen in den Konturbereichen der Einlagerungskammern würde die Lösung in jedem Fall in die Einlagerungskammern vordringen und mit den Gebinden in Kontakt gelangen. Unter den Standortbedingungen ist somit

- **ein vollständiger trockener Einschluss der Abfälle nicht möglich.**

Das bedeutet, dass selbst bei Schließung der Schachtanlage ohne Einleitung eines Schutzfluids ein Kontakt der Abfallgebinde mit Salzlösungen unvermeidlich ist. Die chemische Zusammensetzung der Lösungen in den Einlagerungskammern ist beispielsweise durch die dabei auftretenden Umlösungsprozesse nicht sicher zu prognostizieren.

In der Schachtanlage ist Carnallit großflächig und über fast die gesamte Teufenerstreckung aufgeschlossen. Durch die aufgelockerten Gebirgsbereiche in der Kontur der Grubenbaue müssen insbesondere im Carnallitbaufeld, in den Abbaubegleitstrecken des Baufeldes in der Südflanke und in der Wendelstrecke technische Maßnahmen gefunden werden, die einen langfristig wirksamen Schutz gegen eine Zersetzung des Carnallits sicher stellen. Gesteinszersetzungen würden – zusätzlich zur Minderung der Stützwirkung der durchfeuchteten Schwebenringe und des Versatzes – erhöhte Verformungen der Tragelemente hervorrufen. Die Auswirkungen auf das Deckgebirge sind nicht vorauszusagen und die Bildung von neuen lösungsführenden Wegsamkeiten nicht auszuschließen. Infolge dessen könnte die Zutrittsrate ansteigen und zunehmend auch die NaCl-Sättigung der zutretenden Lösungen abnehmen. Da zudem weder die Intensität noch die bevorzugten Orte der Umlösungsprozesse sicher vorausgesagt werden können, sind bei einer trockenen Verwahrung keine gesicherten Prognosen für künftige Entwicklungen möglich. Unter den Standortbedingungen ist bei einer trockenen Verwahrung

- **ein Verlust der Resttragfähigkeit des Tragsystems sowie**
- **ein weiterer Integritätsverlust der Steinsalz-Barriere nicht auszuschließen und**
- **eine gesicherte Prognose des Systemverhaltens - insbesondere des Schadstofftransports - für die Nachbetriebsphase nicht möglich.**

Maßnahmen zur Ertüchtigung des Salzversatzes werden kurzfristig keine hinreichende Erhöhung der Stützwirkung des Tragsystems in den wesentlichen Grubenbereichen bewirken, sodass weder die Verformungen der Tragelemente noch die Deckgebirgsverschiebungen deutlich eingeschränkt werden /IfG 2006a/. Der Lösungszutritt aus dem Deckgebirge wird andauern. Gesteinszersetzungen am Carnallit sind die Folge mit den bereits oben genannten Konsequenzen.

Aus den Schlussfolgerungen ergeben sich zwei grundlegende Anforderungen an das Sicherheits- und Schließungskonzept, die Voraussetzungen für gesicherte Langzeitprognosen darstellen:

- 1. hinreichende Stützung des Tragsystems,**
- 2. Schutz des Carnallits vor Lösungen aus dem Deckgebirge.**

Um die grundlegenden Anforderungen zu erfüllen, sind technische Maßnahmen erforderlich. Die Auswirkungen der möglichen technischen Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln diskutiert.

### **3. Entwicklung des Systems ohne Schutzfluideinleitung**

In diesem Kapitel wird die Schließung der Schachanlage Asse II ohne Schutzfluideinleitung angenommen, wobei nur die Tagesschächte dicht verschlossen und die offenen Grubenbaue vollständig mit Versatz verfüllt sind. Auf weitere Maßnahmen wird verzichtet. Unter solchen Bedingungen würden sich zunächst die Verformungen im Grubengebäude und Deckgebirge mit abnehmender Rate fortsetzen (Kapitel 3.1) und weiter Lösung aus dem Deckgebirge über die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere zutreten. Im Gegensatz zur gegenwärtigen Situation und zur künftigen Betriebsphase würden in der Nachbetriebsphase die zutretenden Lösungen nicht aufgefangen und abgeführt werden, sondern im Grubengebäude verbleiben, welches sukzessive volllaufen würde (Kapitel 3.2).

#### **3.1 Entwicklung in der Betriebsphase**

Die gegenwärtige gebirgsmechanische Situation wurde bereits in Kapitel 2.4 erläutert. Da mit den fortschreitenden Verformungen und Deckgebirgsverschiebungen die Schädigungen in Pfeilern und Schwebenringen in der Betriebsphase zunehmen werden, ist ein Verlust der Stützwirkung durch den vollständigen Bruch der Schwebenringe nicht auszuschließen. Der Grund ist die Entfestigung und Rissbildung im bisher stützenden Bereich der äußeren Schwebenringe, die sukzessive den gesamten Pfeilerquerschnitt erfassen. Das zeigt die hohe Sensitivität des Tragsystems bzw. dessen Resttragfähigkeit, die entscheidend von der Stützwirkung der Schwebenringe und der Dämmwirkung des Salzversatzes abhängt. Mittels In-situ-Messwerten der Spannungen ist an einigen Pfeilern bereits ein verringerter Tragwiderstand festzustellen. Modellrechnungen zeigen, dass ein vollständiger Bruch der Schwebenringe eine Verringerung des Tragwiderstandes auf etwa ein Drittel in wenigen Jahren bewirken kann /IfG 2007/.

Solange sich keine relevanten Versatzdrücke aufbauen, werden sich mit den fortlaufenden Deckgebirgsverschiebungen die Brüche in den Schwebenringen und Pfeilern fortsetzen. Bei brechenden Schwebenringen wird die bereits geringe Resttragfähigkeit der Pfeiler bzw. des gesamten Tragsystems nochmals abnehmen und aufgrund dessen die Überzugswirkung auf das Deckgebirge zunehmen. Bei nachlassender Tragfähigkeit ist von unmittelbaren Verschiebungsaktivierungen und eventuell begleitet von bruchhaften Verformungen auszugehen. Damit erhöht sich die Gefahr einer ansteigenden Zutrittsrate, evtl. in Verbindung mit einer sich verringernden NaCl-Lösungssättigung. Aus diesem Grund ist

##### **➤ eine schnellstmögliche Stützung des Tragsystems**

eine unabdingbare Voraussetzung für die Prognosesicherheit künftiger Entwicklungen in der Betriebs- und Nachbetriebsphase.

Modellrechnungen zeigen, dass bei nicht zunehmenden Versatzdrücken im oberen Baufeld in der Südflanke nach dem Jahr 2014 verstärkt die oben beschriebenen Entfestigungen und Bruchprozesse in Schwebenringen und Pfeilern einsetzen können, wodurch ein zunehmender Tragfähigkeitsverlust entsteht /IfG 2006a/. Dies würde eine Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungen nach sich ziehen. Einerseits belegt dieses Modellergebnis den

begrenzten Zeitraum der Betriebsphase, andererseits die sich mit der Zeit verringernde Prognosesicherheit des komplexen gebirgsmechanischen Systemverhaltens bei einer trockenen Verwahrung. Das bedeutet, dass zum genannten Zeitpunkt eine hinreichende Stützung des Tragsystems zu gewährleisten ist, damit die Prognosesicherheit für den Erhalt der Resttragfähigkeit nicht eingeschränkt wird.

### **3.2 Natürliches Volllaufen des Grubengebäudes in der Nachbetriebsphase**

Mit dem unvermeidbaren Volllaufen des Grubengebäudes dringt Lösung in den Porenraum des Versatzes und in aufgelockerte Bereiche von Pfeiler und Schweben ein. Im Zuge der Durchfeuchtung von aufgelockerten Konturbereichen werden sich die Deformationen erhöhen. Außerdem wird die Tragfähigkeit bereits entfestigter Tragelemente weiter abnehmen, da die Salzlösung die Reibung auf den vorhandenen Bruchflächen und bei einem hydraulischen Druckaufbau die auf die Bruchfläche wirkende Normalspannung vermindert. Aus den gleichen Gründen werden sich zusätzlich die Versatzfestigkeit und damit dessen Dämmwirkung verringern. Laboruntersuchungen und Modellrechnungen belegen die beschleunigten Deformationen und die damit einhergehende verstärkte Beanspruchung des Deckgebirges.

Im Kontakt mit Carnallit bewirkt die zutretende Salzlösung erhebliche Umlösungs- und Zersetzungsprozesse. Durch Umlösung entstehen  $MgCl_2$ -reiche Salzlösungen mit höherer Dichte und neuer „Porenraum“ im zersetzten Gestein. Die Zersetzung von anstehendem Carnallit würde vor allem im Carnallitbaufeld aber auch am Nordstoß des Baufeldes in der Südflanke erfolgen und dadurch Tragelemente weiter entfestigen. Die Auswirkungen auf das Deckgebirge sind nicht sicher zu prognostizieren. Durch bruchhafte Verformungen können aber neue hydraulische Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und Deckgebirge sowie im Deckgebirge entstehen. Wenn dadurch die Rate des Lösungszutritts ansteigt und/oder dessen NaCl-Sättigung abnimmt, sind die Auswirkungen auf das Tragsystem von gravierender Bedeutung und die Prognosesicherheit eingeschränkt.

Durch das natürliche Volllaufen und die resultierende Umlösung und Zersetzung von Salzgestein würde sich das Grubengebäude in einer Weise entwickeln, die keine gesicherte Prognose ermöglicht. Daraus folgt, dass durch eine trockene Verwahrung keine Sicherheit garantiert werden kann.

- **Zusätzliche Maßnahmen für eine langfristig sichere Schließung der Schachtanlage sind notwendig.**

### **3.3 Schlussfolgerungen**

Die grundlegenden Anforderungen an das Sicherheits- und Schließungskonzept für die Schachtanlage, wie die schnellstmögliche und hinreichende Stützung des Tragsystems, der Schutz des Carnallits vor Lösungen aus dem Deckgebirge und gesicherte Randbedingungen für Langzeitprognosen (vgl. Kapitel 2.6), werden bei einer trockenen Verwahrung nicht erfüllt.

Eine nachhaltige Stabilisierung des Tragsystems und ein wirksamer Schutz der aufgeschlossenen Carnallitbereiche vor dem Kontakt mit Lösung aus dem Deckgebirge können durch

➤ **das Einleiten einer Salzlösung**

erreicht werden, die mit den anstehenden Salzgesteinen und dem Versatz nahezu im chemischen Gleichgewicht steht (vgl. Kapitel 6.1.3). Das trifft nur auf eine an  $MgCl_2$  und  $MgSO_4$  gesättigte Salzlösung am Punkt R des quinären Systems der ozeanischen Salze zu. Da eine solche Salzlösung die im Bereich des Grubengebäudes der Schachtanlage Asse anstehenden Salzgesteine vor Zersetzung durch Lösungen aus dem Deckgebirge schützt, wird sie im Folgenden Schutzfluid genannt.

Die stabilisierende Wirkung des hydrostatischen Drucks (Fluiddruck) im Grubengebäude behindert die voranschreitende Entfestigung im Tragsystem und Deckgebirge. Die Stützwirkung des Fluiddrucks bewirkt einen degressiven Verlauf der Verformungsraten. Der Fluiddruck nimmt schrittweise mit ansteigendem Schutzfluidpegel zu und erreicht den vollen hydrostatischen Stützdruck für das Tragsystem mit vollständiger Auffüllung des Grubengebäudes und mit hydraulischer Ankopplung an das Deckgebirge. Um einen Anstieg der Deckgebirgsverschiebungsraten während der Einleitung des Schutzfluids im oberen Baufeld in der Südflanke zu verhindern, ist eine zusätzliche Stabilisierung des Tragsystems notwendig. Die dafür in Frage kommenden Maßnahmen werden in Kapitel 6.1 diskutiert und bewertet.

Alle Maßnahmen und Betriebsabläufe, die eine schnelle und langfristig sichere Schließung der Schachtanlage verzögern, schränken die Prognosesicherheit für die Nachbetriebsphase ein und gefährden die radiologische Sicherheit. Grund hierfür ist die mit der Zeit zunehmende Gefährdung durch einen deutlichen Anstieg der Zutrittsrate aus dem Deckgebirge.

## 4. Rückholung

Eine mögliche Rückholung der radioaktiven Abfälle – auch eine Teilrückholung – wurde ausführlich bei /FIC 2006/ untersucht.

Die Gesamtdauer für eine Rückholung aller Abfälle wurde mit etwa 30 bis 40 Jahren eingeschätzt. Neben den hohen bergmännischen, arbeits- und strahlenschutztechnischen Risiken gibt es somit ein nur sehr schwer kalkulierbares Risiko bezüglich der Entwicklung des Salzlösungszutritts. Selbst wenn für den genannten Zeitraum technische Möglichkeiten gefunden werden sollten, die nur begrenzte Resttragfähigkeit des Tragsystems zu erhalten, besteht während der gesamten Dauer der Rückholung ein ständiges Risiko, dass die Schachtanlage bei geöffneten Einlagerungskammern absäuft. Damit wäre auch keine relevante Rückhaltung der Schadstoffe im Grubengebäude gewährleistet. Dieses Risiko steigt mit zunehmender Zeitdauer der Rückholung, da sich mit der Zeit die Verformungen im Tragsystem vergrößern werden und eine Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungen wahrscheinlicher wird. Die Verantwortung für den sicheren Abschluss der Abfälle von Mensch und Umwelt sowie auch die Gefährdungsprävention für den Betrieb der Schachtanlage lässt daher nur folgende Schlussfolgerungen zu:

- Der Verbleib der Abfälle in den Einlagerungskammern und eine schnellstmögliche und sichere Schließung der Schachtanlage Asse gewährleisten den sicheren Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre.

Auf dieser Grundlage ist die Langzeitsicherheit nachgewiesen. Deshalb kommt eine Rückholung der Abfälle, bei der der auf noch wenige Jahre begrenzte Zeitraum der (trockenen) Betriebsphase deutlich überschritten wird, nicht in Betracht.

Auch eine ausschließliche Rückholung der MAW-Abfälle würde die Sicherheit gefährden, da ein sicherer Einschluss der Abfälle in der MAW-Einlagerungskammer möglich ist. Es kann außerdem gezeigt werden, dass diese Abfälle keinen relevanten Einfluss auf die berechnete Strahlenexposition in der Biosphäre haben. Durch eine Rückholung würde der sichere Abschluss dieser Abfälle verhindert werden und eine erhöhte Gefährdung durch potenzielle Strahlenexpositionen während der Rückholung entstehen. Dies würde eindeutig gegen das Minimierungsgebot verstoßen. Deshalb wird auch eine ausschließliche Rückholung der MAW-Abfälle nicht in Betracht gezogen.

## 5. Sicherheitskonzept

Das Sicherheitskonzept beschreibt die Strategie, mit der die langfristig sichere Schließung der Schachanlage unter Einbeziehung der Standortbedingungen und der natürlich ablaufenden Prozesse sichergestellt werden soll. Mit dieser Strategie soll u. a. verhindert werden, dass Schadstoffe während der Nachbetriebsphase in relevantem Maße in die Umwelt gelangen. Das Sicherheitskonzept bildet die Grundlage für die Entwicklung des Schließungskonzepts. Letzteres beschreibt umfassend und vollständig, jedoch in übergeordneter Weise und ohne ins Detail zu gehen, die Art der Maßnahmen, mit denen die Sicherheit gewährleistet werden soll. Die verschiedenen Schließungsmaßnahmen und die Abwägung bis zur Findung der Vorzugsmaßnahme ist Gegenstand von Kapitel 6. Die Schließungsmaßnahmen selbst sind Bestandteil der Konzeptplanungen, in denen auch die technische Machbarkeit belegt wird. Die Arbeitsschritte Sicherheitskonzept ⇒ Schließungskonzept ⇒ Konzeptplanung der Schließungsmaßnahmen erfolgten im iterativen Prozess, der in mehreren Iterationsschritten von der unabdingbaren Voraussetzung des Einleitens eines Schutzfluids über notwendige Korrekturen und Optimierungen bis zur Festlegung des Schließungskonzepts der Schachanlage Asse II (Kapitel 7) führt.

Das Sicherheitskonzept soll gewährleisten, dass sowohl Empfehlungen der Internationalen Atomenergiebehörde sowie der nationalen Reaktorsicherheitskommission und Strahlenschutzkommission im Hinblick auf die radiologische Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle berücksichtigt als auch gesetzliche Schutzziele eingehalten werden. Grundlage hierfür stellt das Erfüllen der aus den Standortbedingungen resultierenden, grundlegenden Anforderungen dar (Kapitel 2.6). Um diese zu erfüllen, ist das Einleiten eines Schutzfluids die unabdingbare Voraussetzung. Ohne dies ist weder der Langzeitsicherheitsnachweis mit ausreichender Prognosesicherheit zu führen noch die Einhaltung der Schutzziele nachzuweisen.

Das Sicherheitskonzept soll neben dem bisher diskutierten Erhalt der Resttragfähigkeit der Tragelemente auch die Mobilisierung von Schadstoffen begrenzen und deren Transport beeinflussen. Deshalb umfasst das Sicherheitskonzept für die verfüllte und verschlossene Schachanlage Asse II die folgenden strategischen Elemente:

### 1. *Stabilisierung des Tragsystems am Standort*

Durch eine schnelle Stabilisierung des Tragsystems am Standort wird dessen Resttragfähigkeit erhalten und dadurch verhindert, dass weitere starke und bruchhafte Verformungen in der Salzstruktur und – als Folge – im Deckgebirge auftreten.

### 2. *Begrenzung bzw. Behinderung der Schadstoffmobilisierung*

Da ein Kontakt der Abfallgebinde mit Salzlösung unvermeidbar ist, soll die daraus resultierende Mobilisierung der Schadstoffe begrenzt und behindert werden. Je weniger Schadstoffe aus den Abfallgebinden mobilisiert werden oder je langsamer die Mobilisierung erfolgen wird,

umso weniger Schadstoffe gelangen (pro Zeiteinheit) in Lösung oder in die Gasphase und unterliegen somit dem Transport.

3. *Begrenzung bzw. Behinderung der Lösungsbewegungen im Grubengebäude und Lenkung von unvermeidlichen Lösungsbewegungen*

Da die Mobilisierung von Schadstoffen nicht zu verhindern ist, sollen Lösungsbewegungen im Grubengebäude – insbesondere in den und nahe den Einlagerungskammern – begrenzt und behindert werden sowie unvermeidliche Lösungsbewegungen gelenkt werden. Dieses verringert und verzögert den Transport von Schadstoffen aus den Einlagerungskammern bis zu der Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke oder zu den Tagesschächten, an der Lösung aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge austritt.

4. *Begrenzung des Austritts von Lösungen aus dem Grubengebäude ins Deckgebirge*

Da die Ausbreitung von Schadstoffen in Lösung im Grubengebäude nicht zu verhindern ist, soll der Austritt von Lösungen ins Deckgebirge begrenzt werden. Je geringer die Rate des Lösungsaustritts aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge ist, umso niedriger ist die Austrittsrate von gelösten Schadstoffen ins Deckgebirge.

5. *Vermeiden von neuen hydraulischen Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und Deckgebirge*

Durch das Entstehen neuer Wegsamkeiten zwischen Grubenbauen und dem Deckgebirge – insbesondere direkte Wegsamkeiten von den Einlagerungskammern bis in das Deckgebirge – würde die Verzögerung des Transports von Schadstoffen im Grubengebäude vermindert. Dieses soll vermieden werden.

6. *Vermeiden eines Lösungszutritts und -austritts über die Tagesschächte*

Ein nennenswerter Lösungszutritt über die Tagesschächte in das Grubengebäude könnte in der Nachbetriebsphase – in Verbindung mit den Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke – zu einer konvektiven Durchströmung im oberen Grubengebäude führen. Ein nennenswerter Lösungsaustritt über die Tagesschächte würde die Verzögerung des Transports von Schadstoffen und die Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen im Deckgebirge deutlich herabsetzen.

Die Elemente des Sicherheitskonzepts können durch Maßnahmen im Grubengebäude erreicht oder zumindest beeinflusst werden. Ein weiteres Element des Sicherheitskonzepts stellt der

7. *Mechanische Schutz des Systems „Grubengebäude/Salzstruktur“*

bzw. die *dadurch* hervorgerufene Verzögerung des Transports und der Verdünnung der Stoffkonzentrationen im Deckgebirge dar. Dieses Element ist naturgegeben und durch technische Maßnahmen kaum zu beeinflussen.

Neben dem Sicherheitskonzept für die verfüllte und verschlossene Schachtanlage Asse besteht ebenso ein Sicherheitskonzept für den Zeitraum während der Verfüllung und des Verschlusses der Schachtanlage Asse. Das betrifft den Arbeits- und Strahlenschutz sowie die radiologische Sicherheit während der künftigen Betriebsphase. Bei der Prüfung der technischen Machbarkeit und der folgenden Ausführungsplanung für Einzelmaßnahmen ist insbesondere die radiologische Sicherheit zu gewährleisten. Dies bedeutet,

- die Strahlenexposition des Personals unterhalb des in der StrlSchV festgelegten Wertes und darüber hinaus so niedrig wie vernünftigerweise erreichbar zu halten,
- die Freisetzung von Radionukliden mit den Abwettern im Bereich der bisher erfolgten Ableitungen und damit auf einem unbedenklich niedrigen Niveau zu halten,
- nur Lösungen oder Abwässer aus der Schachtanlage nach über Tage zu befördern, die die radiologische Freigrenze gemäß StrlSchV einhalten und
- das eventuelle Anfallen von radioaktiv kontaminierten Lösungen und Stoffen so gering wie möglich zu halten und diese nicht nach über Tage zu befördern.

## **6. Auswahl geeigneter Schließungsmaßnahmen**

Die Prüfung von einzelnen Maßnahmen und von Kombinationen mehrerer Maßnahmen bezüglich der Integration in das Schließungskonzept erfolgte in einem iterativen Prozess. Die Bewertung stützte sich auf den wissenschaftlichen Kenntnisstand, auf bestehendes ingenieurtechnisches Wissen und auf Erfahrungen aus dem Bergbau sowie auf begleitende Modellrechnungen zu den quantitativen Auswirkungen auf das Systemverhalten und den Schadstofftransport. Gestützt auf Modellrechnungen für das Gesamtsystem Asse werden mögliche Auswirkungen auf Mensch und Umwelt unter der Annahme der veranschlagten Maßnahmen ermittelt sowie die Langzeitsicherheit bzw. die Einhaltung der Schutzziele bewertet. Die Ergebnisse der einzelnen Iterationsschritte deuteten auf notwendige Änderungen und mögliche Optimierungen der betrachteten Maßnahmen, der betrachteten Kombinationen oder des Gesamtkonzepts hin.

Die Prüfung der unterschiedlichen Maßnahmen hatte verschiedene Gesichtspunkte zu berücksichtigen und alle zu erfüllen:

- Einfluss im Hinblick auf das entsprechende Element des Sicherheitskonzepts,
- Prognosesicherheit des Systemverhaltens,
- radiologische Sicherheit und
- grundsätzliche technische Machbarkeit.

Eine Prüfung der grundsätzlichen technischen Machbarkeit am Standort erfolgte auf Grundlage der Konzeptplanungen im Rahmen des entsprechenden Iterationsschrittes.

Im Folgenden werden die in Betracht gezogenen Maßnahmen und die relevanten Ergebnisse der einzelnen Iterationsschritte dargelegt und bewertet. Die Bewertung umfasst ausschließlich die entscheidenden Argumente für die Auswahl der Maßnahmen bzw. für den Ausschluss einer anderen in Betracht gezogenen Maßnahme. Für die in das Schließungskonzept integrierte, bevorzugte Schließungsmaßnahme werden generelle Anforderungen genannt.

### **6.1 Maßnahmen zur Stabilisierung des Tragsystems**

Das Einleiten des Schutzfluids ist die unabdingbare Voraussetzung, um das System in einen langzeitsicheren Zustand zu bringen, den Nachweis der Langzeitsicherheit mit ausreichender Prognosesicherheit zu führen und die Einhaltung der Schutzziele nachzuweisen. Durch den Aufbau des hydrostatischen Drucks im Grubengebäude erfolgt eine Stützung des Tragsystems. Der Fluiddruck im Porenraum nimmt mit dem Anstieg des Schutzfluidpegels sukzessiv zu. Einige Jahre nach der Auffüllung des Porenraums im Grubengebäude wird der volle hydrostatische Stützdruck für das Tragsystem erreicht. Aufgrund des Porenvolumens im Versatz und im aufgelockerten Gestein dringt mit steigendem Fluiddruck das Schutzfluid schrittweise in den Versatz und die Auflockerungszonen vor und die minimale Hauptnormal-

spannung eines Versatzkörpers oder eines aufgelockerten Gesteins wird bei ansteigendem Fluiddruck nach und nach erreicht bzw. überschritten. Die Stützwirkung des Fluiddrucks an den Pfeilerkonturen behindert jedoch die voranschreitende Entfestigung im Tragsystem und bewirkt einen degressiven Verlauf der Verformungs- und Deckgebirgsverschiebungsraten in der Nachbetriebsphase //fG 2006a/.

Das Tragsystem kann durch Umlösung und Zersetzung am Carnallit lokal geschädigt werden. Sofern sich das Schutzfluid nahezu im chemischen Gleichgewicht mit Carnallit befindet, sind diese Prozesse vernachlässigbar. Deshalb wird die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids im Mittel der einer an  $MgCl_2$  und  $MgSO_4$  gesättigten R-Lösung des quinären bzw. IP 19 des hexären Systems der ozeanischen Salze entsprechen (Tabelle 6.1). Andere Zusammensetzungen des Schutzfluids, wie Q-Lösung (IP 21) oder  $CaCl_2$ -gesättigte Lösung, rufen Umlösungsprozesse von Kalisalzen hervor, wodurch das anstehende Gestein zersetzt wird. Außerdem wird sich dabei die Lösungszusammensetzung stetig ändern und dichtebedingte Konvektionsbewegungen auslösen (siehe Kapitel 6.4.4). Ort, Intensität und zeitlicher Verlauf dieser Prozesse können nicht sicher prognostiziert werden. Ein Schutzfluid mit der mittleren Zusammensetzung einer

➤ **Lösung am Punkt R bzw. IP 19**

stellt nach Abwägen aller Aspekte die sicherste Lösung bezüglich der langzeitigen Stabilisierung des Tragsystems in der Nachbetriebsphase dar. Diese Zusammensetzung ist auch für weitere Maßnahmen sicherheitsgerichtet und erhöht die Prognosesicherheit für die Nachbetriebsphase (Kapitel 6.2 ff.). Die Dichte des Schutzfluids beträgt mindestens  $1,3 \text{ g/cm}^3$  und ist damit schwerer als die der Lösungen im Deckgebirge.

Während der Einleitung des Schutzfluids ist im entfestigten Tragsystem mit beschleunigten Kriechverformungen, verstärkten Bruchprozessen und abfallenden Versatzdrücken zu rechnen. Eine solche Erhöhung der Verformungen und – in der Folge – der Deckgebirgsverschiebungen kann erhöhte Lösungszutrittsraten aus dem Deckgebirge verursachen. Um dies zu vermeiden, muss gewährleistet werden, dass

- die Deckgebirgsverschiebungsraten abnehmen oder zumindest gleich bleiben und
- dynamische Reaktionen blockiert werden

//fG 2006a/. Dynamische Reaktionen können durch Versatzsackungen, Versagen von Schweben und bruchhafte Verformungen im Deckgebirge initiiert werden. Daraus folgt, dass eine hinreichende und gleichmäßige Stützung der Tragelemente im oberen Baufeld in der Südflanke (oberhalb 700 m Teufe) notwendig ist, welche bereits während der Einleitung des Schutzfluids wirkt.

Unterhalb von 700 m Teufe wird aufgrund der Stützwirkung des Sorelbetons, der großräumig eingebracht werden soll (siehe Kapitel 6.3 ff.), und der mächtigen Steinsalz-Barriere in der Südflanke eine hinreichende und gleichmäßige Stützung der Tragelemente gewährleistet.

### **6.1.1      *Potenzielle Stabilisierungsmaßnahmen für die Betriebsphase***

Das Ziel der zusätzlichen Stabilisierungsmaßnahmen im oberen Baufeld in der Südflanke ist eine *hinreichende und gleichmäßige Stützung der Tragelemente* während der Einleitung des Schutzfluids, damit gesicherte Prognosen des Systemverhaltens möglich sind. Eine weitgehend gleichmäßige Stützung der Tragelemente im oberen Baufeld in der Südflanke ist erforderlich, um Scherbeanspruchungen zu begrenzen, die aufgrund unterschiedlicher Versatzwiderstände eintreten können. Solche Verformungen können sowohl bereits entfestigte Tragelemente als auch angrenzende Deckgebirgsschichten zusätzlich schädigen. Bei Durchführung der Maßnahmen ist der auf wenige Jahre begrenzte Zeitraum der Betriebsphase einzuhalten.

Diese Stützung kann durch Erhöhung der Versatzdichte, der Versatzsteifigkeit oder des Innendrucks im Porenraum des Versatzes erreicht werden. Voraussetzung hierfür ist die vollständige Verfüllung der Resthohlräume im Bereich des oberen Baufeldes in der Südflanke, insbesondere jene der Firstspalten in den Abbauen des Baufeldes und der Abbaubegleitstrecken (siehe Kapitel 6.4.1). Potenzielle Maßnahmen sind

- der Einbau von Spülversatz,
- der Einbau von Pumpversatz,
- die Injektion der Versatzkörper,
- eine erhöhte Einletrate des Schutzfluids,
- die Aufprägung eines pneumatischen Innendrucks während der Einleitung des Schutzfluids im oberen Baufeld in der Südflanke.

Diese potenziellen Maßnahmen sind in /IfG 2006a/ im Hinblick auf ihre Wirksamkeit für den Erhalt der Resttragfähigkeit des Tragsystems betrachtet und bewertet worden.

#### *Einbau von Spülversatz*

Bei einem Einbau von Spülversatz – das Einspülen von Salzgrus mit Schutzfluid – wird die Dichte des Versatzkörpers erhöht. Durch Befeuchtung des Versatzes wird eine Sackung der Versatzkörper herbeigeführt. Die sich bildenden Sackungsspalten werden anschließend versetzt. Dadurch würde sich die integrale Versatzdichte erhöhen, so dass ein größerer Versatzwiderstand den Verformungen des Tragsystems entgegen wirkt.

Mit diesem Verfahren ist eine relevante Erhöhung der Versatzdichte möglich, wenn mit einem erheblichen Lösungsüberschuss gearbeitet wird. Dabei wird eine Versatzsackung hervorgerufen und in den vergrößerten Firstspalt kann Salzgrus eingespült werden. Bei der Befeuchtung des Versatzes würden aufgrund der gebirgsmechanischen Schädigung der Pfeiler und Schweben gleichzeitig die Tragelemente durchfeuchtet. Bei der Durchfeuchtung von aufgelockerten Konturbereichen werden sich die Kriechdeformationen erhöhen und der Tragwiderstand bereits entfestigter Tragelemente wird herabgesetzt. Im Zusammenhang mit dynamisch ablaufenden Versatzsackungen können zusätzliche Schwebenbrüche hervorgerufen werden. Bei Befeuchtung dringt das Schutzfluid in Abhängigkeit des Kompaktions-

grades und des Fluiddrucks in die Versatzkörper ein. Sowohl die Intensität der Sackung als auch die erreichbare Versatzdichte ist hier nicht sicher vorauszusagen.

Das Ziel der zusätzlichen Stabilisierung des Tragsystems wird nicht erreicht, es ist sogar eine zusätzliche Schädigung des Tragsystems zu befürchten, bevor der Stützdruck einwirkt. Dynamische Reaktionen im Tragsystem und Verschiebungsaktivierungen im Deckgebirge sind nicht auszuschließen.

### Einbau von Pumpversatz

Beim Einbau von Pumpversatz – Verpumpen von Sorelbeton – werden unverfüllte Hohlräume aufgefüllt. Diese sind in der Regel etwa 30 cm mächtige Firstspalte in den Abbauen und offene Abbaubegleitstrecken. Durch den Suspensionsdruck vom Pumpversatz werden weniger kompaktierte Bereiche der Versatzkörper verdichtet und sich bildende Hohlräume mit Feststoff gefüllt. Dadurch würde sich die integrale Versatzdichte erhöhen, sodass ein größerer Versatzwiderstand den Verformungen des Tragsystems entgegen wirkt.

Die erreichbare Verdichtung hängt vom integralen Kompaktionsgrad und Dichtegradienten der Versatzkörper ab. Jedoch ist die durch Auflast des Pumpversatzes erreichbare Kompaktion der Versatzkörper gering, da als Einwirkfläche im Wesentlichen nur die Firstkontur zur Verfügung steht. Die berechnete mittlere Erhöhung der integralen Versatzdichte von gegenwärtig etwa 1,26 t/m<sup>3</sup> auf 1,32 t/m<sup>3</sup> (entspricht einer integralen Versatzporosität von etwa 40 %) ist unzureichend, um die beschleunigten Verformungen während der Einleitung des Schutzfluids in relevantem Maß zu behindern. Des Weiteren wirkt der Stützdruck nicht mit Beginn der beschleunigten Verformungen, sondern baut sich erst mit der auf den Versatz auflaufenden Volumenkonvergenz auf.

Die zusätzliche Stabilisierung des Tragsystems allein durch Pumpversatz aus Sorelbeton reicht nicht aus, um die Verformungs- und Deckgebirgsverschiebungsraten während der Einleitung des Schutzfluids ausreichend zu begrenzen. Damit kann das Ziel einer sofort wirksamen und hinreichenden Stützung der Tragelemente mit dieser Maßnahme allein nicht gewährleistet werden.

### Versatzinjektion

Durch eine Injektion werden im Versatzkörper Risse erzeugt, in die das Injektionsmittel eingepresst wird. Durch das Einpressen von partikelgestützten Materialien verringert sich die integrale Porosität des Versatzkörpers und es erhöht sich dessen Steifigkeit. Infolge dessen steigt der Tragwiderstand des Versatzkörpers an. Dadurch wird die Konvergenzrate in den Hohlräumen abnehmen. Um einen relevanten Stabilisierungseffekt zu erreichen, wären umfassende Injektionen im Baufeld der Südflanke erforderlich.

Aufgrund der Kornverteilung des Salzversatzes im Baufeld in der Südflanke lassen sich selbst geringe Injektionsreichweiten von wenigen Metern nur mit hohen Injektionsdrücken von mehreren MPa erreichen. Für die Injektion des Versatzes in einem Abbau sind bei einer Reichweite von zwei Metern etwa 60 Bohrungen erforderlich. Da die Bohrungen bis weit in den Versatzkörper hinein reichen müssen, sind die Bohr- bzw. Rammarbeiten sehr

zeitaufwändig. Die Einschätzung beruht auf eigenen Erfahrungen, da ähnliche Injektionen für den Einbau von Strömungsbarrieren durchgeführt werden.

Für die Injektionen sind spezielle Injektionsmörtel erforderlich, die mit Injektionslanzen in den Versatz gepresst werden. Die Injektionslanzen bleiben verfahrensbedingt im Versatz.

Eine umfassende Injektion der Versatzkörper im Baufeld der Südflanke würde neben einer Stabilisierung der Tragelemente jedoch auch negative Effekte und Aspekte hervorrufen:

- Im Versatzkörper würde sich der mittlere Strömungswiderstand deutlich erhöhen, wodurch Auflockerungszonen in den Pfeilern und an den Rändern des Baufeldes an Bedeutung für den Lösungsfluss und den Radionuklidtransport gewinnen. Zudem würden durch lokale Verformungen neue Trennflächen entstehen. Durch die daraus resultierenden Kanalisierungen ändern sich Transportpfade und verdünnungswirksame Porenvolumina, wodurch sich die Transportzeit der Schadstoffe und die Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen verringert. Es gibt jedoch auch gegenläufige Einflüsse auf die Transportzeit; beispielsweise wären durch Konvergenz geprägte Volumenströme niedriger. Die Prognosesicherheit für das Erreichen der radiologischen und wasserrechtlichen Schutzziele wäre gering, da diese von schwer zu prognostizierenden, teils gegenläufig einwirkenden Faktoren abhinge.
- Die Einleitung des Schutzfluids würde sich verlangsamen bzw. nur mit erhöhtem Druck möglich sein. Da hohe Drucksteigerungsraten die Funktion der Strömungsbarrieren beeinträchtigen können, ist der schnelle Aufbau eines hohen Fluiddrucks zu vermeiden. Damit würde die nachhaltige Stabilisierung des Tragsystems verzögert.
- Durch die große Anzahl von Bohrungen und durch die hohen Injektionsdrücke, sind zusätzliche Entfestigungen in den Tragelementen zu erwarten.
- Aufgrund der im Versatzkörper vorhandenen Abschalungen und Schwebenreste sind die Bohr- bzw. Rammarbeiten nur eingeschränkt möglich. Eine qualitätsgerechte Vergütung des Versatzes ist daher ebenfalls nur eingeschränkt möglich.
- Je nach Fortschritt der Maßnahme können sich durch Spannungsumlagerungen und geänderte Verformungsverläufe die Zutrittsstellen in das Grubengebäude verlagern oder die Schüttungsrate erhöhen. Damit bestände ein zusätzliches Risiko durch den Salzlösungszutritt.
- Die im Versatzkörper verbleibenden Injektionslanzen würden zu einer erhöhten Gasbildung in der Südflanke führen.

Aufgrund der genannten Unwägbarkeiten ist das Verfahren einer Versatzinjektion im oberen Baufeld in der Südflanke nicht zielführend.

#### Erhöhte Einletrate des Schutzfluids im oberen Baufeld in der Südflanke

Für das obere Baufeld in der Südflanke ist eine Einletrate von 1.600 m<sup>3</sup>/Tag vorgesehen. Durch eine noch höhere Einletrate könnte der volle hydrostatische Stützdruck für das Tragsystem im oberen Baufeld der Südflanke früher erreicht und somit der Zeitraum beschleunigter Kriechverformungen und verstärkter Bruchprozesse in relevantem Ausmaß verkürzt werden.

Die schnelle Durchfeuchtung der Tragelemente und abfallende Versatzdrücke bewirken beschleunigte Verformungen in Tragelementen, die über die Baufeldränder und das angrenzende Deckgebirge abgetragen werden. Eine zusätzliche Spannungumlagerung auf das Deckgebirge erscheint angesichts der gegenwärtigen Verformungsraten und ablaufenden Senkungen an der Tagesoberfläche, die eng mit dem Konvergenzprozess korrelieren, unwahrscheinlich. Daher wird der reduzierte Tragwiderstand auf den unteren Sohlen des Baufeldes eine Beschleunigung der Verformungen auf den oberen Sohlen hervorrufen. Diese Reaktionen werden sich bei einer Erhöhung der Einletrate verstärken. Das Vorlaufen der beschleunigten Verformungen wird sich mit dem fortschreitenden Schutzfluidpegel auf den oberen Sohlen verstärken und kann dynamische Reaktionen hervorrufen.

Das Ziel der zusätzlichen Stabilisierung des Tragsystems wird nicht erreicht, da eine nachhaltige Stützung des Tragsystems erst mit dem vollen hydrostatischen Druck gegeben ist. Durch erhöhte Einletraten werden zwar der Zeitraum von beschleunigten Verformungen verkürzt, während dieses Zeitraumes jedoch die Verformungsraten erhöht; dynamische Reaktionen sind daher nicht auszuschließen //fG 2006a/.

#### Aufprägung eines pneumatischen Drucks im oberen Baufeld in der Südflanke

Durch die Aufprägung eines pneumatischen Drucks (Druckluft) im oberen Baufeld in der Südflanke wird der Innendruck im Porenraum des Versatzkörpers und der aufgelockerten Gebirgsbereiche gegenüber dem atmosphärischen Druck erhöht. Dadurch wird sofort eine größere Stützwirkung den Verformungen entgegen wirken. Voraussetzungen sind eine hinreichende Abdichtung der Tagesschächte (Kapitel 6.6).

Die Wirksamkeit des Fluiddrucks in den Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und Deckgebirge ist aufgrund der hydrogeologischen Situation gegeben. Damit ist der Aufbau eines pneumatischen Drucks möglich.

Da alle Grubenbaue mit porösen Materialien versetzt und hydraulisch miteinander verbunden sind, wirkt der pneumatische Innendruck als Stützdruck im gesamten Grubengebäude gleichmäßig und sofort. Die nachfolgende Auffüllung des Porenraums mit Schutzfluid wird dadurch aufgrund der hydrostatischen Druckhöhe des Schutzfluids am Einleitpunkt im Grubengebäude nicht behindert.

Durch die Aufprägung der Druckluft verändern sich die transportwirksamen Pfade und die verdünnungswirksamen Porenvolumina im Baufeld in der Südflanke gegenüber der gegenwärtigen Situation nicht.

Das Ziel der zusätzlichen Stabilisierung des Tragsystems wird erreicht. Die Stützwirkung eines pneumatischen Drucks im Porenraum des Baufelds von etwa 1 MPa behindert die voranschreitende Entfestigung im Tragsystem und bewirkt einen degressiven Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten während der Einleitung des Schutzfluids //fG 2006a/. Die Prognosesicherheit für das Systemverhalten und die radiologische Sicherheit ist durch die Maßnahme nicht eingeschränkt.

### 6.1.2 Auswahl der Stabilisierungsmaßnahmen

Ein Vergleich der Maßnahmen zeigt, dass das Ziel einer *hinreichenden und gleichmäßigen Stützung der Tragelemente* während der Einleitung des Schutzfluids durch die Aufprägung eines pneumatischen Innendrucks im Baufeld in der Südflanke erreicht wird, der im gesamten Grubengebäude als Stützdruck wirkt. Durch den pneumatischen Innendruck werden beschleunigte Verformungen und dynamische Reaktionen im Tragsystem sowie Verschiebungsaktivierungen im Deckgebirge verhindert und das Risiko eines Anstiegs der Lösungszutrittsrate mit vergleichsweise geringem technischen Aufwand vermindert. Das

#### ➤ Aufprägen eines pneumatischen Innendrucks

stellt nach Abwägen aller Aspekte somit die sicherste und zweckmäßigste Lösung dar. Da der pneumatische Druck auch im Zuflussbereich wirkt und somit die Druckdifferenz zu den Lösungsreservoirs im Deckgebirge verringert, wird die Zuflussrate bei unveränderten Verhältnissen im Deckgebirge abnehmen.

Ergänzend ist der vorlaufende Einbau von Pumpversatz in noch unverfüllte Hohlräume, wie Firstspalten in Abbauen und Abbaubegleitstrecken, sicherheitsgerichtet (siehe Kapitel 6.4.3). Dadurch werden wenig kompaktierte Bereiche des Versatzkörpers verdichtet und – insbesondere in den Abbaubegleitstrecken – der Tragwiderstand erhöht.

Nach dem Aufbau des pneumatischen Innendrucks wird der Porenraum mit Schutzfluid aufgefüllt, welches mit der vollständigen Auffüllung des Grubengebäudes die Stützung der Tragelemente in der Nachbetriebsphase übernimmt. Da der Lösungszutritt aus dem Deckgebirge – wenn auch mit geringerer Rate – andauern wird und ebenso die Verformung im Gesamttragsystem fortschreiten wird, ist eine schnelle Auffüllung des Grubengebäudes mit Schutzfluid sicherheitsgerichtet. Dies wird weder durch den pneumatischen Druck noch durch den Pumpversatz behindert.

Durch den pneumatischen Druck und den Fluiddruck des Schutzfluids im Porenraum der Versatzkörper und Auflockerungszonen wird ein degressiver Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten und eine Blockierung dynamischer Reaktionen im Tragsystem in der späten Betriebs- und der Nachbetriebsphase gewährleistet. Somit sind gesicherte Prognosen des Systemverhaltens möglich (siehe IfG 2006b).

### 6.1.3 Generelle Anforderungen an die Stabilisierungsmaßnahmen

Eine *hinreichende Stützung der Tragelemente* für die Schutzfluideinleitung wird bereits bei einem Innendruck von 1 MPa erreicht /IfG 2006a/. Der aufgeprägte pneumatische Druck muss auf diesem Niveau gehalten werden, bis sich der Fluiddruck auf einen Wert stabilisiert hat, der einem Schutzfluidniveau von mindestens 490 m Teufe entspricht. Während der Einleitung des Schutzfluids wird der pneumatische Druck auf 1,5 MPa begrenzt.

Der Erhalt der Resttragfähigkeit und die Prognosesicherheit des gebirgsmechanischen Systemverhaltens sind nicht eingeschränkt, wenn die Stützung des Tragsystems durch den pneumatischen Innendruck im Jahr 2014 erreicht wird und das Grubengebäude etwa zwei

Jahre später mit Schutzfluid aufgefüllt ist. Letzteres erfordert eine Einletrate für das Schutzfluid in das obere Baufeld in der Südflanke von durchschnittlich 1.600 m<sup>3</sup>/Tag.

Die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids soll im Mittel nahe der einer R-Lösung liegen (Tabelle 6.1), wodurch die Umlösung und Zersetzung vom Carnallit minimiert wird. Um großräumige Konvektionsströme zu verhindern, werden spezifische Anforderungen an die Lösungsdichte und chemische Zusammensetzung in verschiedenen Teufenbereichen gestellt (siehe Kapitel 6.4.4).

Tab. 6.1: Mittlere Lösungszusammensetzung des Schutzfluids am Punkt R des quinären Systems für 30 °C nach /d`Ans 1933/

[g/100g H <sub>2</sub> O]				[mol/1000mol H <sub>2</sub> O]			
NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>
2,6	1,3	43,6	4,5	4,0	1,6	82,4	6,8
[g/l]				[mol/l]			
NaCl	KCl	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	MgCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>
22,4	11,43	375,8	39,2	0,192	0,077	3,95	0,326

#### 6.1.4 Grundsätzliche technische Machbarkeit der Schutzfluideinleitung

Für das Einleiten von Salzlösung in Salzbergwerke liegen umfangreiche Erfahrungen vor. Die Speicherung von Gas und Flüssigkeit im geologischen Untergrund (Kavernen) ist seit mehr als 50 Jahren Stand der Technik. Daher liegen für den Einschluss von Druckluft bzw. den Aufbau eines pneumatischen Drucks in einem Salzbergwerk sowie für die Auffüllung von Grubenhohlräumen mit Salzlösung gegen ein gespanntes Gaspolster umfangreiche Erfahrungen aus dem Salzbergbau vor. Gas kann über lange Zeiträume in Grubenhohlräumen im Salzgebirge gespeichert werden und Luft bzw. Gas aus Grubenhohlräumen durch Salzlösungen gegen einen zunehmenden Druck verdrängt werden. Die grundsätzliche Machbarkeit am Standort Asse wird für vergleichbare Beispiele aus dem Salzbergbau belegt.

Der Untergrundgasspeicher (UGS) Burggraf-Bernsdorf – ein stillgelegtes Kalibergwerk – befindet sich seit 35 Jahren im Betrieb und es traten keine Gas- bzw. Druckverluste auf. Im UGS beträgt der maximale Gasdruck 3,6 MPa und somit mehr als das Doppelte des am Standort Asse vorgesehenen pneumatischen Drucks. Die maximale Entnahmerate aus dem UGS liegt bei 40.000 m<sup>3</sup>/h und damit um ein Vielfaches über der Abflussrate von etwa 1.500 m<sup>3</sup>/Tag, die bei der Schutzfluideinleitung am Standort Asse veranschlagt wird.

Im Kalibergwerk Bernterode bildete sich während des Ersaufens durch Salzlösungszuflüsse im Grubenhöchsten eine Gasblase von etwa 100.000 m<sup>3</sup> mit einem Druck von 5,5 MPa. Die Grubenhohlräume liefen gegen die zunehmende Gasblase ohne merkliche Volumenverluste mit Salzlösung voll. Der Schacht des Bergwerks wurde durch einen Verschluss abgedämmt, der seit mehr als 30 Jahren trotz der Belastung durch den Druck von unten keine Undichtigkeiten zeigt. Es ist somit zu konstatieren, dass einerseits trotz des hohen Gasdrucks

Salzlösung in die Hohlräume eingedrungen ist, und dass andererseits der Druck der Gasblase und der Salzlösung einen Widerstand gegen die Konvergenz der Gruben Hohlräume ausübt.

Die Beispiele belegen, dass der Aufbau eines pneumatischen Drucks und die Auffüllung mit Salzlösung gegen ein gespanntes Gaspolster möglich sind.

Der Aufbau eines hydrostatischen Stützdrucks zur Rückhaltung von zutretenden Wässern ist auch im Tunnelbau Stand der Technik.

Die technische Machbarkeit der Aufprägung des pneumatischen Drucks und die Auffüllung des Porenraums mit Schutzfluid gegen gespannte Druckluft wurden für den Standort Asse damit gezeigt. Voraussetzungen sind die Abdichtung der Tagesschächte und die Wirksamkeit des hydrostatischen Drucks in den hydraulischen Wegsamkeiten zwischen Grubengebäude und Deckgebirge: Während das unverritzte und gebirgsmechanisch gering beanspruchte Salzgestein dicht ist, wirkt in der hydraulisch undichten Zone der Steinsalz-Barriere (Salzlösungszutritt) der Fluiddruck im Deckgebirge. Der Einschließdruck für den pneumatischen Innendruck im Grubengebäude wurde mit 2,5 MPa ermittelt. Um das Entweichen von Druckluft aus der Grube bzw. den Druckverlust einzuschränken und somit den zeitgerechten Aufbau des pneumatischen Innendrucks im oberen Baufeld zu gewährleisten, wird dieser vorsorglich auf 1,5 MPa begrenzt.

Die Maßnahmen, die eine hinreichende Abdichtung der Tagesschächte am Standort Asse gewährleisten, werden in Kapitel 6.6 erläutert. Die grundsätzliche technische Umsetzung der Einleitung von Schutzfluid und das geplante Einleitregime werden in Kapitel 6.7 dargelegt.

## **6.2 Maßnahmen zur Begrenzung der Schadstoffmobilisierung**

Das Einleiten des Schutzfluids ist, wie bereits erwähnt, die unabdingbare Voraussetzung, um den Nachweis der Langzeitsicherheit mit ausreichender Prognosesicherheit zu führen. Eine vollständige Abdichtung der LAW-Einlagerungskammern gegen das übrige Grubengebäude bzw. ein vollständiger Einschluss der Abfallgebände in den LAW-Einlagerungskammern ist nicht möglich, da die Einlagerungskammern mit angrenzenden Abbauen durch Auffahrungen und Auflockerungszonen in den Pfeilern und Schweben hydraulisch verbunden sind. Damit ist ein Kontakt der Abfallgebände mit dem Schutzfluid mit Ausnahme in der MAW-Einlagerungskammer unvermeidbar.

Bei Kontakt der Abfallgebände mit dem Schutzfluid werden die Behälter aus Stahlblech und die Abfallmatrizes korrodieren. Im Zuge der Korrosionsprozesse werden Schadstoffe mobilisiert, d. h. sie gehen von einer fixierten, festen Phase in eine flüssige oder gasförmige, transportfähige Phase über. Die Mobilisierungsrate hängt vom chemischen Milieu an der Oberfläche der Matrizes und in den Einlagerungskammern ab. Dieses Milieu wird von der Zusammensetzung und den Mengenverhältnissen der festen, flüssigen und gasförmigen Kammerinhaltsstoffe bestimmt. Modellrechnungen und Laboruntersuchungen zeigen, dass die Konzentrationen relevanter Radionuklide, beispielsweise von Plutonium und Uran, in einem sauren Milieu deutlich höher sind als in einem neutralen bis alkalischen Milieu. Einige

Einlagerungskammern sind nicht vollständig mit Abfallgebänden und Salzhautwerk verfüllt (Tabelle 6.2), sodass durch zusätzliche Versatzstoffe das Milieu beeinflusst werden kann.

Durch eine Beeinflussung des Milieus kann die Mobilisierung von Schadstoffen begrenzt und/oder behindert werden. Modellrechnungen und Laboruntersuchungen zeigen, dass die maximal möglichen Konzentrationen relevanter Radionuklide, beispielsweise von Plutonium und Uran, in einem sauren Milieu deutlich höher sind als in einem neutralen bis alkalischen Milieu.

Da im Bereich der MAW-Einlagerungskammer das Gebirge noch weitgehend intakt ist und die Einlagerungskammer noch zu über 90 % unverfüllt ist, kann durch vollständige Verfüllung dieser Kammer sowie Abdichtung aller relevanten Wegsamkeiten ein Kontakt der Abfälle mit Schutzfluid vermieden werden.

Im Porenraum und an der Oberfläche der zementierten und betonierten Abfallmatrizes liegt ein Ca-betontes, stark alkalisches Milieu ( $\text{pH} > 9$ ) vor. In den Hohlräumen der Einlagerungskammern wird sich anfangs bei Lösungskontakt durch Korrosion von Zement und Stahl der Abfallbehälter ein neutrales bis schwach alkalisches, reduzierendes Milieu ( $\text{pH} 7 - 9$ ) einstellen. Bei hohem Zementinventar wird sich mit der Zeit ein stark alkalisches Milieu ( $\text{pH} > 9$ ) in den Einlagerungskammern ausbilden. Infolge der schrittweisen Umsetzung organischer Bestandteile in den Abfällen durch mikrobielle Umsetzung zu  $\text{CO}_2$  kann der pH-Wert aber auch absinken und dadurch mittel- bis langfristig ein saures Milieu ( $\text{pH} < 7$ ) entstehen.

Um das Milieu langfristig in einem alkalischen Bereich zu fixieren und eine Versauerung zu vermeiden, muss

- gelöstes  $\text{CO}_2$  quantitativ ausgefällt und
- die Mg- und/oder Ca-Konzentration langfristig stabilisiert werden.

Hierfür sind das Einbringen geeigneter Versatzstoffe in hinreichender Menge und das Begrenzen des Lösungsaustausches im Porenraum der Einlagerungskammern durch den Bau von Strömungsbarrieren notwendig (siehe Kapitel 6.3).

Durch die Verfüllung wird der Porenraum in den Einlagerungskammern und somit die Lösungsmenge, die Schadstoffe aufnehmen kann, reduziert. Die Verfüllung stabilisiert die Hohlraumkontur und behindert dadurch auch die Konvergenz. Deshalb wird durch die Verfüllung der Einlagerungskammern die insgesamt auspressbare Lösungsmenge deutlich verringert.

Tab. 6.2: Kenndaten zu den Einlagerungskammern (Auswahl)

ELK <sup>(1)</sup>	Kammervolumen <sup>(2)</sup> [m <sup>3</sup> ]	unverfüllter Hohlraum <sup>(2)</sup> [m <sup>3</sup> ]	Einlagerung
2/750(Na2)	22.800	Klein <sup>(3)</sup>	Abkipptechnik mit Salzversatz
7/725(Na2)	16.400	1.900	Abkipptechnik mit Salzversatz
10/750	8.800	klein	Abkipptechnik mit Salzversatz
8/750	8.400	klein	Abkipptechnik mit Salzversatz
4/750	6.500	2.900	Stapeltechnik
5/750	12.100	320	Abkipp- und Stapeltechnik mit Salzversatz
6/750	14.200	klein	Abkipp- und Stapeltechnik mit Salzversatz
7/750	13.400	klein	Abkipp- und Stapeltechnik mit Salzversatz
11/750	11.500	1.000	Abkipp- und Stapeltechnik mit Salzversatz
12/750	7.800	3.300	Stapeltechnik
2/750	5.300	1.700	Stapeltechnik
1/750	6.600	2.100	Stapeltechnik
8a/511	6.000	5.600	Fasskegel durch Abseiltechnik

<sup>(1)</sup> ELK: Einlagerungskammer

<sup>(2)</sup> geschätzt

<sup>(3)</sup> „klein“: ELK ist nach den Unterlagen bis unter die Firste verfüllt

### 6.2.1 Potenzielle Maßnahmen in den Einlagerungskammern

Das Ziel der Maßnahmen ist die *langfristige Stabilisierung eines neutralen bis alkalischen Milieus* in den Einlagerungskammern und die *Rückhaltung relevanter Radionuklide*, die die Exposition in der Biosphäre bestimmen. Die Mobilisierung kann durch Herabsetzung der Elementlöslichkeiten oder Sorption begrenzt werden, wodurch Radionuklide zurückgehalten werden können. Hierfür ist es zweckmäßig, die unverfüllten Hohlräume mit geeigneten Feststoffen zu verfüllen und den Lösungsaustausch im Porenraum der Einlagerungskammern durch den Bau von Strömungsbarrieren zu begrenzen.

Ein weiteres Ziel besteht darin, durch eine Reduzierung des von Konvergenz beeinflussten Porenvolumens die Menge und Rate der aus den Einlagerungskammern verdrängten kontaminierten Lösung zu verringern.

Mögliche Versatzstoffe für die Einstellung bzw. Stabilisierung des neutralen bis alkalischen Milieus sind

- Ca-Mg-Karbonate (Magnesit, Dolomit, Calcit),
- Tone (Bentonite und Smektite),
- Apatit,
- Magnetit,
- technische (anorganische und organische) Ionenaustauscher,
- Zement oder andere Baustoffe mit Ca-Bindemitteln (Ca-Depot),
- Zement oder andere Baustoffe mit Mg-Bindemitteln (Mg-Depot).

Die Versatzstoffe sind bezüglich ihres Einflusses auf das geochemische Milieu in den Einlagerungskammern und auf die Rückhaltung von relevanten Radionukliden bewertet worden.

#### Ca-Mg-Karbonate

Durch das Einbringen von Ca-Mg-Karbonaten, wie Magnesit, Dolomit oder Calcit, wird zusätzlich gebundenes CO<sub>2</sub> in die Einlagerungskammern eingetragen. Das Vermögen karbonatischer Baustoffe, gelöstes CO<sub>2</sub> auszufällen, ist sehr gering.

Eine langfristige Stabilisierung des neutralen bis alkalischen Milieus wird nicht erreicht. Auch das Rückhaltevermögen von relevanten Radionukliden ist für solche Stoffe in hochsalinen Lösungen nicht bekannt. Eine Einbringung von Ca-Mg-Karbonaten wird daher nicht weiter verfolgt.

#### Tone (Bentonite und Smektite)

Tonminerale, wie Bentonite und Smektite, zeichnen sich durch ein hohes potentielles Sorptionsvermögen von Schadstoffen in wässrigen Lösungen aus; dies trifft auch für relevante Radionuklide des Abfallinventars zu. Das Sorptionsvermögen nimmt in der Regel mit zunehmender Salinität der Lösungen deutlich ab. Die Sorptionsprozesse sind in wässrigen Lösungen umfassend untersucht worden, in hochsalinen Lösungen sind die Kenntnisse dagegen sehr begrenzt. Das potentielle Sorptionsvermögen von Tonmineralen in hochsalinen Lösungen muss nach bisherigem Kenntnisstand daher als unzureichend beurteilt werden. Bentonite und Smektite weisen außerdem nur ein sehr geringes Puffervermögen für gelöstes CO<sub>2</sub> in hochsalinen Lösungen auf.

Eine langfristige Stabilisierung des neutralen bis alkalischen Milieus wird nicht erreicht. Auch die Rückhaltung von Radionukliden an Tonen kann hier nicht sicher prognostiziert werden. Eine Einbringung von Tonen wird daher nicht weiter verfolgt.

### Apatit

Apatit bildet schwerlösliche Verbindungen von Schadstoffen in wässrigen Lösungen. Dies trifft auch für einige Radionuklide des Abfallinventars zu. Die Bildung der Verbindungen ist jedoch nur für wässrige Lösungen im sauren Milieu sicher nachgewiesen. Kenntnisse, die eine gesicherte Prognose für die Entwicklung des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern zulassen, liegen nicht vor.

Eine gesicherte Prognose für das chemische Milieu in den Einlagerungskammern sowie für die Bildung und Stabilität der schwerlöslichen Verbindungen ist in hochsalinen Lösungen nicht möglich. Eine Einbringung von Apatit wird daher nicht weiter verfolgt.

### Magnetit

Magnetit zeichnet sich durch ein hohes Sorptionsvermögen von Schadstoffen aus. Dies ist auch für relevante Radionuklide des Abfallinventars zu erwarten. Eine gesicherte Prognose für die Wirksamkeit der Sorption von Radionukliden in hochsalinen Lösungen ist jedoch nicht möglich.

Durch die Korrosion der Stahlbehälter werden zwar die Redoxverhältnisse in den Einlagerungskammern bestimmt und durch die Bildung von Magnetit langfristig stabilisiert. Eine langfristige Stabilisierung des neutralen bis alkalischen Milieus wird durch die Zugabe von zusätzlichem Magnetit aber nicht erreicht. Eine Einbringung von Magnetit wird nicht weiter verfolgt.

### Technische Ionenaustauscher

Technische Ionenaustauscher zeichnen sich zumeist durch ein hohes Sorptionsvermögen aus. Dieses Vermögen ist elementspezifisch und wird von der Zusammensetzung des technischen Stoffes bestimmt. Es gibt zwar technische Ionenaustauscher, die für einzelne Radionuklide des Abfallinventars eine relevante Rückhaltung bewirken können, jedoch nicht für die Gesamtheit der relevanten Radionuklide. Zudem nimmt das Sorptionsvermögen mit zunehmender Salinität der Lösungen drastisch ab.

Technische Ionenaustauscher sind in hochsalinen Lösungen zumeist chemisch nicht stabil, die Umwandlungsprozesse zumeist nicht untersucht. Daher ist einerseits die Sorption nicht langfristig wirksam, andererseits sind auch negative Einflüsse auf das chemische Milieu nicht auszuschließen. Weder die Auswirkungen auf das chemische Milieu noch die Konzentration von relevanten Radionukliden können sicher vorausgesagt werden.

Eine langfristige Stabilisierung des neutralen bis alkalischen Milieus wird nicht erreicht. Die langzeitige Rückhaltung von Radionukliden durch technische Ionenaustauscher kann nicht prognostiziert werden. Eine Einbringung von technischen Ionenaustauschern wird daher nicht weiter verfolgt.

### Zement oder andere Baustoffe mit Ca-Bindemitteln (Ca-Depot)

Zemente bzw. Baustoffe mit Ca-Bindemitteln, z. B. Portlandzement, sind ein wesentlicher Bestandteil des stofflichen Inventars in den Einlagerungskammern. Solche Ca-Zemente bzw. -Betonen sind Bestandteile der Abfallmatrizes und werden im Kontakt mit Schutzfluid korrodiert. Je nach Zementinventar stellen sich anfangs schwach alkalische Bedingungen (pH 7 - 9) in den Einlagerungskammern ein. Durch das Einbringen von Ca-Depot erhöht sich das Puffervermögen für gelöstes CO<sub>2</sub>. Das anfangs schwach alkalische Milieu wird sich zu stark alkalischen, Ca-betonten Bedingungen (pH > 9) verschieben.

Ein stark alkalisches, Ca-betontes Milieu verhält sich wenig robust bei unvermeidlichen Zuflüssen von Mg-reichen Lösungen aus benachbarten Grubenbereichen. Konvektive Lösungsbewegungen sind dabei erhöht, weil Ca-betonte Lösungen eine geringere Dichte als Mg-betonte Lösungen aufweisen. Außerdem sind die Ca-Depots nur eine begrenzte Zeit chemisch wirksam. Das schränkt die Prognosesicherheit für die maximal mögliche Konzentration relevanter Radionuklide ein. Für einige relevante Radionuklide, wie Thorium, ist die maximal mögliche Konzentration in einem Ca-betonten Milieu deutlich höher als in einem Mg-betonten Milieu.

Das Ziel einer langfristigen Einstellung eines alkalischen Milieus wird durch Zugabe von Zement oder Ca-Baustoffen (Ca-Depot) erreicht. Ca-Depots beeinflussen das chemische Milieu günstig und bewirken eine begrenzte Mobilisierung der meisten relevanten Radionuklide. Das Milieu ist jedoch weniger robust und die Ca-Depots sind nur eine begrenzte Zeit wirksam. Die Prognosesicherheit der langzeitigen Entwicklung des chemischen Milieus und somit für die Rückhaltung relevanter Radionuklide ist daher beeinträchtigt.

Ein ungünstiger Einflussfaktor ist die durch Korrosion beeinträchtigte Stützwirkung von Ca-Baustoffen und ihren Umwandlungsprodukten.

### Zement oder andere Baustoffe mit Mg-Bindemitteln (Mg-Depot)

Zemente bzw. Baustoffe mit Mg-Bindemitteln sind nicht Bestandteil des stofflichen Inventars. Im Kontakt mit zementbeeinflussten Lösungen, die sich in den Einlagerungskammern bilden, wirkt sich die Zugabe von Mg-Baustoffen stabilisierend auf das chemische Milieu aus. Durch das Einbringen von Mg-Depot erhöht sich das Puffervermögen für gelöstes CO<sub>2</sub> und das initial schwach alkalische, Mg-betonte Milieu (pH 7 - 9) in den Einlagerungskammern wird stabilisiert.

Ein schwach alkalisches, Mg-betontes Milieu verhält sich robuster bei den unvermeidlichen Zuflüssen von Mg-reichen Lösungen aus benachbarten Grubenbereichen als ein alkalisches Ca-betontes Milieu. Mg-Depots sind langfristig wirksam. Durch Laboruntersuchungen und geochemische Modellrechnungen ist die chemische Wirksamkeit von Mg-Depots nachgewiesen. Die Prognosesicherheit für die maximal möglichen Konzentrationen relevanter Radionuklide ist nicht beeinträchtigt. Für einige relevante Radionuklide, wie Thorium, ist die maximal mögliche Konzentration in einem Mg-betonten Milieu deutlich niedriger als in einem Ca-betonten Milieu.

Das Ziel einer langfristigen Einstellung des alkalischen Milieus und dessen Stabilisierung wird durch die Zugabe von Mg-Baustoffen (Mg-Depot) erreicht. Mg-Depots beeinflussen das chemische Milieu günstig und bewirken eine begrenzte Mobilisierung relevanter Radionuklide. Die Prognosesicherheit der langzeitigen Entwicklung des chemischen Milieus und somit für die Rückhaltung relevanter Radionuklide ist deshalb nicht beeinträchtigt.

Die Stützwirkung von Mg-Baustoffen und ihrer Umwandlungsprodukte ist relevant.

### **6.2.2 Auswahl der Maßnahmen in den Einlagerungskammern**

Ein Vergleich der Maßnahmen zeigt, dass das Ziel einer *langfristigen Stabilisierung des neutralen bis alkalischen Milieus* in den Einlagerungskammern und die *Rückhaltung relevanter Radionuklide* durch das Einbringen von Mg-Depot und Ca-Depot in die Einlagerungskammern erreicht wird. Das

#### **➤ Einbringen von Mg-Depots**

stellt nach Abwägen aller Aspekte und Ungewissheiten die Maßnahme mit dem größten Sicherheitsgewinn dar. Durch Einbringen von Mg-Depots wird das Puffervermögen für gelöstes CO<sub>2</sub> erhöht und das chemische Milieu langfristig im neutralen bis schwach alkalischen pH-Bereich stabilisiert. Die Prognose ist sowohl für die langzeitige Entwicklung des chemischen Milieus als auch für die Konzentration relevanter Radionuklide und chemotoxischer Stoffe gesichert. Die gebirgsmechanische Stützwirkung der Mg-Baustoffe ist langfristig wirksamer als die der Ca-Baustoffe und die chemische Langzeitstabilität der Strömungsbarrieren ist nicht beeinträchtigt.

Durch Zugabe von Ca-Depot kann sich ein Ca-betontes, stark alkalisches Milieu einstellen, für das der radiologische Sicherheitsgewinn geringer und die Prognosesicherheit weniger robust sind. Die Ca-Depots stellen jedoch einen alternativen Versatzstoff dar.

Eine weitere deutliche Reduzierung des durch Konvergenz beeinflussten Porenvolumens wird durch das zusätzliche Einbringen von Sorelbeton erreicht. Dadurch wird die Menge relevanter Radionuklide, die in Lösung gehen können, pro Zeiteinheit verringert.

### **6.2.3 Generelle Anforderungen an die Mg-Depots**

Die hinreichende Beeinflussung des geochemischen Milieus und langfristige Stabilisierung der neutralen bis alkalischen Milieubedingungen in den Einlagerungskammern werden erreicht, wenn folgende generelle Anforderungen erfüllt werden:

- Ausreichende Menge an Mg-Depot in die Einlagerungskammern
- Kontakt des Mg-Depots mit der Lösung
- Ausreichende Verweilzeit der Lösung beim Kontakt mit Mg-Depot

Die notwendigen Mengen an Mg-Depot werden anhand des anorganischen Kohlenstoffs, der durch mikrobielle Umsetzung des organischen Materials in den Abfällen entstehen kann, berechnet. Dabei wird angenommen, dass der umgesetzte anorganische Kohlenstoff vollständig als CO<sub>2</sub> in der Lösung vorliegt. Bei einer vollständigen Verfüllung der unverfüllten

Hohlräume in den Einlagerungskammern und/oder der Injektion von Mg-Depot in die Porenräume wird das verfügbare Lösungsvolumen reduziert und CO<sub>2</sub> quantitativ ausgefällt. Letzteres trifft z. B. für die Einlagerungskammern 8/750 und 10/750 zu, in denen keine unverfüllten Hohlräume, jedoch hohe integrale Porositäten vorliegen.

Ein hinreichender Kontakt des Mg-Depots mit der Lösung wird entweder durch eine große spezifische Oberfläche oder dessen Durchströmbarkeit gewährleistet. Die Verweilzeit der Lösung im Kontakt mit dem Mg-Depot ist ausreichend, da diese um ein Vielfaches höher als der Zeitraum für die Umsetzung der reaktiven (das Milieu beeinflussenden) Kammerinhaltsstoffe Eisen, Zement und Mg-Depot ist. Dies wird durch Begrenzung der Lösungsbewegung im Porenvolumen der Einlagerungskammern gewährleistet (vgl. Kapitel 6.3).

Die chemische Wirksamkeit als Mg-Depot ist für unterschiedliche Baustoffe sowohl auf Basis von Brucit (Magnesiumhydroxid) als auch auf Basis von Sorelphasen (Magnesiumoxychlorid) nachgewiesen. Diese Baustoffe weisen eine hohe spezifische Oberfläche auf.

#### **6.2.4 Grundsätzliche technische Machbarkeit**

Die grundsätzliche technische Machbarkeit des Einbringens eines fließfähigen Baustoffes auf Basis von Brucit und MgO in Hohlräume bzw. die Injektion in die Konturbereiche der Einlagerungskammern ist gegeben und entspricht dem Stand der Technik.

Die in eine Einlagerungskammer eingebrachte Menge wird bei der technischen Ausführung ermittelt und mit der geforderten Menge verglichen. Anschließend wird ein Funktionsnachweis für die erreichte Verfüllung geführt.

### **6.3 Maßnahmen zur Begrenzung und Lenkung der Lösungsbewegung**

Da die Mobilisierung von Schadstoffen nicht zu verhindern ist, sollen Lösungsbewegungen im Grubengebäude – insbesondere in den und nahe den Einlagerungskammern – begrenzt und behindert sowie nicht zu vermeidende Lösungsbewegungen gelenkt werden. Dieses verringert und verzögert den Transport von Schadstoffen aus den Einlagerungskammern heraus, da der Transport überwiegend an Lösungsbewegungen im Grubengebäude gebunden ist.

Antreibende Prozesse für Lösungsbewegungen sind die

- Konvergenz der Grubenbaue,
- Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung,
- Konvektion durch Unterschiede der Lösungsdichte und
- Druckdifferenzen zwischen verschiedenen Grubenbereichen.

Die Maßnahmen zur Stabilisierung des Tragsystems wirken der Konvergenz entgegen und begrenzen somit die Lösungsbewegungen. Die Verfüllung der noch unverfüllten Resthohlräume (siehe Kapitel 6.4.3) reduziert die integrale Porosität und damit die Konvergenz sowie die Gasspeicherräume. Damit werden ebenfalls die Lösungsbewegungen begrenzt.

Dichtebedingte Konvektionsbewegungen werden durch die chemische Zusammensetzung und die Dichte des Schutzfluids minimiert (siehe Kapitel 6.4.4).

Da die antreibenden Prozesse nur behindert aber nicht verhindert werden können, müssen die unvermeidlichen Lösungsbewegungen gelenkt sowie die Druckdifferenzen zwischen verschiedenen Grubenbereichen vermindert werden. Die technischen Maßnahmen hierfür werden im folgenden Kapitel diskutiert.

### **6.3.1 Potenzielle Maßnahmen**

Das Ziel dieser Maßnahmen ist zum einen die deutliche *Begrenzung der Lösungsflüsse im Nahbereich der Einlagerungskammern*, die durch Konvergenz, Gasspeicherung und Konvektion ausgelöst werden. Dadurch wird sowohl der Lösungsaustausch im Porenraum der Einlagerungskammern herabgesetzt als auch die Lösungsbewegung in deren Nahbereich deutlich reduziert.

Da die Lösungsbewegungen nur teilweise begrenzt werden können, sollen unvermeidliche Lösungsflüsse auch gelenkt werden. Durch die Lenkungsfunktion wird Lösung aus tieferen oder benachbarten Grubenbereichen weitgehend an den Einlagerungskammern vorbei gelenkt und langfristig stabile Fließwege für die Lösung erzwungen. Die Begrenzung und *Lenkung der Lösungsflüsse im Nahbereich der Einlagerungskammern* bewirkt zugleich eine Verringerung der Mobilisierung und eine Verzögerung des Transports von Radionukliden und chemischen Stoffen.

#### *Begrenzung der Lösungsflüsse (Strömungsbarrieren)*

Die Begrenzung der Lösungsbewegung wird durch erhöhte Strömungswiderstände in den hydraulischen Wegsamkeiten erreicht, die Lenkung der Lösungsbewegung durch das Schaffen von Kontrasten zwischen den hydraulischen Widerständen in Wegsamkeiten. Durch den Einbau von hohen Strömungswiderständen werden deutliche Kontraste zu hoch durchlässigen Wegsamkeiten geschaffen, wodurch Lösungsflüsse über bevorzugte Wegsamkeiten (Transportpfade) gelenkt und stabile Strömungs- und Transportmuster in der Nachbetriebsphase erzeugt werden. Die geeigneten technischen Maßnahmen dafür sind der Einbau von Strömungsbarrieren sowie die Verfüllung von ausgewählten Grubenbauen mit Schotter.

Da die Einlagerungskammern durch eine große Anzahl von Auffahrungen und Bohrungen miteinander und mit angrenzenden Grubenbauen verbunden sind, ergeben sich ohne den Einbau von Strömungsbarrieren eine Vielzahl von Transportpfaden aus den Einlagerungskammern. Um die Anzahl der möglichen Transportpfade zu verringern und gesicherte Prognosen für die Strömungs- und Transportmuster zu gewährleisten, müssen Auffahrungen und Bohrungen durch geotechnische Bauwerke – Strömungsbarrieren – abgedichtet werden.

Bauwerke aus Sorelbeton wurden im Salzbergbau schon seit mehr als 100 Jahren gebaut, um Grubenbereiche vor dem Zufluss von Salzlösungen zu schützen bzw. die Zuflüsse auf ein beherrschbares Maß zu reduzieren. Diese Erfahrungen und neue Forschungen hierzu wurden systematisch ausgewertet, um ein standortspezifisch geeignetes Konzept für die

Strömungsbarrieren zu entwickeln. Grundlegende standortspezifische Vorgaben für die Konzeptplanung waren:

- Für eine sichere Schließung der Anlage ist der Einbau von etwa 65 Strömungsbarrieren notwendig. Die hydraulischen Beanspruchungen und die gebirgsmechanische Situation variieren an den Einbauorten deutlich. Daher sind spezifische Ausführungsplanungen erforderlich.
- Aufgrund der hohen Konvergenzraten ändern sich die Spannungsverhältnisse. Messungen zur Erkundung der Einbauorte – wie bei einer Baugrunduntersuchung – müssen zeitnah zur Bauausführung erfolgen.
- Der Baukörper muss aus einem Baustoff bestehen, der hinreichend dicht, mechanisch stabil und chemisch langzeitbeständig ist.
- Das Salzgestein im Bereich der geplanten Einbauorte ist aufgelockert. Die Auflockerungszone beeinflusst den Strömungswiderstand der Strömungsbarriere entscheidend. Sie wird entfernt oder mittels Injektionen vergütet.
- Die Funktionalität der Strömungsbarriere für die zu erwartenden hydraulischen Beanspruchungen bei der Einleitung des Schutzfluids muss vor der Schutzfluid-einleitung belegt werden.

Mit diesen Vorgaben wurde ein technisches Konzept für den Bau der Strömungsbarrieren entwickelt und zugelassen. Die wesentlichen Elemente sind:

- Der Baustoff ist Sorelbeton, der aus Salzgrus, Magnesiumoxid und  $MgCl_2$ -Lösung besteht. Es gibt speziell entwickelte Rezepturen. Das Volumen des nicht eingespannten Betons nimmt beim Abbinden zu. Da der Beton eingespannt wird, können sich nach dem Betonieren keine Risse bilden, die zu Undichtigkeiten im Betonkörper führen. Auch die Kontaktzone zum Gebirge bleibt eingespannt.
- Die Kernbarriere soll den Strömungswiderstand aufweisen, der zur Beeinflussung der Lösungsbewegung erforderlich ist. Um die Funktionalität der Strömungsbarriere in der Bauphase und der Nachbetriebsphase sicherzustellen, wird die Kernbarriere beidseitig von Widerlagern eingespannt (Abb. 6.1).
- Die Widerlager sollen während des Betonierprozesses eine hinreichende Einspannung der Kernbarriere gewährleisten, damit die Volumenzunahme während des Abbindens des Sorelbetons der Kernbarriere in den Form- und Kraftschluss an der Kontur des Einbauortes umgesetzt wird. Außerdem stellen die Widerlager eine langfristig triaxiale Einspannung der Kernbarriere sicher, um Schädigungen durch gebirgsmechanische Beanspruchung zu verhindern.

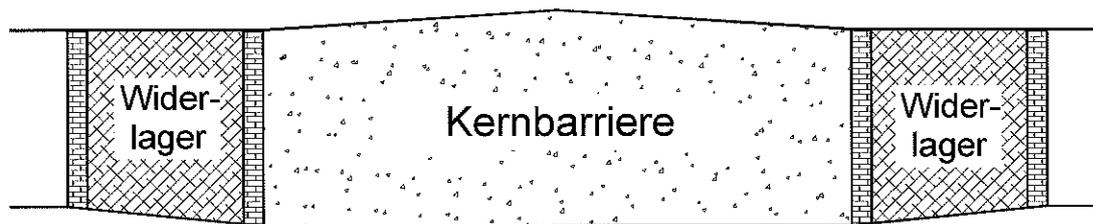


Abb. 6.1: Prinzipieller Aufbau einer Strömungsbarriere

Die Strömungsbarrieren sind durch stützenden Versatz in den angrenzenden Auffahrungen umgeben. Der stützende Versatz hat die Aufgabe, das Gestein eines Grubenbereiches bzw. Einbauortes gebirgsmechanisch zu stabilisieren, um Umläufigkeiten der Kernbarriere auszuschließen. Des Weiteren behindert der stützende Versatz Umlösungen am Carnallit, da sowohl die Anströmgeschwindigkeit als auch die Anströmfläche an der Kontur limitiert wird. Stützender Versatz wird durch den Einbau von Sorelbeton oder Injektionen bereits versetzter Grubenbaue mit Sorelmörtel erstellt.

Für die Dimensionierung einer Strömungsbarriere sind spezielle Modellrechnungen erforderlich, um unter Berücksichtigung der relevanten und spezifischen Standortbedingungen die Funktionalität nachzuweisen.

#### Lenkung der Lösungsflüsse durch Verfüllung mit Schotter

Die bereits durch Einbau von Strömungsbarrieren erreichte Lenkung der Lösungsflüsse kann durch unterschiedliche Strömungswiderstände verstärkt werden. Dabei ist der Kontrast der Strömungswiderstände zwischen den durch Strömungsbarrieren abgedichteten Auffahrungen und alternativen Wegsamkeiten, wie nicht abgedichtete Auffahrungen oder aufgelockerte Gebirgsbereiche, entscheidend. Zumeist stellt eine Verfüllung mit Salzgrus einen ausreichenden Kontrast der Strömungswiderstände sicher. In einigen Auffahrungen ist der Einbau von Versatzstoffen mit noch höherer Durchlässigkeit als Salzgrus zielführend. Hierfür sind Schotter und Splitte geeignet.

Hoch durchlässige Verfüllungen mit Schotter bewirken zudem eine langzeitstabile Druckentlastung in angeschlossenen Grubenbauen und reduzieren die Druckdifferenzen zwischen diesen Grubenbereichen – wie z. B. eine stabile Druckentlastung des Tiefenaufschlusses und die Lenkung der aus dem Tiefenaufschluss verdrängten Lösungen über den westlichen Blindschacht in das westliche Carnallitbaufeld.

#### Anordnung von Strömungsbarrieren und Schotter

Um die Lenkung der Lösungsflüsse im Nahbereich der Einlagerungskammern langfristig zu gewährleisten, ist eine geeignete Anordnung der Strömungsbarrieren (hohe Widerstände) und der mit Schotter oder Salzgrus versetzten Strecken (niedrige Widerstände) notwendig. Bei der Ermittlung der geeigneten Anordnung im Nahbereich der Einlagerungskammern waren die hohe Durchbauung und die lange Standzeit der Grubenbaue zu berücksichtigen.

Die Einlagerungskammern sind vielfach miteinander und mit angrenzenden Abbauen verbunden, einerseits durch Strecken und Durchhiebe im Sohlen- und Firstniveau, andererseits durch Auflockerungszonen in den angrenzenden Pfeilern und Schweben (vgl. Abbildungen 2.3 und 2.4). Die hydraulische Kapselung einer einzelnen Einlagerungskammer ist daher nicht möglich. Es können jedoch Grubenbereiche mit mehreren Einlagerungskammern und Abbauen gegeneinander und vom übrigen Grubengebäude hydraulisch durch Strömungsbarrieren getrennt werden – so genannte Einlagerungsbereiche. Eine Kapselung ist auch für die Einlagerungsbereiche nicht möglich. Weitere Aspekte für die Ermittlung der Anordnung waren

- die gebirgsmechanische Situation an den möglichen Einbauorten,
- die Möglichkeit einer sicheren bergmännischen Auffahrung der Einbauorte,
- der betriebliche Strahlenschutz beim (späteren) Einbau der Bauwerke sowie
- die Eigenschaften der Abfallgebinde in den zu Bereichen zusammengefassten Einlagerungskammern und
- die chemischen Milieubedingungen in den zu Bereichen zusammengefassten Einlagerungskammern.

Daraufhin erfolgte eine grundsätzliche gebirgsmechanische Beurteilung der gewählten Einbauorte auf Basis der gebirgsmechanischen Situation und einer einfachen Konzeptplanung. Weiterhin wurde eine Pilotströmungsbarriere aus Sorelbeton der Rezeptur 29.6 A2 – die so genannte PSB A2 – errichtet und mit einem umfangreichen geotechnischen Messprogramm die Spannungsentwicklungen sowie die integrale Durchlässigkeit der Strömungsbarriere, bestehend aus Baukörper und Auflockerungszone, erfasst. Hierzu wurde die PSB A2 über ca. zwei Jahre einseitig mit einem Fluidruck beaufschlagt. Mit dem Untersuchungsprogramm wurde die grundsätzliche technische Machbarkeit demonstriert.

Auf Grundlage der Standorterkundungen, der Untersuchungsergebnisse an der PSB A2 und von Strömungsmodellierungen wurde eine prinzipielle Anordnung von Strömungsbarrieren und mit Schotter verfüllten Strecken ermittelt, die den Lösungsaustausch in Einlagerungskammern und die Lösungsbewegung im Nahbereich deutlich reduziert. Bei der prinzipiellen Anordnung werden die Einlagerungskammern auf der 750-m- und der 725-m-Sohle zu fünf Einlagerungsbereichen zusammengefasst, die gegeneinander und vom übrigen Grubengebäude hydraulisch getrennt sind (Tabelle 6.3). Die MAW-Kammer bildet einen weiteren Einlagerungsbereich.

Tab. 6.3: Grubenbaue der LAW-Einlagerungsbereiche auf der 750-m- und 725-m-Sohle

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

### 6.3.2 Alternative technische Konzepte

Während der mehrjährigen Entwicklung des standortspezifischen Konzepts für die Strömungsbarrieren (Konzeptplanung) wurde die Entwicklung des nationalen und internationalen Kenntnisstandes beobachtet und auf ihre Anwendbarkeit in der Schachanlage Asse überprüft. Es zeigte sich jedoch, dass alternative Konzepte für die Standortbedingungen ungeeignet sind. Die wesentlichen Aspekte hierfür sind in Folge genannt.

- *Geometrie der Strömungsbarriere*

In der Schachanlage Asse sind die Einbauorte von Strömungsbarrieren durch großräumige Auflockerungszonen gekennzeichnet. Unter diesen Bedingungen ist eine komplizierte geometrische Form der Strömungsbarrieren – wie z. B. im Forschungsprojekt auf Schacht „Glückauf“ Sondershausen untersucht – nicht geeignet, einen bautechnischen Nachweis für die Einhaltung der hydraulischen Anforderungen sicher zu führen.

- *Strömungsbarriere ohne Widerlager*

Technische Konzepte, bei denen die hydraulisch relevanten Baukörper ohne ausreichend dimensionierte Widerlager eingebaut werden – wie im Forschungsprojekt Carla auf Schacht Teutschenthal getestet – sind für die Schachanlage Asse ungeeignet. Ohne hinreichende triaxiale Einspannung der Baukörper können die Quelldrücke, die beim Abbindeprozess von Sorelbeton entstehen, nicht ohne deutliche axiale Deformation des Baukörpers abgetragen werden. Daher können für diese technischen Konzepte keine Rissfreiheit für die Kontaktzone zum Salzgestein belegt und auch keine Langzeitstabilität des Baukörpers nachgewiesen werden.

- *Selbsterhärtender bzw. Selbstheilender Versatz*

Spezielle Mineralgemische aus Kalisalzen, die in Auffahrungen versetzt sind, lassen bei Kontakt der Kalisalzminerale mit Salzlösungen Kristallisationsprozesse einsetzen und der Versatz wird „von selbst“ aushärten. Infolge der Kristallisation mit einer Volumenzunahme und der mit der Zeit auflaufenden Konvergenz werden die Kristallisationsdrücke im Versatz schrittweise erhöht und die Auffahrung wird hydraulisch dicht, sie „verheilt“.

In der Schachanlage Asse II ist die Funktionalität einer Strömungsbarriere, einschließlich Auflockerungszone, mit diesem Konzept nicht nachzuweisen. Die Dichtigkeit bzw. der

Strömungswiderstand des selbsterhärtenden bzw. selbstheilenden Versatzes kann erst lange Zeit nach dem Lösungskontakt prognostiziert werden. Daher kann vor dem Einleiten des Schutzfluids weder ein hinreichend dichter Einbauzustand gewährleistet noch ein hinreichender Strömungswiderstand nachgewiesen werden. Erstens werden die Spannungsverhältnisse, insbesondere in der Kontaktzone, völlig unzureichend sein und zweitens werden beim Einleiten des Schutzfluids die Auflockerungen an der Kontur fortschreiten. Da bei diesen Bedingungen kein Funktionsnachweis für eine Strömungsbarriere erbracht werden kann, stellt das technische Konzept keine Alternative dar.

- *Alternative Baustoffe*

Aufgrund der geochemischen und geotechnischen Bedingungen ergeben sich grundsätzlich keine Alternativen zum Sorelbeton. Es besteht ausschließlich die Möglichkeit, die Rezeptur des Baustoffes zu optimieren. Bei der Auswertung der Untersuchungen an der PSB A2 wurden Erfahrungen aus anderen Forschungsprojekten, wie z. B. aus dem Forschungsprojekt Carla, berücksichtigt. Im Ergebnis erwies sich eine höhere Steifigkeit des Baustoffes hinsichtlich des qualitätsgerechten Einbaus und der Nachweisführung als zielführend. Mit der Rezeptur A1 wurden weitere Bauwerke in der Schachtanlage Asse erstellt. Hierdurch sowie durch Materialuntersuchungen wurde die Eignung des Sorelbetons A1 nachgewiesen. Dies umfasst auch

- die höhere Steifigkeit der Rezeptur A1 gegenüber der Rezeptur 29.6 A2,
- die ausreichende Dichtigkeit des Baustoffes und der Kontaktzone im Steinsalz und im Carnallitit,
- die Setzungsstabilität des Sorelbetons bei der Verfüllung vertikaler Auffahrungen und
- die ausreichende dichte Verfüllung von Bohrungen mit unterschiedlichem Durchmesser.

### **6.3.3 Auswahl der Maßnahmen zur Begrenzung der Lösungsbewegung**

Das Ziel einer deutlichen Begrenzung und langfristig stabilen Lenkung der Lösungsflüsse im Nahbereich der Einlagerungskammern erfordert den

- **Einbau von Strömungsbarrieren und stützendem Versatz** sowie den
- **Einbau von Schotter in ausgewählten Grubenbauen.**

Die prinzipielle Anordnung von Strömungsbarrieren und Schotter erfüllt die gewünschte Begrenzungs- und Lenkungsfunktion im Nahbereich der Einlagerungskammern und gewährleistet langfristig stabile Transportpfade für die aus den Einlagerungskammern austretenden Lösungen. Diese Anordnung ist nicht alternativlos. Bei ungünstigen Bedingungen können Verschiebungen der Einbauorte (Ersatzstandorte) oder Ausgleichsmaßnahmen erforderlich sein. In solchen Fällen wird belegt, dass eine Änderung keine negative Auswirkung auf die Funktionalität der Strömungsbarrieren insgesamt hat.

Die prinzipielle Anordnung gewährleistet die Reduzierung des Lösungsaustausches in den Einlagerungskammern und die Herausbildung von bevorzugten Transportpfaden in der

Nachbetriebsphase. Die mit Schotter verfüllten Grubenbaue unterstützen die Lenkungs-funktion, bewirken zusätzlich eine langzeitstabile Druckentlastung im Tiefenaufschluss und im Nahbereich der Einlagerungskammern und vermindern somit hohe und variierende Druckdifferenzen zwischen benachbarten Grubenbereichen.

Die prinzipielle Anordnung der technischen Bauwerke unter Berücksichtigung der aktuellen Ausführungsplanung ist in den Anlagen 1 bis 9 sohlenspezifisch dokumentiert. Im Zuge der detaillierten Standorterkundung der Einbauorte und der Ausführungsplanung können die Dimensionierung der Bauwerke, d. h. die wirksamen Längen und Fließquerschnitte, den Standortgegebenheiten angepasst bzw. präzisiert werden. Bei der Ausführungsplanung wird im Bereich der Kernbarrieren ein Sollprofil für den Nachschnitt der Auflockerungszone ermittelt oder die durch Injektionen zu vergütende Auflockerungszone bestimmt.

Änderungen der ursprünglich geplanten Dimensionierung bzw. der prinzipiellen Anordnung werden hinsichtlich der Auswirkungen auf die radiologische Sicherheit überprüft und die Kompatibilität zum Langzeitsicherheitsnachweis gezeigt.

#### **6.3.4 Generelle Anforderungen**

##### Strömungsbarrieren

Um eine hinreichende Begrenzung und langzeitstabile Lenkung der Lösungsflüsse im Nahbereich der Einlagerungskammern zu erreichen, werden an die Strömungsbarrieren generelle Anforderungen gestellt. Diese sind:

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

Um eine signifikante und robuste Beeinflussung der Lösungsbewegungen zu gewährleisten, muss die integrale Permeabilität der Kernbarrieren in der vorgesehenen Dimensionierung deutlich geringer sein als in der ursprünglichen Auffahrung oder in parallelen hydraulischen Wegsamkeiten. Die integrale Permeabilität berücksichtigt die Kernbarriere, die Kontaktzone mit dem anstehenden Gestein sowie die die Kernbarriere umgebende und beim Nachschnitt nicht entfernte Auflockerungszone. Die Begrenzungs- und Lenkungs-funktion wird durch die prinzipielle Anordnung hinreichend gewährleistet, wenn für die horizontalen Einbauorte eine integrale Permeabilität von in der Regel  $5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  erreicht wird. Bei vertikalen Einbauorten beträgt die Mindestanforderung in der Regel  $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$ . Die Anforderung an die integrale Permeabilität der Strömungsbarrieren im Nahbereich der MAW-Kammer wird auf  $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  beziffert.

Bei der Auslegung der Strömungsbarriere wird der technische Zielparameter für den hydraulischen Widerstand in der Regel vorsorglich um eine Größenordnung höher als die Mindestanforderung festgesetzt. Der hydraulische Widerstand des Einbauzustandes einer Kernbarriere wird durch gebirgsmechanische Auslegungsrechnungen und den bautechnischen Nachweis belegt. Das erfolgt mittels Modellrechnungen, durch baubegleitende

Maßnahmen zur Qualitätssicherung und - wenn es der bautechnische Nachweis erfordert – mit Permeabilitätsmessungen oder Prüfdruckinjektionen.

In der Nachbetriebsphase wird aufgrund der Konvergenz die Permeabilität in der Kontaktzone zwischen Kernbarriere und Gestein sowie in der Auflockerungszone abnehmen und der integrale Widerstand der Strömungsbarriere dadurch zunehmen. Diese Entwicklung wurde durch Messungen an der PSB A2 belegt. Höhere Widerstände haben keine nachteiligen Auswirkungen.

Signifikante hydraulische Beanspruchungen der Strömungsbarriere durch Druckdifferenzen ergeben sich in der Einleitphase des Schutzfluids durch unterschiedliche Lösungspegel und Lösungsdrücke infolge Volumenkonvergenz und Gasbildung in durch Strömungsbarrieren getrennten Grubenbereichen. Die Lagestabilität der Strömungsbarriere wird durch die Widerlager sichergestellt. Nach dem Verschluss der Tagesschächte und der Ankopplung an den hydrostatischen Druck im Deckgebirge nehmen die hydraulischen Druckdifferenzen schnell auf sehr geringe Werte ab.

Sorelbeton oder Sorelmörtel sind im Kontakt mit  $MgCl_2$ -reicher Lösung chemisch langzeitbeständig.

#### Stützender Versatz

Um die Kontur eines Grubenbaues zu stabilisieren und somit das umgebende Gestein zu stützen, müssen folgende generelle Anforderungen erfüllt werden:

- die mechanische Festigkeit bzw. geringe Kompaktierbarkeit des Versatzkörpers und
- die chemische Langzeitstabilität der Baustoffe.

Eine vernachlässigbar geringe Kompaktierbarkeit des stützenden Versatzes wird durch zwei Eigenschaften des Baustoffs gewährleistet: erstens die Volumenzunahme während des Abbindens und zweitens die hohe Steifigkeit der Sorelbetonrezeptur A1.

Durch den stützenden Versatz wird die integrale Permeabilität in einer Auffahrung deutlich geringer sein als ursprünglich. Dies bewirkt eine zusätzliche Begrenzung der Lösungsbe-  
wegung und des Stofftransports. Einige der Einbauorte unterstützen somit die Wirkung der Strömungsbarrieren und ergeben einen Sicherheitsgewinn. Um diesen berücksichtigen zu können, werden an einzelne Einbauorte von stützendem Versatz zusätzlich hydraulische Anforderungen hinsichtlich

- der integralen Permeabilität eines Einbauortes, einschließlich des umgebenden aufgelockerten Gesteins (bzw. des hydraulischen Widerstandes), gestellt.

Die zusätzliche Begrenzungsfunktion wird hinreichend gewährleistet, wenn für die wenigen Einbauorte eine integrale Permeabilität von in der Regel  $1 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  erreicht wird.

#### Schotter

Um die Lenkung der Lösungsflüsse zu unterstützen und die Druckentlastung langfristig zu gewährleisten, werden an die Verfüllung mit Schotter generelle Anforderungen gestellt, wie

- die Einbaudichte und
- die Beständigkeit.

Die Funktionalität ist langfristig gewährleistet, wenn die Einbaudichte in den Grubenbauen  $1,8 \text{ t/m}^3$  überschreitet und damit die Kompaktierbarkeit des Schotters vernachlässigbar gering ist. Das Eindringen von Salz in den Porenraum des Schotters bzw. die Rekristallisation von Salz aus der Lösung im Porenraum und eine damit verbundene stetige, jedoch geringe Zunahme des Strömungswiderstandes gefährdet die Funktionalität nicht.

Als solche Schotter sind z. B. Magnesit und Brucit-Splitt geeignet.

### **6.3.5 Maßnahmen in der MAW-Kammer**

In der MAW-Kammer sind mehr als 90 % des Ausbruchvolumens noch nicht verfüllt (siehe Tabelle 6.2). Die Abfallgebilde liegen in Form eines Schüttkegels in der Mitte der Einlagerungskammer und haben keinen Kontakt zu einem der Kammerstöße.

Die geplante Verfüllung der MAW-Kammer ist in der Abbildung 6.2 skizziert. Nach dem Einbringen einer ca. 4 m hohen Schicht aus Sorelbeton um den Abfallkegel wird dieser mit Mg-Depot bedeckt. Der noch verbleibende Hohlraum wird danach vollständig mit Sorelbeton in Form einer „Sorelbetonglocke“ über den Abfällen verfüllt. Dadurch werden die Kontur der Einlagerungskammer und die Pfeiler und Schweben gebirgsmechanisch stabilisiert. Konvergenzaktive und fluidzugängliche Porenvolumina in der Einlagerungskammer werden um ein Vielfaches reduziert. Das Ziel der Stabilisierung ist der Erhalt der sehr geringen integralen Durchlässigkeit der Pfeiler und der Schweben zur 490-m-Sohle, die im Kern hydraulisch dicht sind.

Somit werden die Abfallgebilde mit Sorelbeton umgeben sein. Da aber ein Vordringen von Schutzfluid an die Abfälle nicht gänzlich auszuschließen ist, wird für diesen Fall durch das Mg-Depot vorsorglich ein schwach alkalisches Milieu eingestellt.

Die Beschickungsbohrlöcher in der Firste der MAW-Kammer und die Beschickungskammer, einschließlich der Zugangsstrecken auf der 490-m-Sohle, werden mit stützendem Versatz aus Sorelbeton verfüllt.

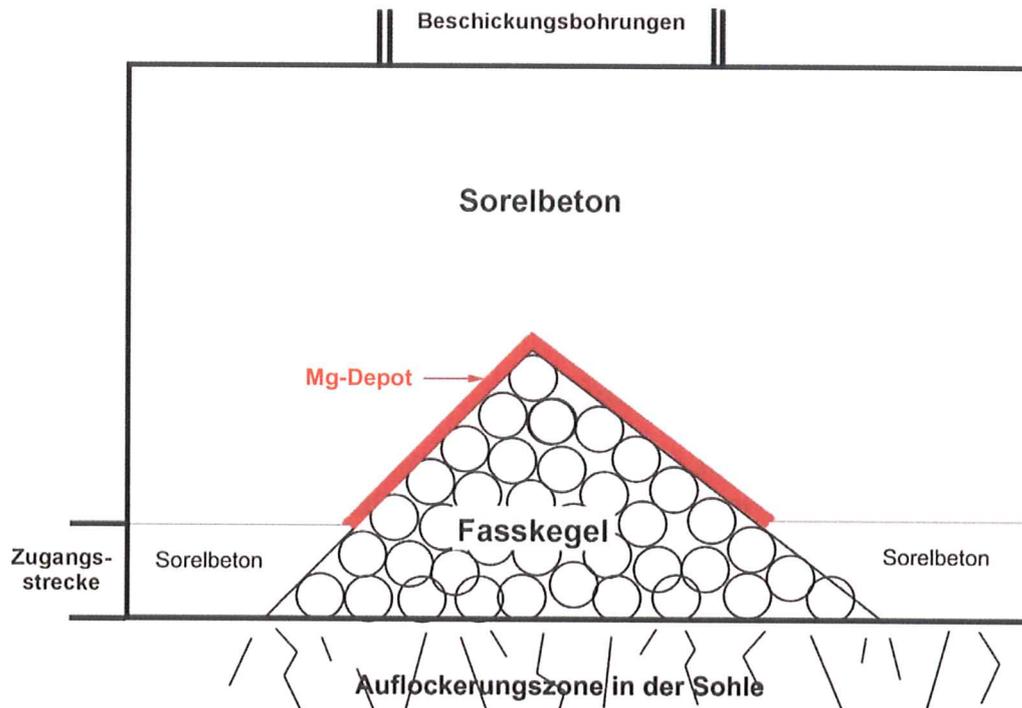


Abb. 6.2: Schematische Darstellung der geplanten Verfüllung der MAW-Kammer

### 6.3.6 Technische Machbarkeit

Die technische Machbarkeit des Einbaus von Strömungsbarrieren wurde anhand des Baus von Pilotströmungsbarrieren demonstriert. Die generellen Anforderungen wurden dabei erfüllt. Im Bereich der 775-m-Sohle wurden bereits Strömungsbarrieren an geplanten Standorten anforderungsgerecht eingebaut.

Die hydraulischen Beanspruchungen und die gebirgsmechanische Situation variieren an den Einbauorten deutlich. Daher sind geotechnische Messungen zur Standorterkundung und spezifische Ausführungsplanungen erforderlich. Aufgrund der hohen Konvergenzraten verändern sich die Spannungsverhältnisse permanent. Die geotechnischen Messungen müssen daher zeitnah zur Bauausführung erfolgen.

Der Einbau von stützendem Versatz aus Sorelbeton in Grubenhohlräume ist Stand der Technik und wird im Kali- und Steinsalzbergbau zur Verfüllung von Hohlräumen erfolgreich angewendet. Auf der 800-m- und 750-m-Sohle wurden bereits große Hohlräume mit Sorelbeton anforderungsgerecht verfüllt.

Der Einbau von Schotter in Grubenhohlräume ist Stand der Technik und wurde in vielen Bergwerken – insbesondere zur Verfüllung von Schächten – angewendet.

## 6.4 Maßnahmen zur Begrenzung des Austritts von Lösungen und Schadstoffen in das Deckgebirge

Da die Ausbreitung von Schadstoffen im Grubengebäude nicht gänzlich zu verhindern ist, soll der Austritt von Lösungen und Schadstoffen in das Deckgebirge begrenzt werden. Je geringer die Rate des Lösungsaustritts ist, umso niedriger ist auch die Austrittsrate von gelösten Schadstoffen in das Deckgebirge. Antreibende Prozesse für Lösungsflüsse und damit für die Rate des Lösungsaustritts aus dem Grubengebäude sind die Konvergenz der Grubenbaue und die Lösungsverdrängung durch Gasspeicherung.

Die Rate des Lösungsaustritts aus dem Grubengebäude kann begrenzt werden, wenn die antreibenden Prozesse behindert werden. Dies verringert und verzögert auch den Austritt von Schadstoffen aus dem Grubengebäude und den Transport im Deckgebirge, da diese an Lösungsflüsse gebunden sind. Die bereits genannten Maßnahmen zur Stabilisierung des Tragsystems und zur Verfüllung von Hohlräumen begrenzen ebenfalls die Rate des Lösungsaustritts in das Deckgebirge, insbesondere in der frühen Nachbetriebsphase.

Die Rate des Lösungsaustritts ins Deckgebirge wird also auch durch den Verfüllgrad des Grubengebäudes bestimmt. Die Verfüllung von Hohlräumen begrenzt die Konvergenz und damit die Austrittsrate. Zusätzlich können so die Gasspeicherräume verringert werden.

### 6.4.1 Potenzielle Maßnahmen

Ein Ziel der Maßnahmen ist die zusätzliche Begrenzung des Lösungsaustritts in das Deckgebirge durch das Verfüllen noch unverfüllter Resthohlräume. Ein weiteres Ziel ist die Reduzierung von großräumigen Konvektionsbewegungen durch das Einbringen von Schutzfluid.

#### Resthohlraumverfüllung

Die Verfüllung noch unverfüllter Resthohlräume wird mit Versatzstoffen erfolgen, die sich im Kontakt mit Schutzfluid chemisch inert verhalten, damit sich die Lösungszusammensetzung bzw. Dichte des Schutzfluids nicht relevant ändert. Potenzielle Versatzstoffe sind Salzgrus, Sorelbeton sowie spezielle Hartgesteinsschotter und -splitte. Die Versatzstoffe weisen unterschiedliche Eigenschaften bezüglich der Kompaktierung auf, woraus sich deren Einsatz für die Resthohlraumverfüllung ableitet. Die Hohlraumverfüllung im Grubengebäude ist bereits weit fortgeschritten (vgl. Kapitel 2.3.1).

- *Salzgrus*

Versatzkörper aus Salzgrus bestehen vor allem aus Steinsalzkörnern. Je nach dem Zeitraum seit dem Einbau und der verwendeten Einbringtechnik variiert die Einbauporosität zwischen 19 % und 45 %. Salzgrus wird durch Konvergenz kompaktiert. Mit abnehmender Porosität wächst der Widerstand, welcher der Konvergenz entgegen wirkt. Durch Konvergenz wird Lösung aus dem Porenraum verdrängt und Lösungsflüsse hervorgerufen. Die Rate des Lösungsaustritts aus dem Grubengebäude wird durch die Nachverfüllung mit Salzgrus zwar reduziert, jedoch ist in der frühen Nachbetriebsphase der Versatzwiderstand wegen der

relativ hohen Porosität noch gering. Salzgrus verhält sich im Kontakt mit Schutzfluid weitgehend inert.

- *Sorelbeton*

Versatzkörper aus Sorelbeton werden durch Konvergenz nicht oder nur im geringen Ausmaß kompaktiert. Infolge dessen werden keine oder nur sehr geringe Lösungsmengen aus dem Porenraum verdrängt. Die Rate des Lösungsaustritts aus dem Grubengebäude wird durch die Verfüllung mit Sorelbeton verringert, da die Volumenkonvergenz durch die hohe Stützwirkung von Sorelbeton abnimmt.

- *Hartgesteinsschotter*

Versatzkörper aus Schotter werden bei ausreichend hoher Einbaudichte durch Konvergenz nicht oder nur im geringen Maß kompaktiert. Infolge dessen werden hierdurch keine oder nur sehr geringe Lösungsmengen aus dem Porenraum verdrängt.

#### Konvektionsbegrenzung

Die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids liegt im Mittel nahe der einer R-Lösung (siehe Tabelle 6.1). Großräumige Konvektionsbewegungen im Grubengebäude können ausgeschlossen werden, wenn im Grubengebäude die Dichte des Schutzfluids mit der Teufe nicht abnimmt. Spezifische Anforderungen an die Lösungsdichte in verschiedenen Teufenbereichen sind in Kapitel 6.4.4 dargelegt.

Zusätzlich müssen im Carnallitit aufgefahrene Strecken im oberen Baufeld in der Südflanke mit Sorelbeton verfüllt werden, um das Anströmen von Schutzfluid an den Carnallitit zu behindern. Der Grund hierfür ist die unumgängliche technische Bandbreite der chemischen Zusammensetzung des Schutzfluids und die lokal gering unterschiedliche Ausbildung des Carnallitits. Um geringfügige Umlösungen zu minimieren, werden die Abbaubegleitstrecken, die Wendelstrecke (Kapitel 6.4.3) und die Tagesschächte vorsorglich mit Sorelbeton ohne hydraulische Anforderungen verfüllt.

Die alternative Maßnahme, um großräumige Konvektionsbewegungen zu verhindern, wäre der Einbau von Strömungsbarrieren in den Abbaubegleitstrecken und in der Wendelstrecke. D. h., bei geringeren Anforderungen an die chemische Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids im Baufeld in der Südflanke – z. B. entsprechend einer Q-Lösung – wären hier hydraulische Anforderungen zu stellen, um langfristig großräumige Konvektionsbewegungen ausschließen zu können. Dies ist jedoch aufgrund der erheblich beanspruchten und teilweise mit Rissen durchzogenen Pfeiler nicht möglich.

### **6.4.2 Auswahl der Maßnahmen zur Begrenzung des Austritts von Lösung**

#### Resthohlraumverfüllung

Ein Vergleich der Maßnahmen zeigt, dass eine merkliche zusätzliche Begrenzung der Rate des Lösungsaustritts in das Deckgebirge durch das Verfüllen noch unverfüllter Hohlräume

mit Sorelbeton erreicht werden kann. Durch Verfüllung der Resthohlräume mit Sorelbeton werden auch Einflüsse auf die Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids ausgeschlossen. Aufgrund dessen wird vorsorglich das

#### ➤ **Einbringen von Sorelbeton**

in unverfüllte Hohlräume mit Priorität verfolgt. Das Einbringen von Salzgrus und Schotter stellt Alternativen dar, bei denen der Sicherheitsgewinn geringer ist. Die Resthohlraumverfüllung mit Sorelbeton oder Salzgrus bei Berücksichtigung der aktuellen Ausführungsplanung ist in den Anlagen 1 bis 9 sohlenspezifisch dokumentiert.

Die bevorzugte Verfüllung mit Sorelbeton steht mit den Stabilisierungsmaßnahmen für das Tragsystem im Einklang, da dadurch die Konvergenz und somit Lösungsflüsse - insbesondere im oberen Baufeld in der Südflanke - reduziert werden.

#### Konvektionsbegrenzung

Die hohe Anforderung an die Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids (R-Lösung) ist sicherheitsgerichtet, da dadurch langfristig großräumige Konvektionsbewegungen stark reduziert werden und der Austritt von Schadstoffen aus dem Grubengebäude verringert wird.

### **6.4.3 Spezifische Anforderungen für die Resthohlraumverfüllungen**

#### Tiefenaufschluss

Der Tiefenaufschluss umfasst die Grubenbaue vom Grubentiefsten bis zum Sohlenniveau der 775-m-Sohle. Mit der Verfüllung des Tiefenaufschlusses werden die konvergenzaktiven Hohlraumvolumina reduziert. Die Verfüllung der Grubenbaue im Tiefenaufschluss erfolgt vorwiegend mit Salzversatz, für den eine integrale Einbaudichte von mindestens  $1,46 \text{ t/m}^3$  gewährleistet wird. Nur auf der 800-m-Sohle ist eine sofortige Stützwirkung des Versatzes zur Stabilisierung der Schweben zur 775-m-Sohle oberhalb der ehemaligen Kfz-Werkstatt und für Widerlager für vertikale Strömungsbarrieren notwendig (siehe Anlage 1).

Die Verfüllung in der Kaverne unterhalb von Schacht Asse 4 erfolgte mit Schotter und Schutzfluid und im Kavernenhals mit Sorelbeton. Des Weiteren ist auch für die Verfüllung einiger Abschnitte in den Tages- und Blindschächten sowie einiger Bohrungen und Streckenabschnitte Schotter eingesetzt worden.

Für den vollständig verfüllten Tiefenaufschluss, einschließlich der Kaverne, wird die Anforderung eines integralen Porenvolumens von  $< 33 \%$  gestellt. Das Schutzfluid wird anschließend in den Porenraum eingeleitet. Die Zusammensetzung des Schutzfluids darf sich durch Wechselwirkung mit Salzversatz nicht in relevantem Ausmaß verändern.

#### Nahbereich der Einlagerungskammern

Der Nahbereich der Einlagerungskammern umfasst die Grubenbaue von der 775-m- bis zur 700-m-Sohle. Mit der Nachverfüllung werden die konvergenzaktiven Hohlraumvolumina in

den Grubenbauen reduziert, in denen keine Strömungsbarrieren, kein stützender Versatz und kein Mg-Depot eingebaut werden.

Die Resthohlraumverfüllung erfolgt vorwiegend mit Sorelbeton (vgl. Anlagen 2 bis 5), der eine Einbaudichte von ca.  $1,9 \text{ t/m}^3$  aufweisen wird. Dadurch verringern sich nicht nur die konvergenzaktiven Volumina, sondern auch die geringe Umlösung am Carnallit wird nochmals reduziert, da sowohl die Anströmgeschwindigkeit als auch die Anströmfläche herabgesetzt wird. Salzgrus wird nur vereinzelt eingesetzt. Bohrungen im Nahbereich der Einlagerungskammern – ob alt oder neu gestoßen – werden vollständig mit Sorelbeton oder Sorelmörtel verfüllt.

#### Oberes Baufeld in der Südflanke

Das obere Baufeld in der Südflanke umfasst die Grubenbaue von der 679-m-Sohle bis zum Grubenhöchsten. Noch unverfüllte Hohlräume in den Abbauen und in Abbaubegleitstrecken werden im Rahmen der Stabilisierungsmaßnahmen des Tragsystems im oberen Baufeld in der Südflanke mit Sorelbeton (Pumpversatz) verfüllt. Damit werden zugleich die konvergenzaktiven Hohlraumvolumina reduziert.

Die Resthohlraumverfüllung in der Wendelstrecke und in den Blindschächten sowie die Schachtverfüllungen erfolgen mit Sorelbeton. Dadurch werden Kanalisierungseffekte für den Schadstofftransport in vertikalen Auffahrungen vermieden, die die Abbaue im oberen Baufeld in der Südflanke „umlaufen“ könnten. Durch solche Effekte würden die Transportzeit von Schadstoffen und die Verdünnung von Schadstoffkonzentrationen deutlich abnehmen. Des Weiteren wird die Umlösung am Carnallit in der Wendelstrecke reduziert, da sowohl die Anströmgeschwindigkeit als auch die Anströmfläche deutlich herabgesetzt wird. Alle Bohrungen für die Umsetzung der Verfüllmaßnahmen werden vollständig mit Sorelbeton oder Sorelmörtel verfüllt bzw. verpresst.

#### **6.4.4 Spezifische Anforderungen für das Schutzfluid**

Die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids liegt im Mittel nahe der einer R-Lösung (siehe Tabelle 6.1), um die Umlösung von Kalisalzen und die Zersetzung von Carnallit zu minimieren. Um großräumige Konvektionsbewegungen auszuschließen, wird sichergestellt, dass die Dichte des Schutzfluids mit zunehmender Teufe nicht abnimmt. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an die Lösungsdichte und die chemische Zusammensetzung in verschiedenen Teufenbereichen:

- Tiefenaufschluss unterhalb der 775-m-Sohle – Schutzfluid TA
  - Lösungsdichte:  $\geq 1,311 \text{ g/cm}^3$
  - $\text{MgCl}_2$ -Konzentration:  $\geq 375 \text{ g/l}$
- Nahbereich der Einlagerungskammern – Schutzfluid LAW
  - Mittlere Lösungsdichte:  $1,311 \text{ g/cm}^3$  (Bandbreite:  $1,303$  bis  $1,320 \text{ g/cm}^3$ )
  - Mittlere  $\text{MgCl}_2$ -Konzentration:  $376 \text{ g/l}$  (Bandbreite:  $370$  bis  $386 \text{ g/l}$ )
  - Mittlere  $\text{MgSO}_4$ -Konzentration:  $39 \text{ g/l}$  (Bandbreite:  $29$  bis  $46 \text{ g/l}$ )

- Mittlere KCl-Konzentration: 11 g/l (Bandbreite: 11 bis 24 g/l)
  - Mittlere NaCl-Konzentration: 22,4 g/l (Bandbreite 9 bis 23 g/l)
  - CaSO<sub>4</sub>-Konzentration: 0 bis 2 g/l
  - ≤ 0,5 g Brucit pro l Schutzfluid.
- Baufeld in der Südflanke oberhalb der 700-m-Sohle – Schutzfluid SF
- Bandbreite Lösungsdichte: 1,300 bis 1,320 g/cm<sup>3</sup>
  - Bandbreite MgCl<sub>2</sub>-Konzentration: 350 bis 450 g/l
  - Bandbreite MgSO<sub>4</sub>-Konzentration: 5 bis 46 g/l
  - Bandbreite KCl-Konzentration: 2 bis 20 g/l

Das Schutzfluid wird sich unter Tage relativ schnell auf Gebirgstemperatur angleichen. Diese liegt bei ca. 30 °C in etwa 600 m Teufe und bei ca. 35 °C in etwa 800 m Teufe. Der Dichteunterschied von R-Lösung zwischen 25 °C und 40 °C beträgt weniger als 0,001 g/cm<sup>3</sup>. Dichteunterschiede durch das Einwirken des geothermischen Gradienten sind zu vernachlässigen. Der zulässige Temperaturbereich bei der Einleitung liegt zwischen 25 °C und 40 °C.

## 6.5 Maßnahmen zum Vermeiden von neuen hydraulischen Wegsamkeiten

Durch neue Wegsamkeiten zwischen Grubenbauen und dem Deckgebirge – insbesondere direkte Wegsamkeiten von den Einlagerungskammern bis in das Deckgebirge – würde die Verzögerung des Transports von Schadstoffen im Grubengebäude vermindert. Dies kann sowohl das radiologische Schutzziel gefährden als auch die Prognosesicherheit in der Nachbetriebsphase einschränken und soll daher vermieden werden.

Solche Wegsamkeiten werden vermieden, sofern weder beschleunigte Verformungen und verstärkte Bruchprozesse zu einer Erhöhung von Gebirgsverformungen und Deckgebirgsverschiebungen noch intensive Umlösungen am Carnallitit ausgelöst werden. Deshalb muss ein gleich bleibender bzw. degressiver Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten und eine Blockierung von dynamischen Reaktionen gewährleistet werden. Diese Ziele entsprechen denen der Maßnahmen zur Stabilisierung des Tragsystems. Der Stützdruck für das Tragsystem durch den pneumatischen Druck in der späten Betriebsphase und den hydrostatischen Druck in der Nachbetriebsphase gewährleistet den degressiven Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten, die Einschränkung von Verformungen und die Blockierung von dynamischen Reaktionen. Dadurch werden verstärkte Bruchprozesse in der Steinsalz-Barriere und im Deckgebirge vermieden. Durch das Einleiten des Schutzfluids werden intensive Umlösungsprozesse verhindert.

Nach der Beaufschlagung des pneumatischen Drucks ist das Entstehen neuer hydraulischer Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und Deckgebirge unter 595 m Teufe wenig wahrscheinlich und nach dem Einleiten des Schutzfluids auszuschließen.

## 6.6 Maßnahmen zum Vermeiden von Fluidbewegungen über Tagesschächte

Durch einen nennenswerten Lösungszutritt über die Tagesschächte in das Grubengebäude könnte in der Nachbetriebsphase – in Verbindung mit den Wegsamkeiten durch die Zone der desintegrierten Steinsalz-Barriere in der Südflanke – eine langfristig anhaltende, konvektiv bedingte Durchströmung im oberen Grubengebäude eintreten, wodurch die Wirksamkeit der technischen Maßnahmen im oberen Grubengebäude eingeschränkt werden könnte. Das beträfe die Verfüllung der MAW-Kammer und die Stabilisierungsmaßnahmen im oberen Baufeld in der Südflanke.

Ein nennenswerter Lösungs- und Gasaustritt über die Tagesschächte würde die Verzögerung des Transports von Schadstoffen und die Verdünnung der Schadstoffkonzentrationen im Deckgebirge deutlich herabsetzen, wodurch das radiologische Schutzziel gefährdet wäre.

### 6.6.1 Potenzielle Maßnahmen

Das Ziel dieser Maßnahmen ist *das Vermeiden von relevanten Fluidbewegungen über die Schächte Asse 2 und Asse 4*. Das betrifft sowohl Lösungs- als auch Gasflüsse. Hierzu ist es notwendig, die Tagesschächte durch geeignete Verschlussbauwerke langfristig abzudichten und die Schachtverschlüsse durch setzungsstabile Füllsäulen zu stabilisieren.

Da die Anhydritmittel, welche im Top des Sattels kulminieren, Salzlösungen führen, sind die Dichtelemente im Leine-Steinsalz zwischen den Anhydritmitteln und der 490-m-Sohle anzuordnen.

Mögliche Versatzstoffe für die setzungsstabilen Füllsäulen sind Sorelbeton und Schotter. Die Setzungsstabilität von Füllsäulen ist für Hartgesteinsschotter aus Diabas und für Sorelbeton mit geringem Kompaktionsmodul nachgewiesen. Eine Füllsäule aus Sorelbeton verringert die Gefahr von Kanalisierungseffekten für den Schadstofftransport, die bei Füllsäulen aus hoch durchlässigem Schotter eintreten können. Des Weiteren ist der anstehende Carnallit in den Tagesschächten zu beachten, der durch Umlösung zersetzt werden könnte.

Als strömungsbegrenzende Dichtelemente für die Schachtverschlüsse kommen Bauwerke aus

- Sorelbeton,
- Bentonit und
- Salzton

in Frage. Ein Dichtelement aus Sorelbeton entspricht einer vertikalen Strömungsbarriere, wobei die Auflockerungszonen der Schachtkontur im Bereich des Dichtelements gespitzt und/oder mittels Injektionen vergütet werden. Der Einbau von Dichtelementen aus Bentonit und Salzton ist ebenfalls technisch machbar. Da die Wirksamkeit der Dichtelemente der

Schachtverschlüsse sowohl sofort als auch langfristig zu gewährleisten ist, bestimmt die Beständigkeit der Dichtelemente die geeignete Lösung.

### **6.6.2 Technische Konzepte**

Im deutschen Kali- und Steinsalzbergbau wurden in den letzten Jahrzehnten eine Reihe von Schächten sicher verschlossen. Die gewonnenen Erfahrungen sowie die Planungen für die Schachtverschlüsse der Schächte Marie und Bartensleben (ERA Morsleben) und der WIPP (USA) waren die Grundlage für das Konzept zum Verschluss der Tagesschächte der Schachanlage Asse II. Weiterhin wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes im Salzbergwerk Salzdettfurth, Erfahrungen aus dem Betrieb von Gas- und Druckluftspeichern (Kavernen) sowie Erfahrungen beim Einbau von Strömungsbarrieren in der Schachanlage Asse berücksichtigt. Diese sind:

- Dichtelemente sind auf Füllsäulen zu verlagern. Die Füllsäulen können setzungsstabil aus Hartgesteinsschotter oder kohäsiv aus Beton erstellt werden.
- Dichtelemente aus Bentonit werden erst bei Aufsättigung mit Salzlösung oder Wasser dicht und können auch erst dann hydraulische Differenzdrücke abtragen.
- Dichtelemente aus Sorelbeton besitzen eine Gaspermeabilität von ca.  $10^{-16}$  m<sup>2</sup> und eine Permeabilität für Salzlösungen von  $< 10^{-17}$  m<sup>2</sup>.
- Mit Schotter stabilisierte Bitumen- oder Asphalt-dichtelemente stellen sofort und mindestens 100 Jahre lang beständige Abdichtungen für Gas und Lösungen dar.
- Für Schachtverschlüsse mit hohen Anforderungen und wechselnden hydraulischen Beanspruchungen sind diversitäre Dichtungssysteme sicherheitsgerichtet.

Das Konzept für das Dichtungssystem hängt von den Standortbedingungen und spezifischen Anforderungen ab.

### **6.6.3 Auswahl der Maßnahmen zum Vermeiden von Fluidbewegungen über Tagesschächte**

Ein Vergleich der Maßnahmen zeigt, dass Füllsäulen sowohl setzungsstabil aus Schotter als auch kohäsiv aus Sorelbeton erstellt werden können. Durch kohäsive Füllsäulen aus Sorelbeton sind Kanalisierungseffekte für den Stofftransport und Umlösungen am Carnallit auszuschließen. Der

#### **➤ Einbau von Füllsäulen aus Sorelbeton**

stellt nach Abwägen aller Aspekte und Ungewissheiten die sicherste Lösung dar.

Das Ziel des *Vermeidens von relevanten Fluidbewegungen über die Tagesschächte Asse 2 und Asse 4* könnte durch eines der möglichen Dichtelemente allein gewährleistet werden. Aufgrund der variierenden chemischen und hydraulischen Randbedingungen im oberen und unteren Bereich der Schachtverschlüsse werden vorsorglich Schachtverschlüsse eingebaut, die unterschiedliche Dichtelemente aus Sorelbeton, Bitumen, Salztou und Bentonit in sich vereinen. Ein Schachtverschluss mit einem

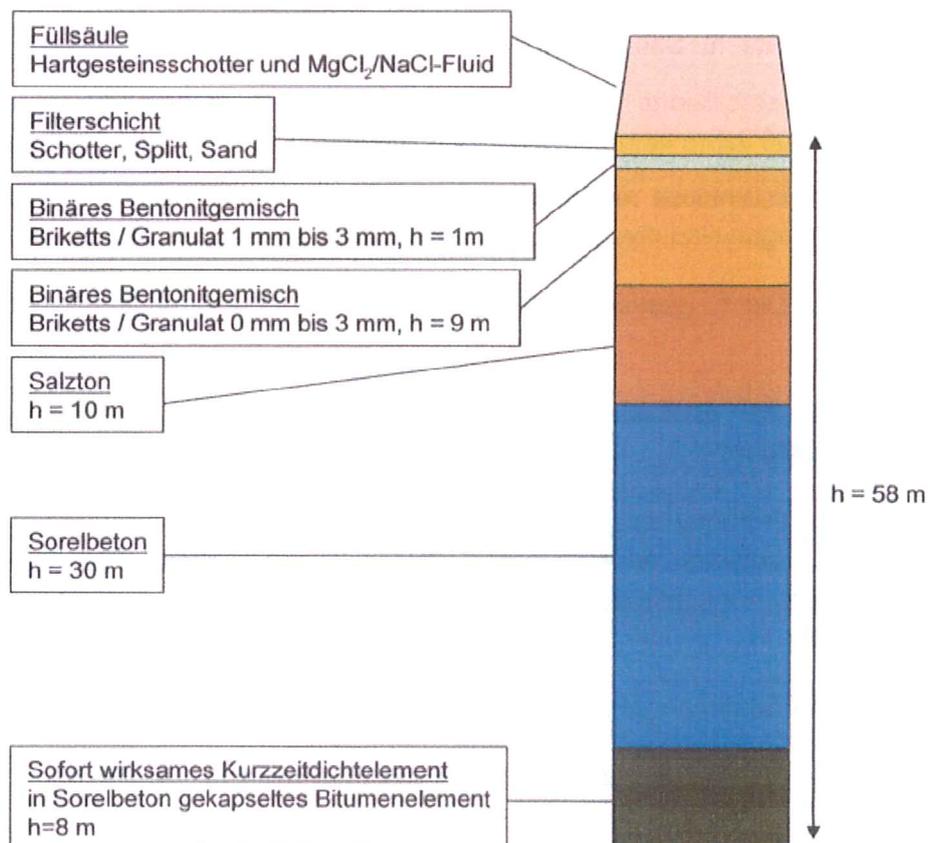
### ➤ diversitären Dichtungssystem

stellt nach Abwägen aller Aspekte und Ungewissheiten die sicherste Lösung dar.

Im unteren Bereich wird das Dichtelement aus Sorelbeton eingebaut, das im Kontakt mit Schutzfluid stabil ist. Im oberen Bereich wird das Dichtelement aus Bentonit eingebaut, das im Kontakt mit NaCl-betonter Lösung und Wasser wirksam und beständig ist. Dazwischen erfolgt der Einbau des Dichtelements aus Salzton. Die schnellstmögliche Aufprägung des pneumatischen Stützdrucks fordert im unteren Bereich der Schachtverschlüsse – oberhalb des Sorelbetons – ein sofortwirksames Dichtungselement aus Bitumen.

Oberhalb der Dichtungssysteme sind setzungsstabile Füllsäulen aus Schotter und eine Einstapelung von Salzlösung notwendig, um hydraulische Beanspruchungen zu reduzieren (Abb. 6.3).

Abb. 6.3 Prinzipieller Aufbau des Dichtungssystems in den Schächten



#### **6.6.4 Generelle Anforderungen**

Um langfristig flüssigkeits- und gasdichte Schachtverschlüsse zu gewährleisten, gibt es Anforderungen an

- die integrale Permeabilität, einschließlich der umgebenden Auflockerungszone,
- die Lagestabilität der technischen Bauwerke und
- die chemische Langzeitstabilität der Baustoffe.

Strömungsmodellierungen zeigen, dass der Austritt von Lösung und Gas über die Tageschächte vernachlässigbar ist, sofern die Schachtverschlüsse eine integrale Permeabilität von  $5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$  aufweisen und der Gaseindringdruck mindestens 600 kPa beträgt. Um die Funktionalität nach dem Einbau zu gewährleisten, wird der technische Zielparameter für die integrale Permeabilität vorsorglich um eine Größenordnung geringer festgesetzt. Aufgrund der Konvergenz wird die Permeabilität der Kontaktzone und der Auflockerungszone stetig abnehmen.

Bei der Aufprägung des pneumatischen Innendrucks wird für die integrale Permeabilität und somit für das gesamte Dichtungssystem im Schacht 2 ein in-situ Funktionsnachweis geführt. Dabei wird auch die Wirksamkeit der sofort wirksamen Kurzzeitdichtung im Schacht 4 in-situ überprüft. Dieses Vorgehen ist sicherheitsgerichtet, da die Einhaltung der hydraulischen Anforderungen für den Schacht 2 mit dem größeren fließwirksamen Querschnitt direkt nachgewiesen wird und damit auf den Schacht 4 übertragbar ist.

Signifikante hydraulische Beanspruchungen der Schachtverschlüsse durch Druckdifferenzen ergeben sich bis zum maximalen Fluiddruck im Grubengebäude nach einigen hundert Jahren. Der maximale Differenzdruck wird mit bis zu 2 MPa berechnet. Mit dem Absinken des Fluidrucks im Grubengebäude nehmen auch die hydraulischen Druckdifferenzen ab. Die triaxiale Einspannung der Dichtelemente bzw. deren Lagestabilität wird grubenseitig durch Widerlager und deckgebirgsseitig durch Überschichtung mit Salzlösung sichergestellt.

#### **6.6.5 Grundsätzliche technische Machbarkeit**

Der Einbau von setzungsstabilen Füllsäulen und Schachtverschlüssen ist Stand der Technik und wurde bei der Verwahrung bereits vieler Bergwerke angewendet. Die grundsätzliche Machbarkeit am Standort Asse wird für vergleichbare Beispiele aus dem Salzbergbau belegt. Der Untergrundgasspeicher (UGS) Burggraf-Bernsdorf – ein stillgelegtes Kalibergwerk – befindet sich seit 35 Jahren im Betrieb. Im UGS beträgt der maximale Gasdruck 3,6 MPa und somit mehr als das Doppelte des für die Schachanlage Asse vorgesehenen pneumatischen Innendrucks. Außerdem liegt er über dem berechneten maximalen Differenzdruck der zwischen Ober- und Unterkante auf die Schachtverschlüsse in der Nachbetriebsphase durch Fluide wirkt. Der sichere Betrieb wird durch flüssigkeits- und gasdichte Schachtverschlüsse gewährleistet, die aus einem kombinierten Dichtsystem aus Asphalt/Bitumen und Salzton bestehen. Während des Betriebes traten praktisch keine Druck- oder Gasverluste auf. Der Flüssigkeitsverlust wurde für das Jahr 2003 mit maximal 120 l/a angegeben. Im Kalibergwerk Bernterode bildete sich während des Ersaufens durch Salzlösungszuflüsse im Grubenhöchsten eine Gasblase von etwa 100.000 m<sup>3</sup> mit einem

Druck von 5,5 MPa. Die Schächte wurden durch Einbau eines flüssigkeitsdichten Verschlusses, bestehend aus einer kombinierten Bitumen-Soleton-Dichtung mit Widerlager, abgedämmt. Der seit mehr als 30 Jahren durch einen liegenden Lösungsdruck von 5,5 MPa belastete Schachtverschluss zeigt keinerlei Undichtigkeiten. Die Beispiele belegen, dass aus Bitumen und Salztou flüssigkeits- und gasdichte Dichtelemente gebaut werden können.

Die technische Machbarkeit und der anforderungsgerechte Einbau von Dichtelementen aus Bentonit wurden durch den Großversuch im Bergwerk von Salzdettfurth demonstriert.

Der Einbau von Dichtelementen aus Sorelbeton mit Nachschnitt der Auflockerungszone oder mit Vergütung der Auflockerungszone durch Injektionen erfolgt nach dem Stand der Technik.

## **6.7 Einleitregime für das Schutzfluid**

Das Einleitregime für das Schutzfluid bestimmt sowohl den zeitlichen Ablauf für die Schließung der Schachtanlage Asse als auch die Stützung des Gesamttragsystems und somit die Sicherheit am Standort in der Nachbetriebsphase.

### **6.7.1 Technische Konzepte**

Hinsichtlich der Einleitung des Schutzfluids ist zwischen der Einleitung bis zur 700-m-Sohle und oberhalb der 700-m-Sohle zu unterscheiden. Bis zur 700-m-Sohle erfolgt die Einleitung aus dem nicht verschlossenen Grubengebäude. Dagegen wird die Einleitung oberhalb der 700-m-Sohle mannlos in das bereits verschlossene Grubengebäude durchgeführt.

#### Einleitung bis zur 700-m-Sohle

Im Tiefenaufschluss und Nahbereich der Einlagerungskammern – d. h. bis zum Erreichen des Schutzfluidpegels auf der 700-m-Sohle – bestehen verschiedene Möglichkeiten der technischen Umsetzung und des zeitlichen Ablaufs für das Einleitregime des Schutzfluids. Folgende generelle Anforderungen bilden unabdingbare Randbedingungen für das Einleiten bis zur 700-m-Sohle:

- die Einleitung des Schutzfluids auf einer Sohle erfolgt erst nach dem Abwerfen.
- auf den Einlagerungssohlen muss die Ausbreitung kontaminierter Lösung während der Einleitphase minimiert werden.

Die Einleitung des Schutzfluids erfolgt über Bohrungen, die nach der gezielten Auffüllung der Porenräume qualitätsgerecht verfüllt werden. Einige Blindschächte und Strecken werden mit Schotter verfüllt und bleiben somit langfristig hydraulisch durchlässig. Das betrifft z. B. den Blindschacht 1 unterhalb der 800-m-Sohle und den westlichen Blindschacht. Diese hoch durchlässigen Wegsamkeiten werden auch für die gezielte Einleitung und Verteilung des Schutzfluids in diesem Grubenbereich genutzt.

Im Januar 2008 befand sich der Schutzfluidpegel im Tiefenaufschluss in einer Teufe von ca. 930 m. Der aktuelle zeitliche Ablauf ist in Anlage 10 dargelegt.

### Einleitung oberhalb der 700-m-Sohle

Für das mannlose Einleiten des Schutzfluids von der 679-m bis zur 490-m-Sohle sind folgende Varianten der technischen Umsetzung und des zeitlichen Ablaufs denkbar:

- Einleitung des Schutzfluids von über Tage durch eine separate Bohrung in das obere Baufeld in der Südflanke.
- Einleitung des Schutzfluids von über Tage durch eine spezielle Verrohrung im Schacht 4 bis zur Oberkante der sofortwirksamen Kurzzeitdichtung und von dort durch Bohrungen in verschiedene Abbaue im oberen Baufeld in der Südflanke.
- Einleitung des Schutzfluids von über Tage durch eine spezielle Verrohrung im Schacht 2 bis zur Oberkante der sofortwirksamen Kurzzeitdichtung und von dort durch Bohrungen in verschiedene Abbaue im oberen Baufeld in der Südflanke.

#### **6.7.2 Festlegung des Einleitregimes**

Die technischen Alternativen für das Einleiten des Schutzfluids sind unter den Aspekten der Sicherheit und Zweckmäßigkeit geprüft und bewertet worden. Im Ergebnis wurde die Einleitung des Schutzfluids von über Tage durch eine spezielle Verrohrung im Schacht 4 bis zur Oberkante der sofortwirksamen Kurzzeitdichtung und von dort durch Bohrungen in verschiedene Abbaue im oberen Baufeld in der Südflanke als bevorzugte Variante für die generelle technische Umsetzung festgelegt.

Die Gründe für das Ausschließen der zwei nicht gewählten Varianten sind:

- Eine Einleitbohrung von über Tage in das obere Baufeld in der Südflanke durchteuft grundwasserleitende Schichten, mit der Gefahr, dass unkontrollierte Zuflüsse zum Grubengebäude entstehen.
- Eine Einleitbohrung von über Tage in das obere Baufeld in der Südflanke durchteuft erheblich gebirgsmechanisch beanspruchte Gebirgsbereiche. Damit kann ein Ausbau der Bohrlochverrohrung und eine qualitätsgerechte Abdichtung nicht sichergestellt werden. Die damit einhergehenden Risiken sind nicht vertretbar.
- Die Einleitung des Schutzfluids über den Schacht 2 würde den Bauablauf verzögern, da der Schacht 2 bis zum Ende der untertägigen Arbeiten benötigt wird.

Die Aufprägung des pneumatischen Stützdrucks und die Einleitung des Schutzfluids über den Schacht 4 ermöglichen einen zeitgerechten Ablauf.

Die Beaufschlagung des pneumatischen Drucks und die Einleitung des Schutzfluids von der Oberkante der sofort wirksamen Kurzzeitdichtung im Schacht 4 können über Rohrleitungen, die durch die Dichtung verlegt werden, oder separate Bohrungen erfolgen. Um die Integrität des Dichtungssystems nicht zu beeinträchtigen, wird die Beaufschlagung über separate Bohrungen erfolgen.

Für die Erstellung der Bohrungen wurden ebenfalls verschiedene Varianten geprüft. Nach Abwägen aller Aspekte sollen die Bohrungen für die Einleitung des Schutzfluids ab der 700-m-Sohle aus dem Füllortbereich von Schacht 4 auf der 490-m-Sohle gestoßen werden, da dies einen zeitgerechten Ablauf gewährleistet. Die Bohrarbeiten bei dieser Variante können mit erprobter Technik ausgeführt werden. Für die Erstellung der Bohrungen aus dem Schacht 4 wären aufgrund des geringen Querschnitts spezifische technische Lösungen erforderlich. Die qualitätsgerechte Bohrlochabdichtung ist Stand der Technik.

Die Einleitpunkte für das Schutzfluid befinden sich auf den unteren Sohlen des oberen Baufeldes in der Südflanke – jedoch oberhalb der Einlagerungssohlen – und werden sukzessiv mit dem Ansteigen des Schutzfluidpegels genutzt. Das Schutzfluid wird somit an tiefen Punkten eingeleitet, wodurch abrasionsbedingte vertikale Strömungskanäle im Versatz verhindert werden. Die schnelle und gleichmäßige Verteilung des Schutzfluids wird durch separate Einleitpunkte im mittleren, westlichen und östlichen Bereich des Baufeldes gewährleistet. Vorsorglich werden noch zusätzliche Einleitpunkte vorgesehen.

Die Einleitpunkte für die Beaufschlagung des pneumatischen Innendrucks werden an den höchstgelegenen Orten des Baufeldes – jeweils in den Firsten der Abbaue 3 und 8 auf der 490-m-Sohle – angelegt. Dadurch werden die maximale Auffüllung des Grubengebäudes mit Schutzfluid und die Verdrängung der Luft aus dem oberen Baufeld in der Südflanke ermöglicht.

Die Schutzfluideinleitung wird beendet, wenn sich der Fluiddruck auf einem Wert stabilisiert hat, der einem Schutzfluidniveau von mindestens 490 m Teufe entspricht. Anschließend werden ohne Druckentlastung im Grubengebäude die technischen Einrichtungen demontiert und die Bohrungen dicht verschlossen.

## 7. Grundlegendes Konzept für die Schließung der Schachtanlage Asse II

Das Konzept für die Schließung der Schachtanlage Asse II hat einen langfristig sicheren Abschluss der radioaktiven Abfälle von der Biosphäre, die Vermeidung schädlicher Verunreinigungen oder sonstiger nachteiliger Veränderungen des Grundwassers und eine langzeitige Sicherung der Tagesoberfläche zu gewährleisten. Die gesetzlichen Schutzziele sind Bewertungsmaßstäbe für die Sicherheit.

Aufgrund der Standortbedingungen ist ein trockener Einschluss der radioaktiven Abfälle in den LAW-Einlagerungskammern nicht zu gewährleisten. Es besteht weder die Möglichkeit einer langfristig wirksamen Abdichtung des Salzlösungszutritts in der Südflanke noch die Möglichkeit, die Abfälle durch technische Maßnahmen vollständig zu umschließen und somit vor dem Kontakt mit Lösungen dauerhaft zu schützen.

Eine Rückholung der radioaktiven Abfälle ist aufgrund erheblicher Sicherheitsrisiken nicht zu verantworten. Neben bergmännischen, arbeits- und strahlenschutztechnischen Risiken besteht während der gesamten Dauer der Rückholung ein ständiges Risiko, dass die Schachtanlage Asse II bei geöffneten Einlagerungskammern absäuft. Grund hierfür sind die anhaltenden Verformungen im Gesamttragsystem. Ein Absaufen des Grubengebäudes ohne Sicherungsmaßnahmen sowie ein beschleunigter Austritt von Radionukliden in die Biosphäre wären die Folge.

Grundlegende Anforderungen für die Schließung der Schachtanlage sind die hinreichende und schnellstmögliche Stützung des Tragsystems, der Schutz des Carnallitits vor Lösungen aus dem Deckgebirge und gesicherte Randbedingungen für Langzeitprognosen. Einen wirkungsvollen und langzeitigen Schutz des Carnallitits stellt das Einleiten einer Salzlösung dar, die mit Carnallitit nahezu im chemischen Gleichgewicht steht (Punkt R). Der hydrostatische Druck des Schutzfluids im Grubengebäude bewirkt zugleich eine hinreichende Stützung des Gesamttragsystems. Das

- Einleiten von Schutzfluid

ist eine unabdingbare Voraussetzung für eine langfristig sichere Schließung der Schachtanlage Asse und grundlegender Bestandteil des Schließungskonzepts.

Das Schließungskonzept für die Schachtanlage Asse II ist das Ergebnis eines iterativen Prozesses, in dem unterschiedliche Maßnahmen hinsichtlich des Sicherheitsgewinns, der Prognosesicherheit, der grundsätzlichen technischen Machbarkeit und des Zeitaufwandes bewertet worden sind. In der Folge werden die technischen Maßnahmen genannt, die im Ergebnis dieser gesamtheitlichen Bewertung eine sichere und technisch zweckmäßige Lösung darstellen. Notwendige technische Maßnahmen sind

- das Einbringen von Mg-Depots in die Einlagerungskammern und in ausgewählte Austrittspfade sowie zusätzlich von Sorelbeton,

- der Einbau von Strömungsbarrieren und stützendem Versatz im Nahbereich der Einlagerungskammern,
- der Einbau von Schotter in ausgewählten Grubenbauen zur Unterstützung der Lenkungsfunktion von Strömungsbarrieren,
- die Verfüllung weiterer noch unverfüllter Resthohlräume mit Pumpversatz oder mit Salzversatz,
- der Einbau von kohäsiven Füllsäulen aus Sorelbeton und Verschluss der Tageschächte mit diversitären Dichtungssystemen und
- das Einleiten des Schutzfluides im oberen Baufeld der Südflanke nach der Beaufschlagung eines zeitlich begrenzten pneumatischen Stützdrucks.

Eine sichere Schließung der Schachanlage Asse unter Berücksichtigung der gesetzlichen Schutzziele ist dann gegeben, wenn das Gesamtkonzept anforderungsgerecht umgesetzt wird. Das Gesamtkonzept für die Schließung der Schachanlage erfüllt die grundlegenden Anforderungen und ist nach dem Stand von Wissenschaft und Technik alternativlos.

Alternative Einzellösungen bestehen für einzelne Schließungsmaßnahmen. Die prinzipielle Anordnung von Strömungsbarrieren, stützendem Versatz und Schotter sowie die Dimensionierung einzelner Bauwerke kann verändert werden, was jedoch einer umfangreichen Überprüfung bedarf.

Die Schließung der Schachanlage Asse muss schnellstmöglich durchgeführt werden, da in Auswertung der aktuellen Standortüberwachung nur noch eine begrenzte Resttragfähigkeit der Südflanke gegeben ist. Bis zur und während der Schließung ist eine Deformationsbeschleunigung auszuschließen, um die Prognosesicherheit für das Systemverhalten in der Nachbetriebsphase nicht zu beeinträchtigen. Dies ist notwendig, um prognosefähige Randbedingungen für den Nachweis der Langzeitsicherheit zu schaffen und die Einhaltung der gesetzlichen Schutzziele nachweisen zu können.

Das Gesamtkonzept stellt die Lösung für die langzeitsichere Schließung der Schachanlage Asse II dar. Der Entscheidungsprozess bis zur Festlegung des vorliegenden Gesamtkonzepts war in jedem Iterationsschritt vom nachweislichen Sicherheitsgewinn geprägt. Das Sicherheitsgebot hatte Vorrang vor wirtschaftlichen Erwägungen.

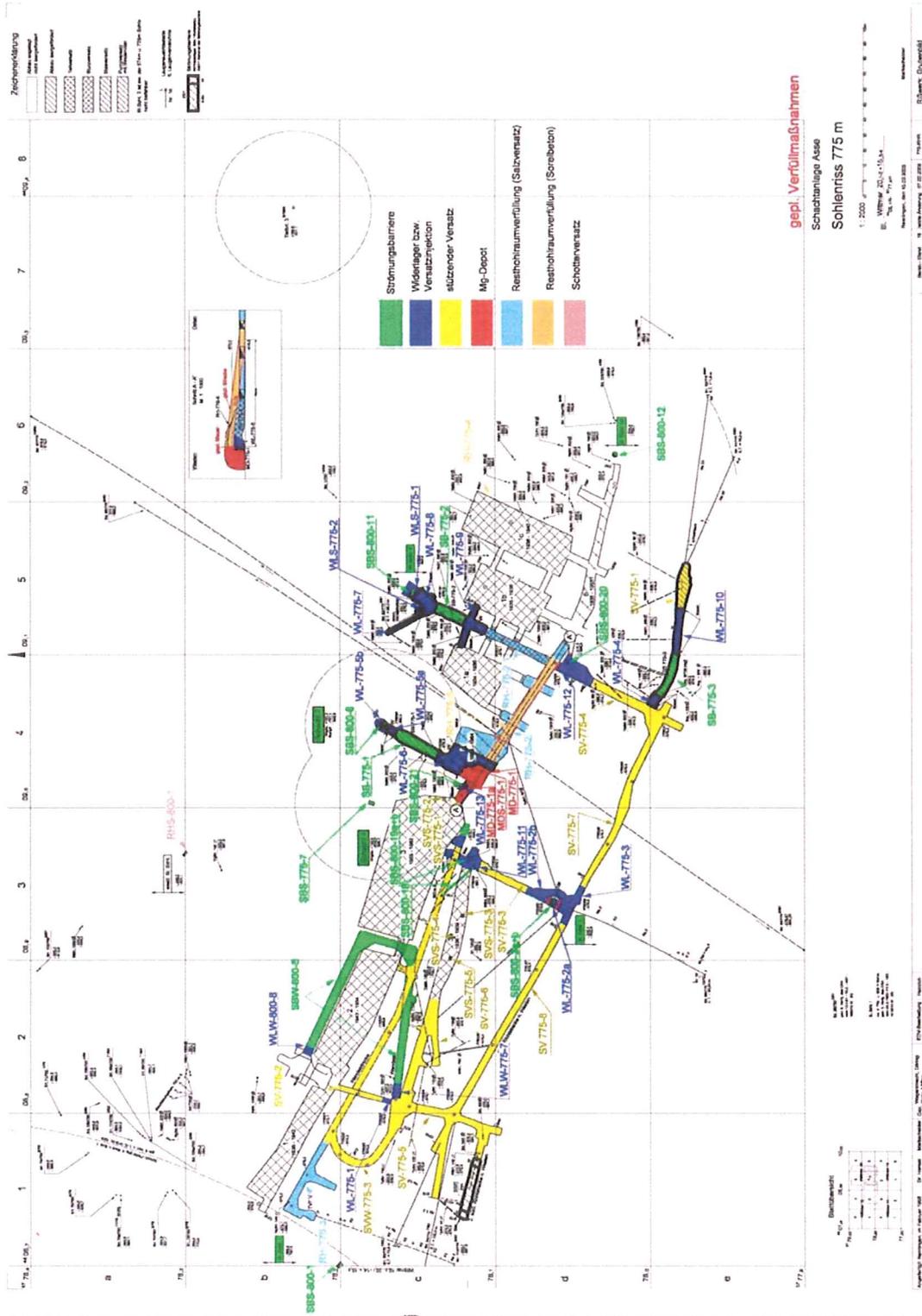
Das Schließungskonzept berücksichtigt die spezifischen Gegebenheiten im Grubengebäude und greift auf erprobte Techniken im Bergbau zurück. Für das vorliegende Schließungskonzept wurde der Nachweis der Langzeitsicherheit geführt. Es wurde gezeigt, dass bei qualitätsgerechter Umsetzung alle Schutzziele erreicht werden.

## Literaturverzeichnis

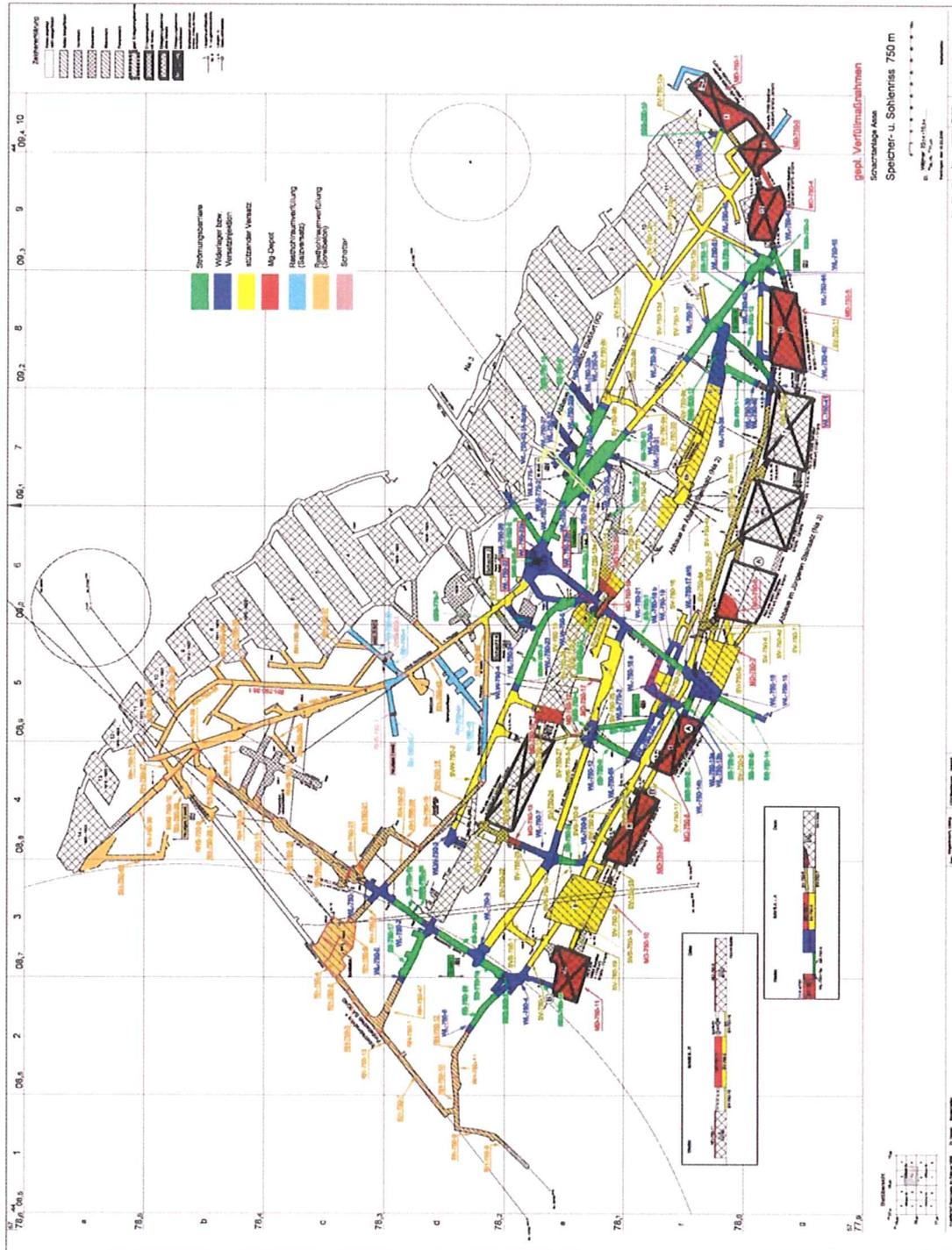
- /d`Ans 1933/ Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen. Herausgegeben von der Kali-Forschungs-Anstalt GmbH, Berlin 1933 (Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH).
- /FIC 2006/ Gutachtliche Stellungnahme zu einer Rückholung der in der Schachanlage Asse II eingelagerten radioaktiven Abfälle. Fichtner Consulting & IT, September 2006.
- /IfG 2006a/ Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase. Bericht, Revision 02, IfG Leipzig, Oktober 2006.
- /IfG 2006b/ Gebirgsmechanische Langzeitprognose für die Schachanlage Asse. Bericht, Revision 02, IfG Leipzig, Oktober 2006.
- /IfG 2007/ Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachanlage Asse II – Kurzbericht. IfG Leipzig, November 2007.  
<http://www.helmholtz-muenchen.de/asse/news/tragfaehigkeitsanalyse-veroeffentlicht/index.html>
- /Sch 1999/ Schwandt, A. & Seifert, G: Natürliche und gelenkte Flutung von Salzbergwerken in Mitteldeutschland. Exkursionsführer Veröffentl. GGW Berlin, 205, 61-72, 1999.



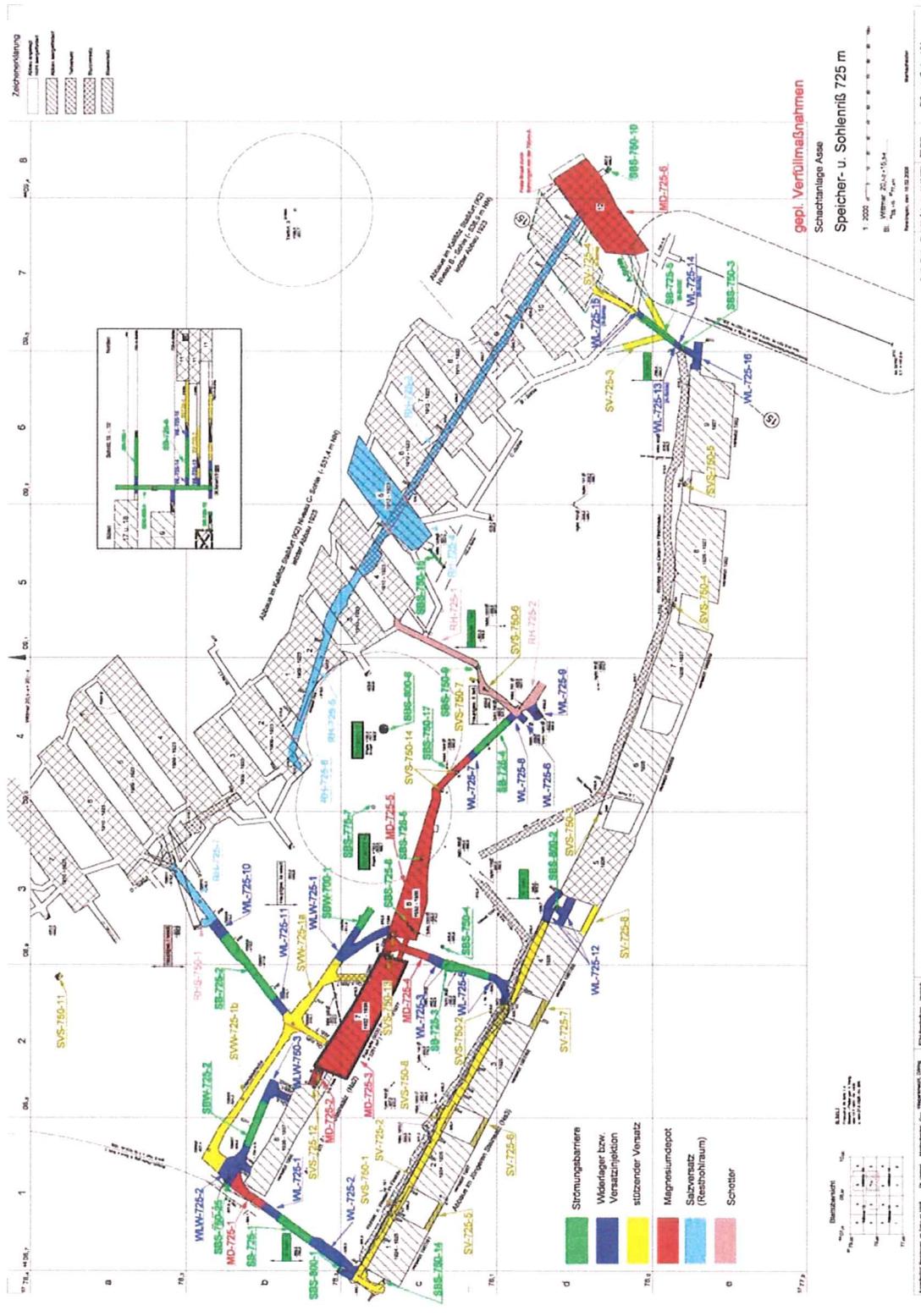
Anlage 2: Geplante technische Maßnahmen auf der 775-m-Sohle



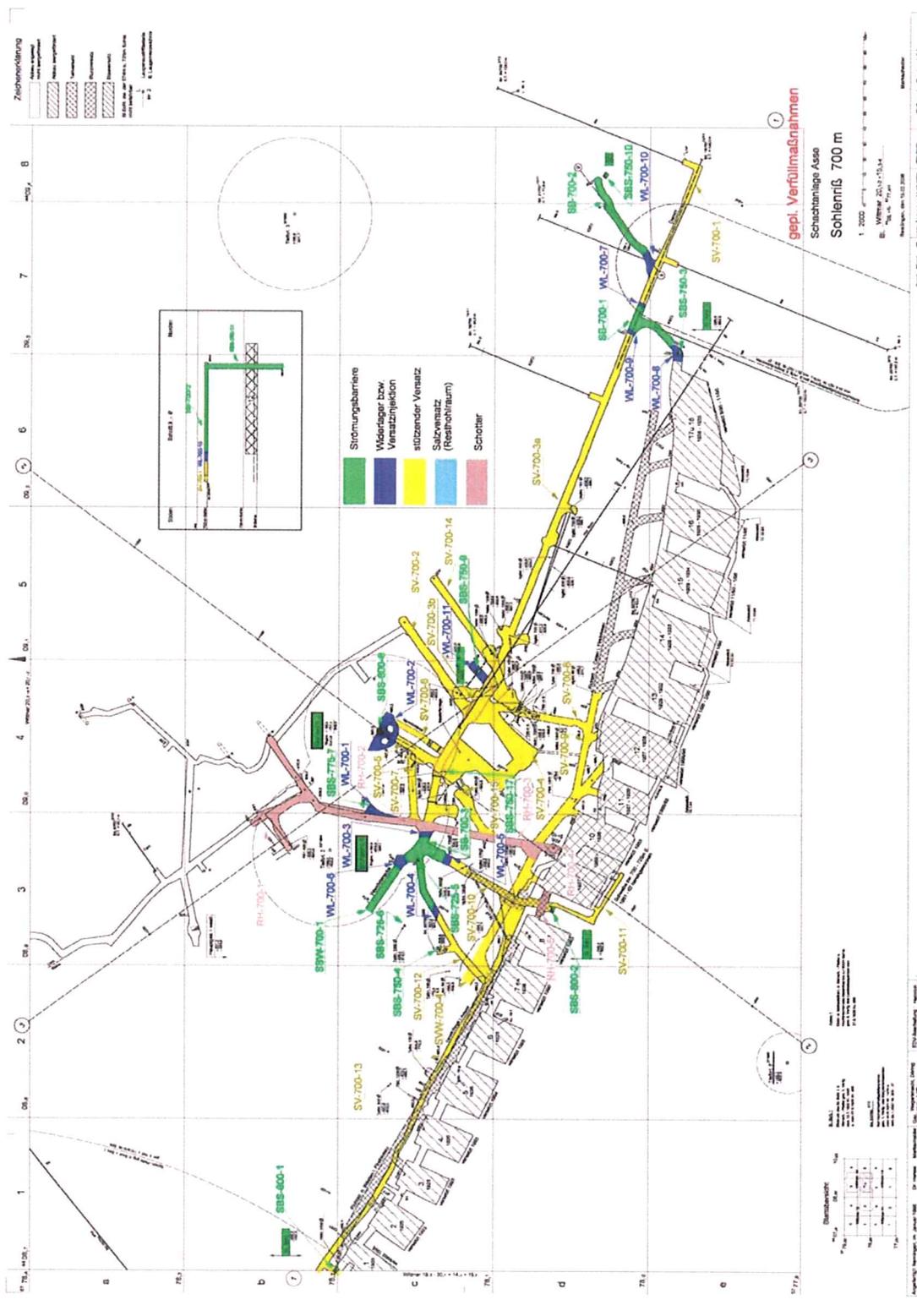
Anlage 3: Geplante technische Maßnahmen auf der 750-m-Sohle



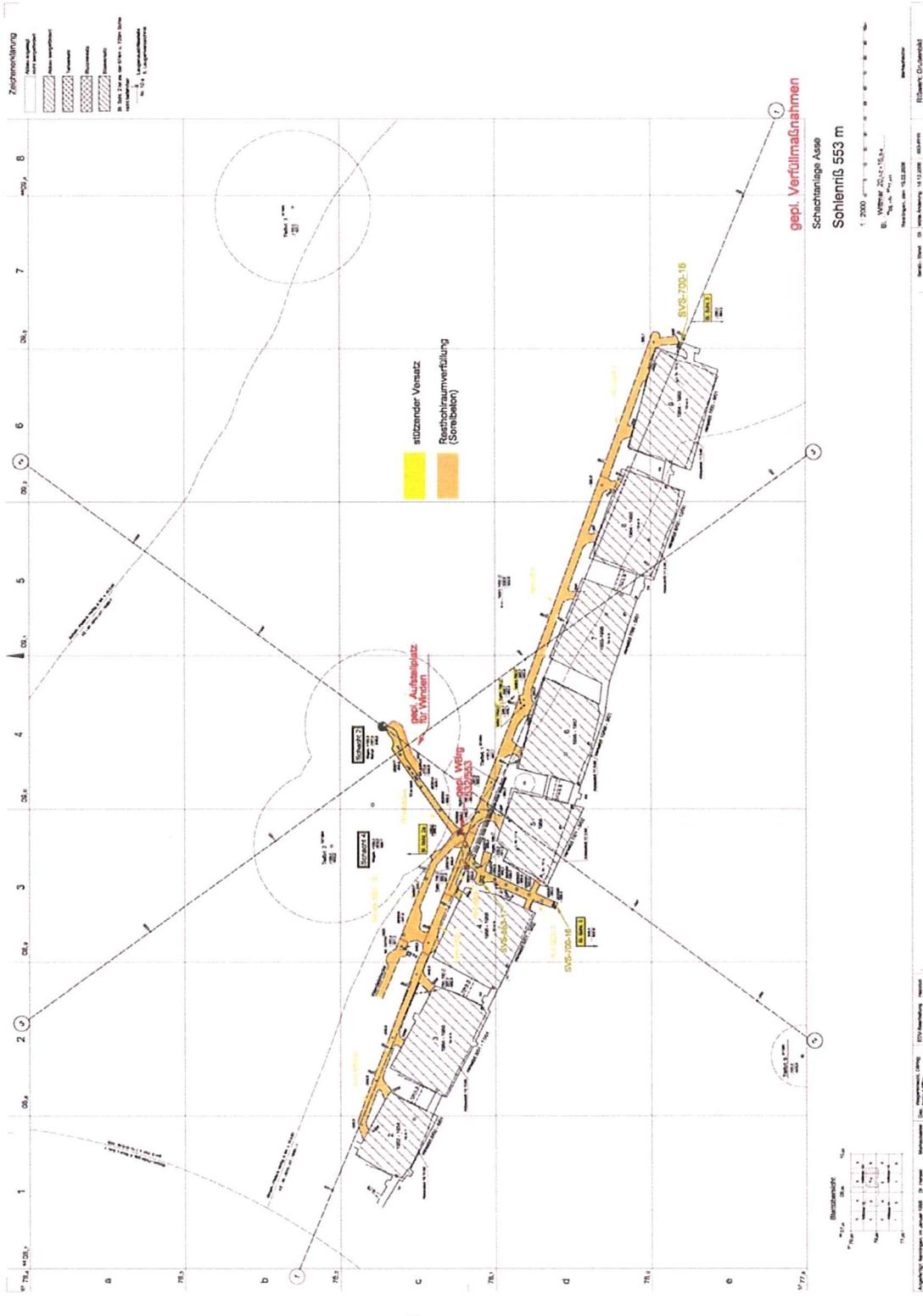
Anlage 4: Geplante technische Maßnahmen auf der 725-m-Sohle



# Anlage 5: Geplante technische Maßnahmen auf der 700-m-Sohle



Anlage 6: Geplante technische Maßnahmen auf der 553-m-Sohle

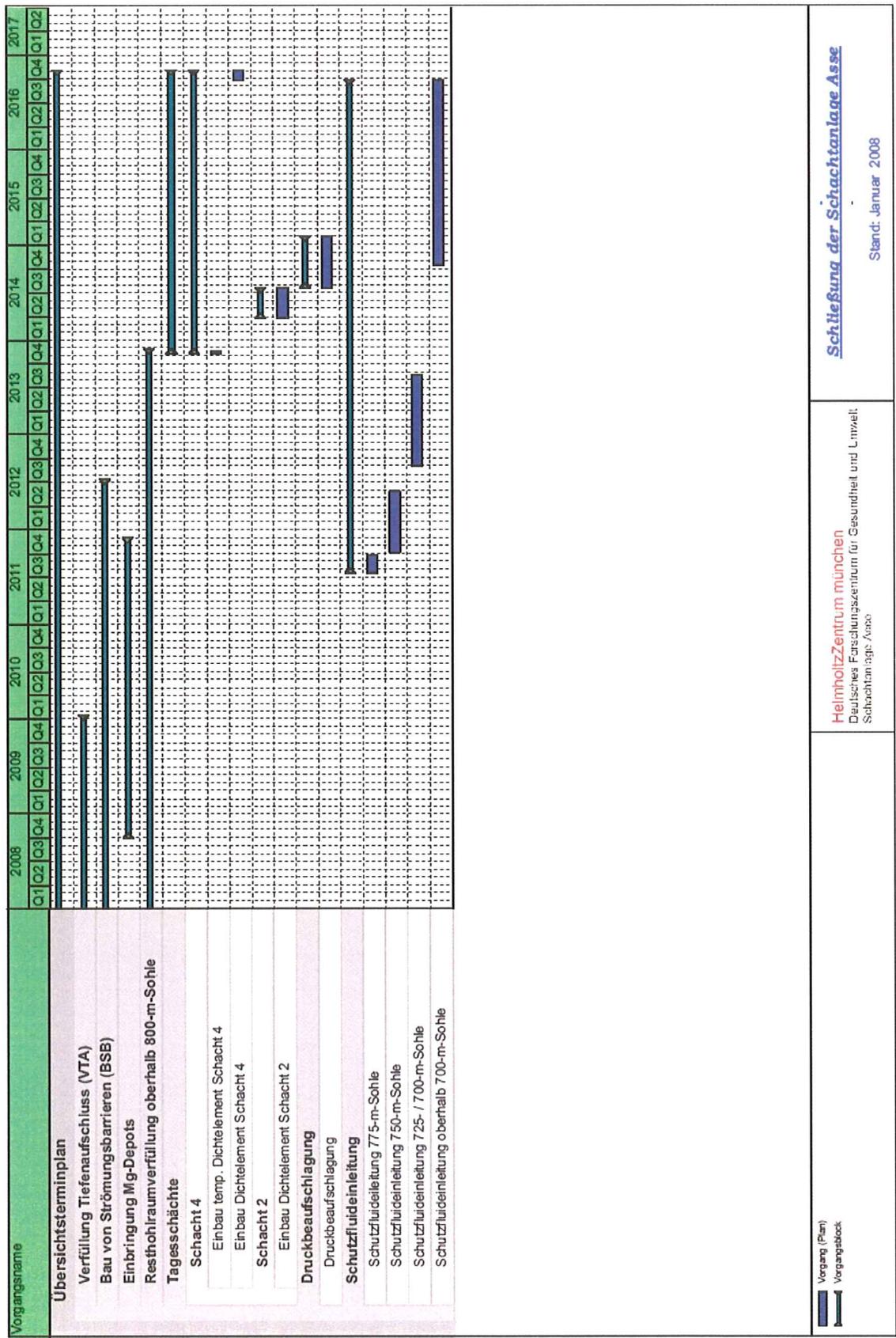








Anlage 10: Zeitlicher Ablauf der Schließungsmaßnahmen



Vorgang (Plan)  
Vorgangblock

HelmholtzZentrum münchen  
Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt  
Schichtanlage Asse

Schließung der Schichtanlage Asse

Stand: Januar 2008