

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

1. Einleitung	5
2. Standortbedingungen	7
2.1 Geologische Situation	7
2.2 Hydrogeologische Situation.....	10
2.3 Schachtanlage 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
3. Entwicklung des Systems ohne Schutzfluideinleitung	24
3.1 Entwicklung in der Betriebsphase	24
3.2 Natürliches Volllaufen des Grubengebäudes in der Nachbetriebsphase	25
3.3 Schlussfolgerungen.....	25
4. Rückholung	27
5. Sicherheitskonzept	28
6. Auswahl geeigneter Schließungsmaßnahmen	31
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
7.	Grundlegendes Konzept für die Schließung der SchachtanlageASSE	
	II	69
	Literaturverzeichnis	71
	Anlagen	72

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.

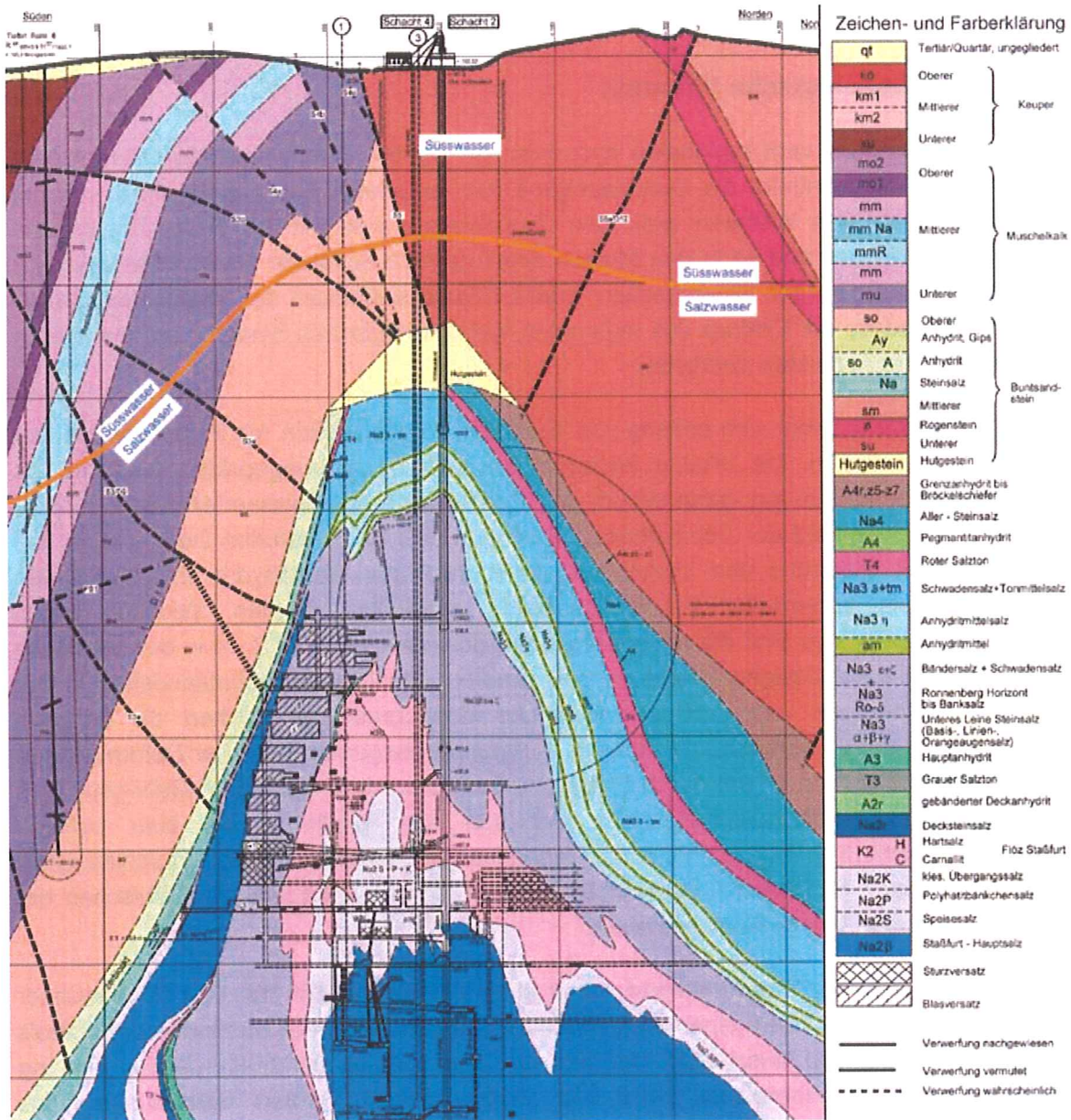


Abb. 2.1: Repräsentativer Schnitt durch den Asse-Salzsattel in querschlägiger Richtung mit geologischen Formationen und Störungszonen

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

- Das Wirtsgestein der Schachanlage 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. m³ 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. m³ 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 (K₂C, 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. m³ 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.

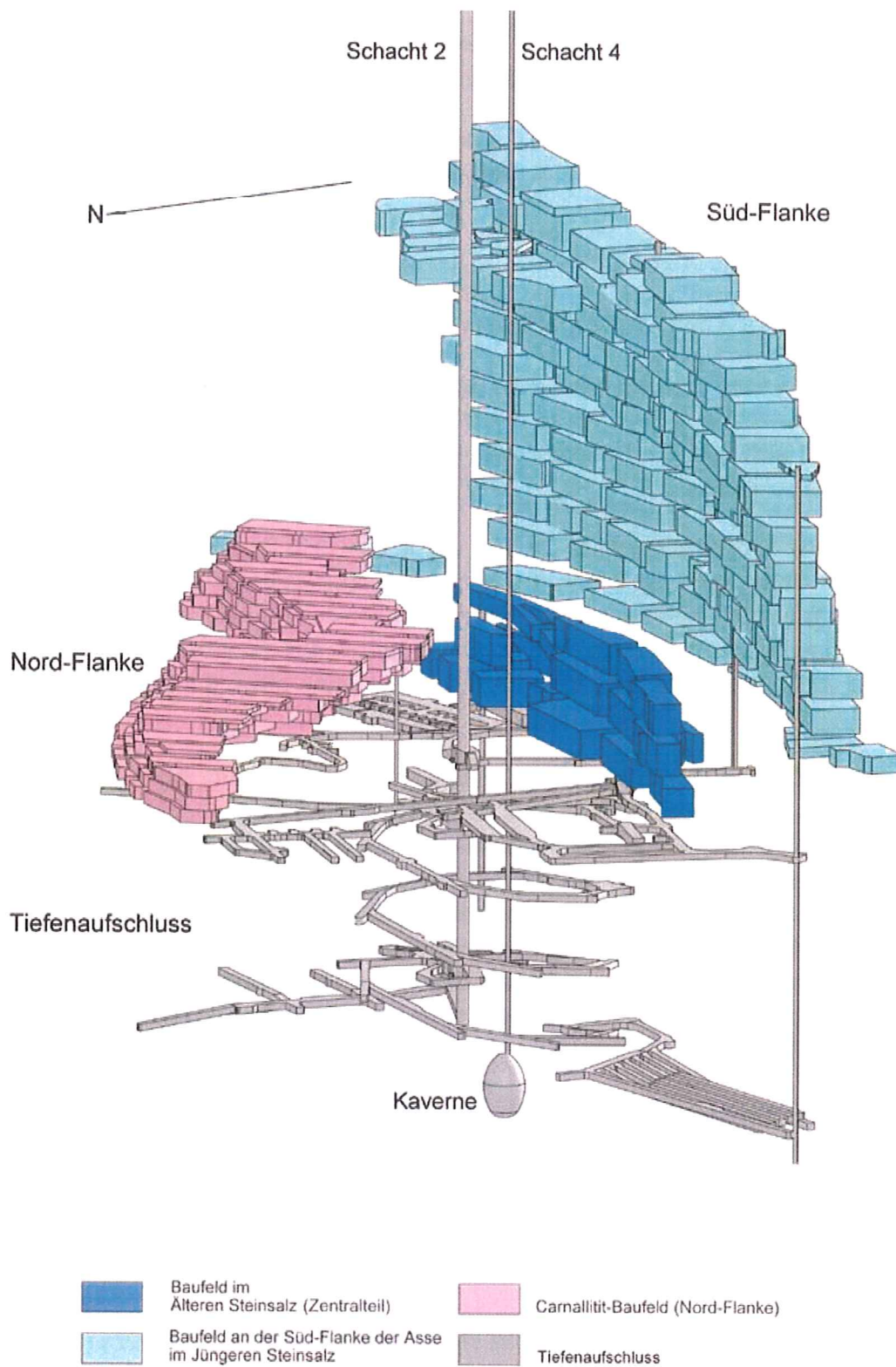


Abb. 2.2: Dreidimensionale Darstellung des Grubengebäudes der Schachanlage Asse II

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 m³. 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(Na₂) und 7/725(Na₂) 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 Schachtanlage Asse 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.

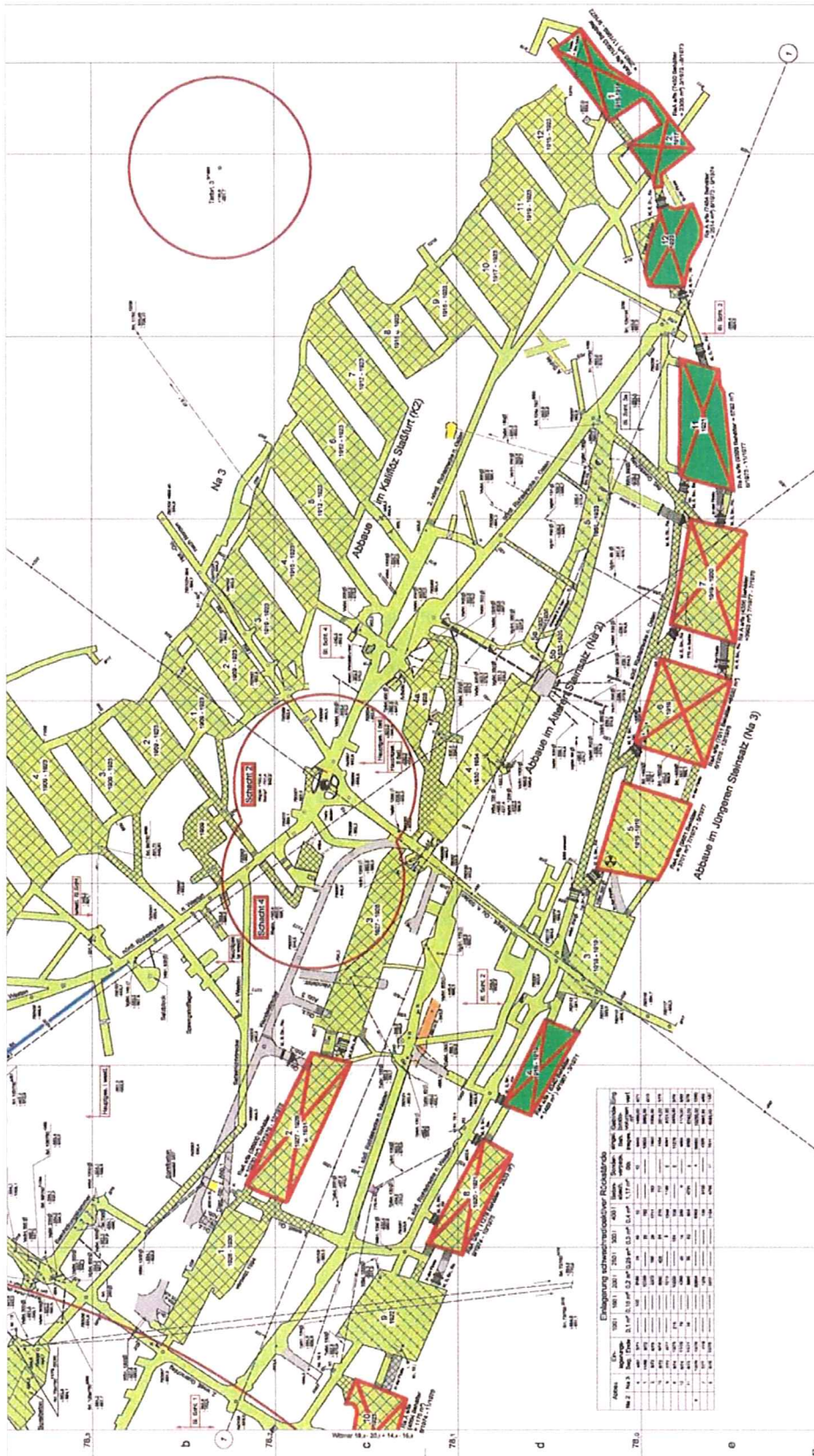


Abb. 2.3: Ausschnitt des Sohlenrisses der 750-m-Sohle – mit LAW-Einlagerungskammern (rot umrandet)

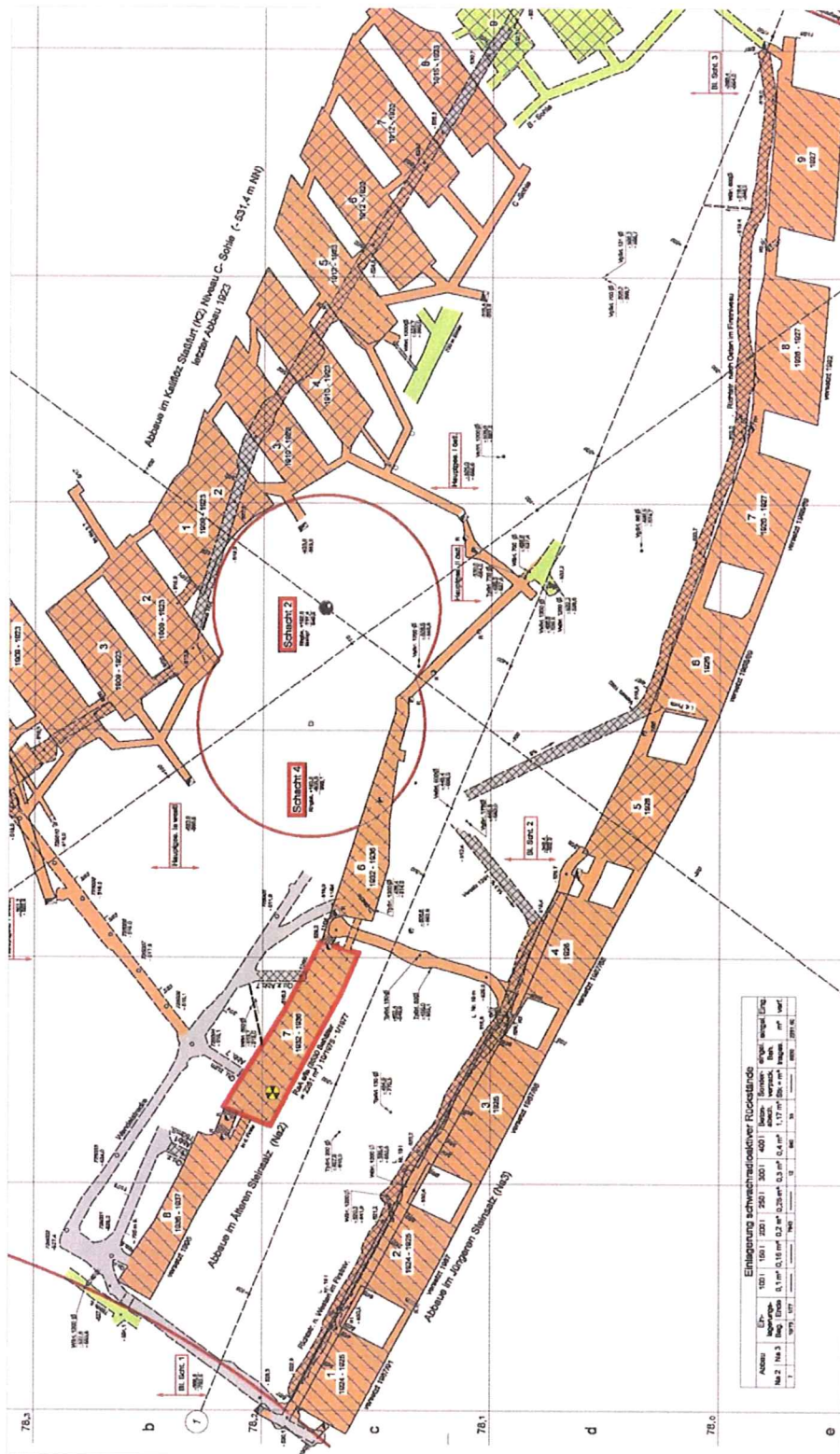


Abb. 2.4: Ausschnitt des Sohlenrisses der 725-m-Sohle – mit LAW-Einlagerungskammer (rot umrandet)

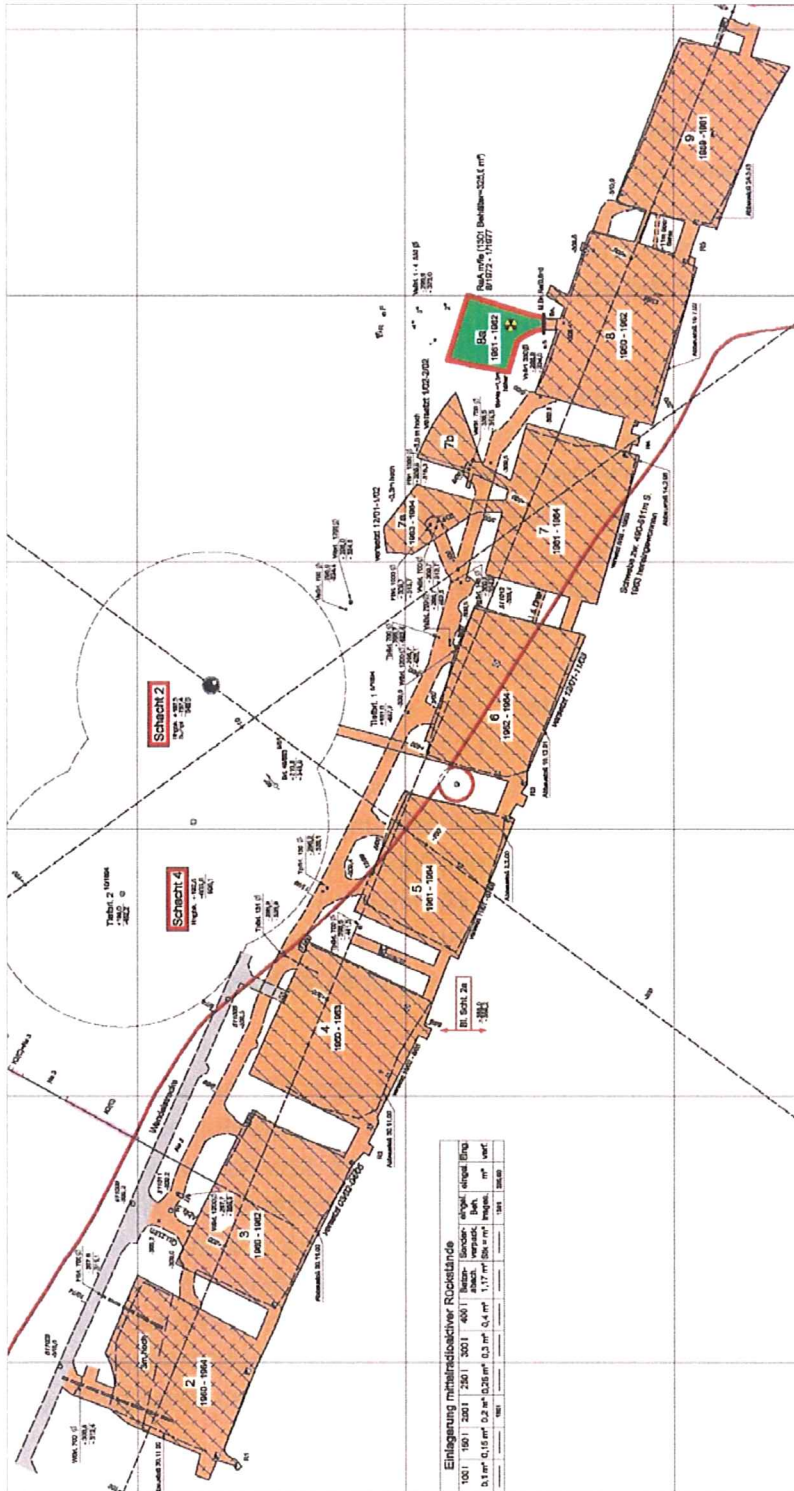


Abb. 2.5: Ausschnitt des Sohlenrisses der 511-m-Sohle – mit MAW-Einlagerungskammer (rot umrandet)

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 Mächtig- keiten von 8,5 m sowie zwischen der 725-m- und 750-m-Sohle von 14 m auf. Die Trag- elemente 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 Ver- schiebungsmaximums 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 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 CaSO_4 gesättigt, jedoch an MgCl_2 und 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.

- Die zutretende Salzlösung kann Minerale des Carnallitits lösen und diesen zersetzen.

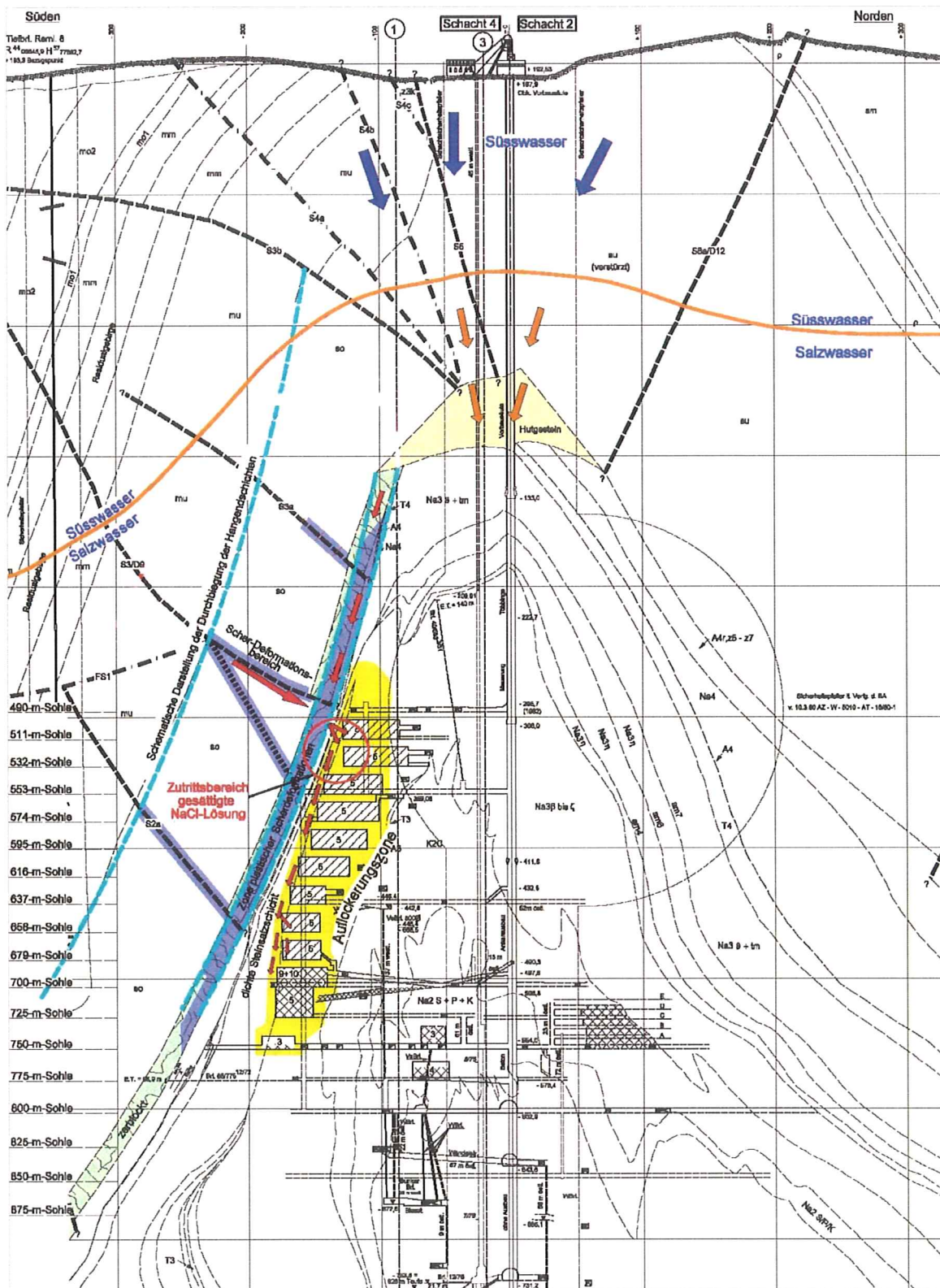


Abb. 2.6: Repräsentativer Schnitt durch den Asse-Salzsattel in querschlägiger Richtung mit Störungszonen und Modellvorstellung für den Salzlösungszutritt

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 $MgCl_2$ und $MgSO_4$ 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/m³ auf 1,32 t/m³ (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 m³/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