

Jahre später mit Schutzfluid aufgefüllt ist. Letzteres erfordert eine Einletrate für das Schutzfluid in das obere Baufeld in der Südflanke von durchschnittlich 1.600 m³/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 ₂ O]				[mol/1000mol H ₂ O]			
NaCl	KCl	MgCl ₂	MgSO ₄	Na ₂ Cl ₂	K ₂ Cl ₂	MgCl ₂	MgSO ₄
2,6	1,3	43,6	4,5	4,0	1,6	82,4	6,8
[g/l]				[mol/l]			
NaCl	KCl	MgCl ₂	MgSO ₄	Na ₂ Cl ₂	K ₂ Cl ₂	MgCl ₂	MgSO ₄
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 m³/h und damit um ein Vielfaches über der Abflussrate von etwa 1.500 m³/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 m³ 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 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 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 ⁽¹⁾	Kammervolumen ⁽²⁾ [m ³]	unverfüllter Hohlraum ⁽²⁾ [m ³]	Einlagerung
2/750(Na2)	22.800	Klein ⁽³⁾	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

⁽¹⁾ ELK: Einlagerungskammer

⁽²⁾ geschätzt

⁽³⁾ „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 CO₂ in die Einlagerungskammern eingetragen. Das Vermögen karbonatischer Baustoffe, gelöstes CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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.

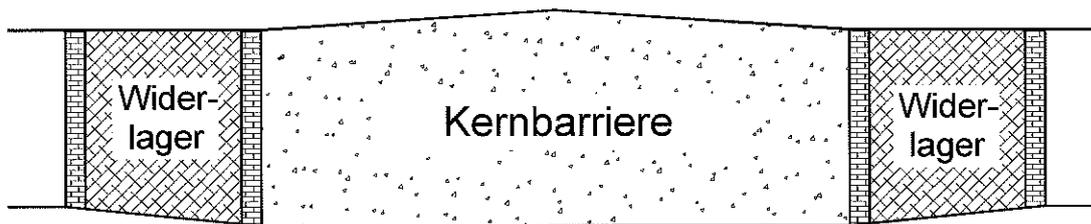


Abb. 6.1: Prinzipieller Aufbau einer Strömungsbarriere

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 Lenkungsfunction 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.

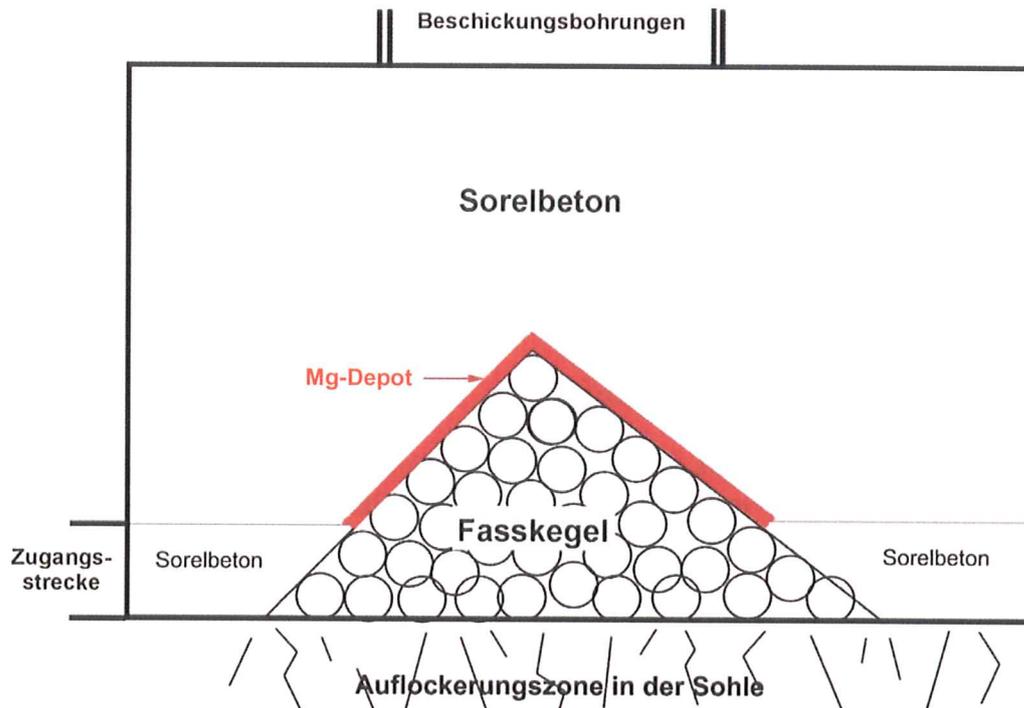


Abb. 6.2: Schematische Darstellung der geplanten Verfüllung der MAW-Kammer

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: $\geq 1,311 \text{ g/cm}^3$
 - 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 MgCl_2 -Konzentration: 376 g/l (Bandbreite: 370 bis 386 g/l)
 - Mittlere MgSO_4 -Konzentration: 39 g/l (Bandbreite: 29 bis 46 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)
 - CaSO₄-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/cm³
 - Bandbreite MgCl₂-Konzentration: 350 bis 450 g/l
 - Bandbreite MgSO₄-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/cm³. 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} m² und eine Permeabilität für Salzlösungen von $< 10^{-17}$ m².
- 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

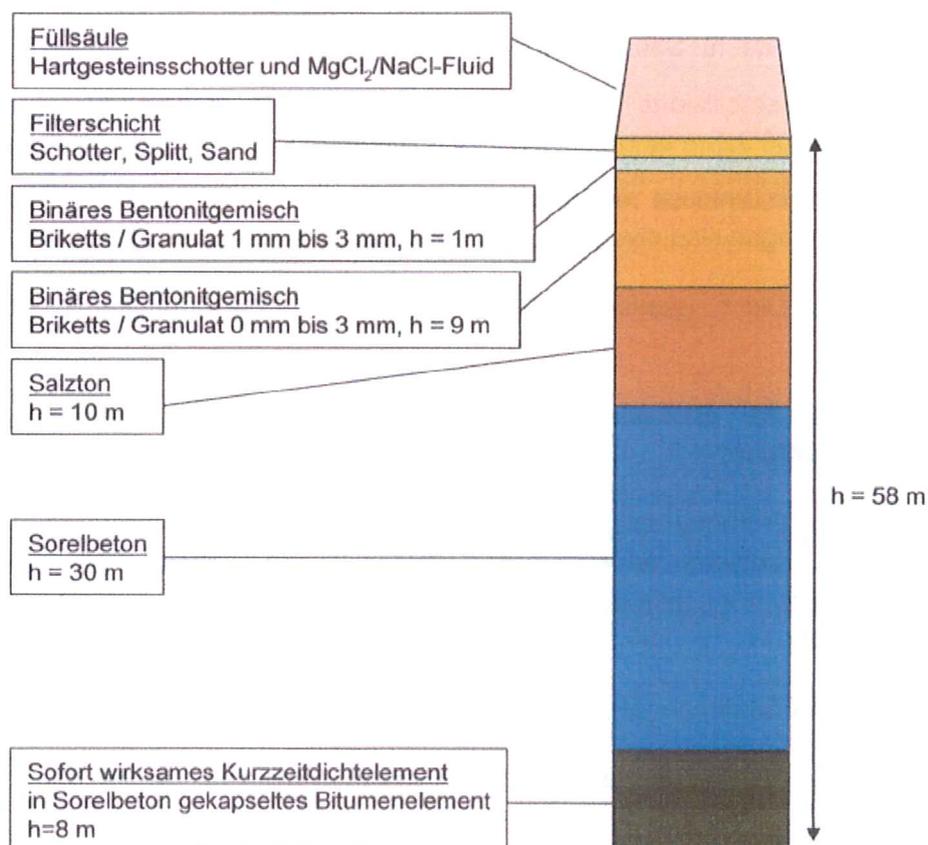
➤ diversitären Dichtungssystem

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 m³ 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 Baufelds 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.

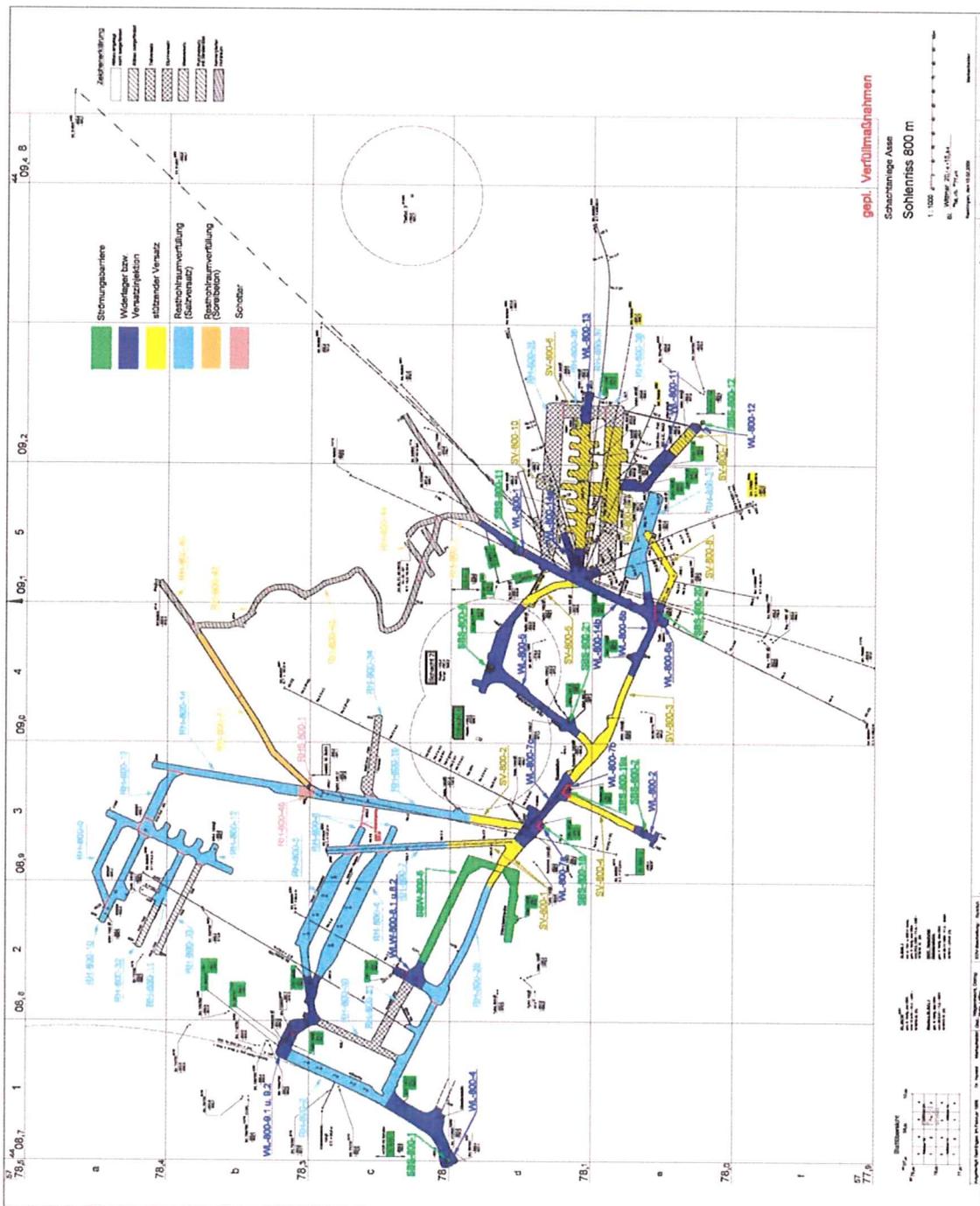
Das Schließungskonzept berücksichtigt die spezifischen Gegebenheiten im Grubengebäude und greift auf erprobte Techniken im Bergbau zurück. Für das vorliegende Schließungskonzept wurde der Nachweis der Langzeitsicherheit geführt. Es wurde gezeigt, dass bei qualitätsgerechter Umsetzung alle Schutzziele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

Literaturverzeichnis

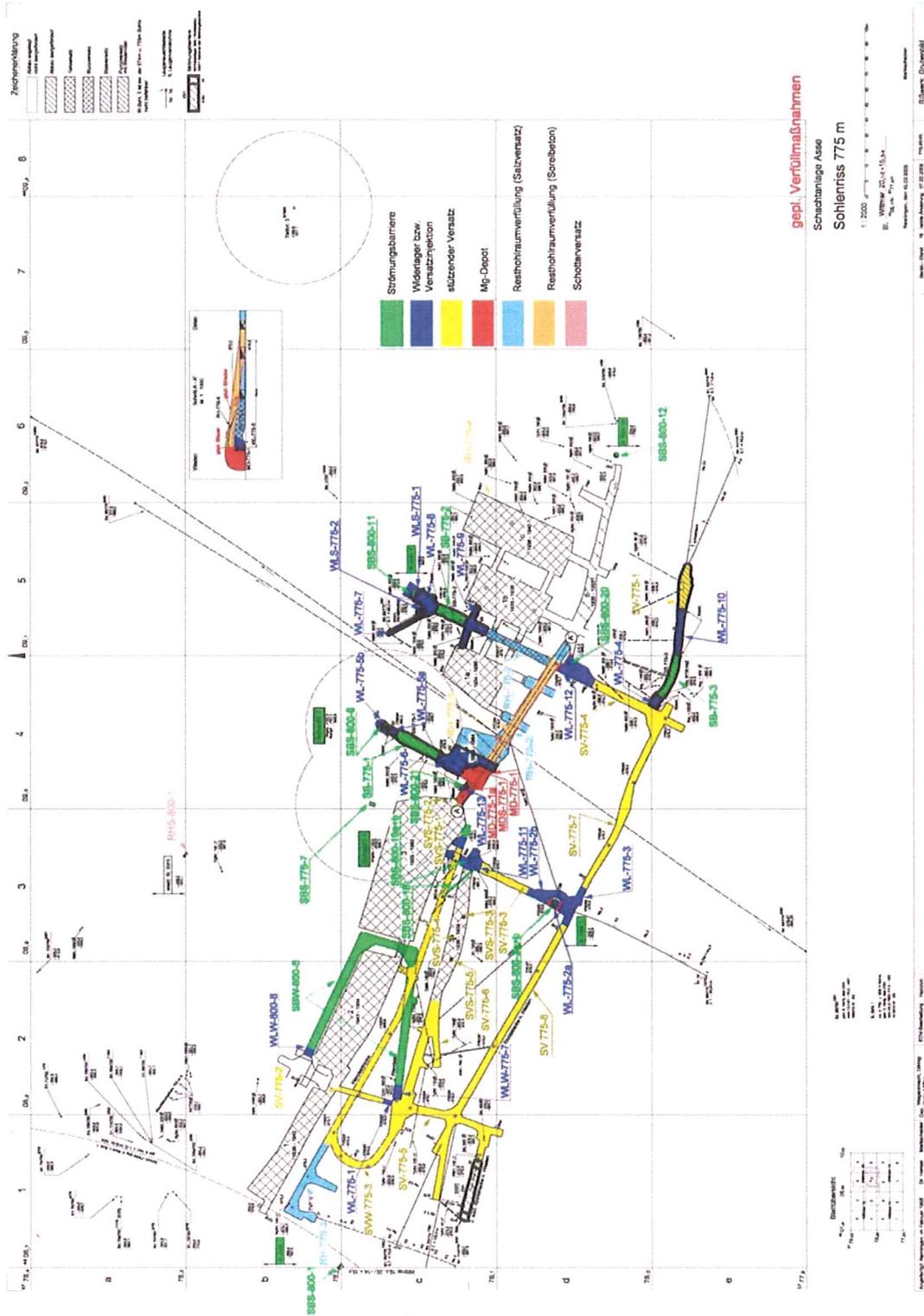
- /d`Ans 1933/ Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen. Herausgegeben von der Kali-Forschungs-Anstalt GmbH, Berlin 1933 (Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH).
- /FIC 2006/ Gutachtliche Stellungnahme zu einer Rückholung der in der Schachanlage Asse II eingelagerten 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.

Anlagen

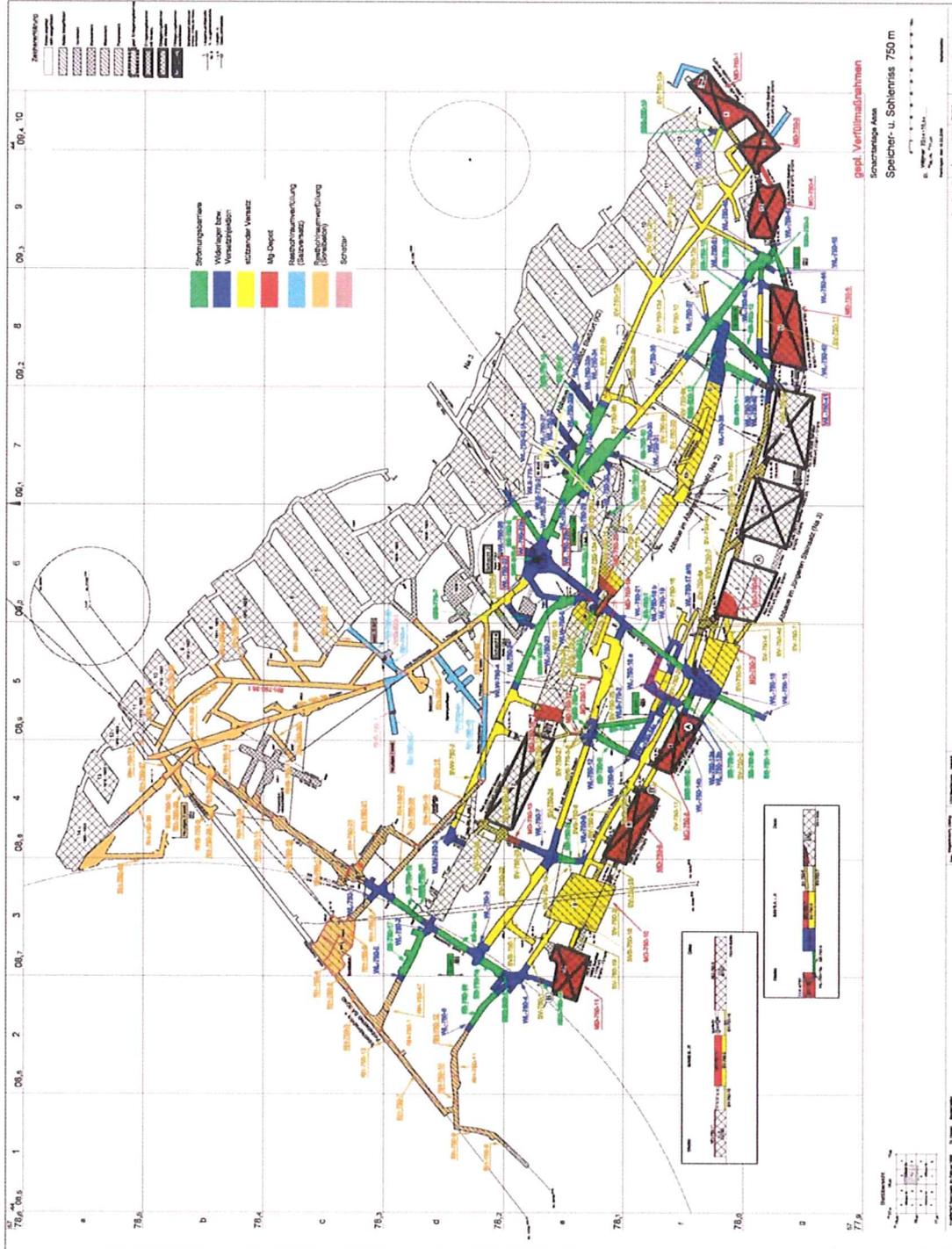
Anlage 1: Geplante technische Maßnahmen auf der 800-m-Sohle



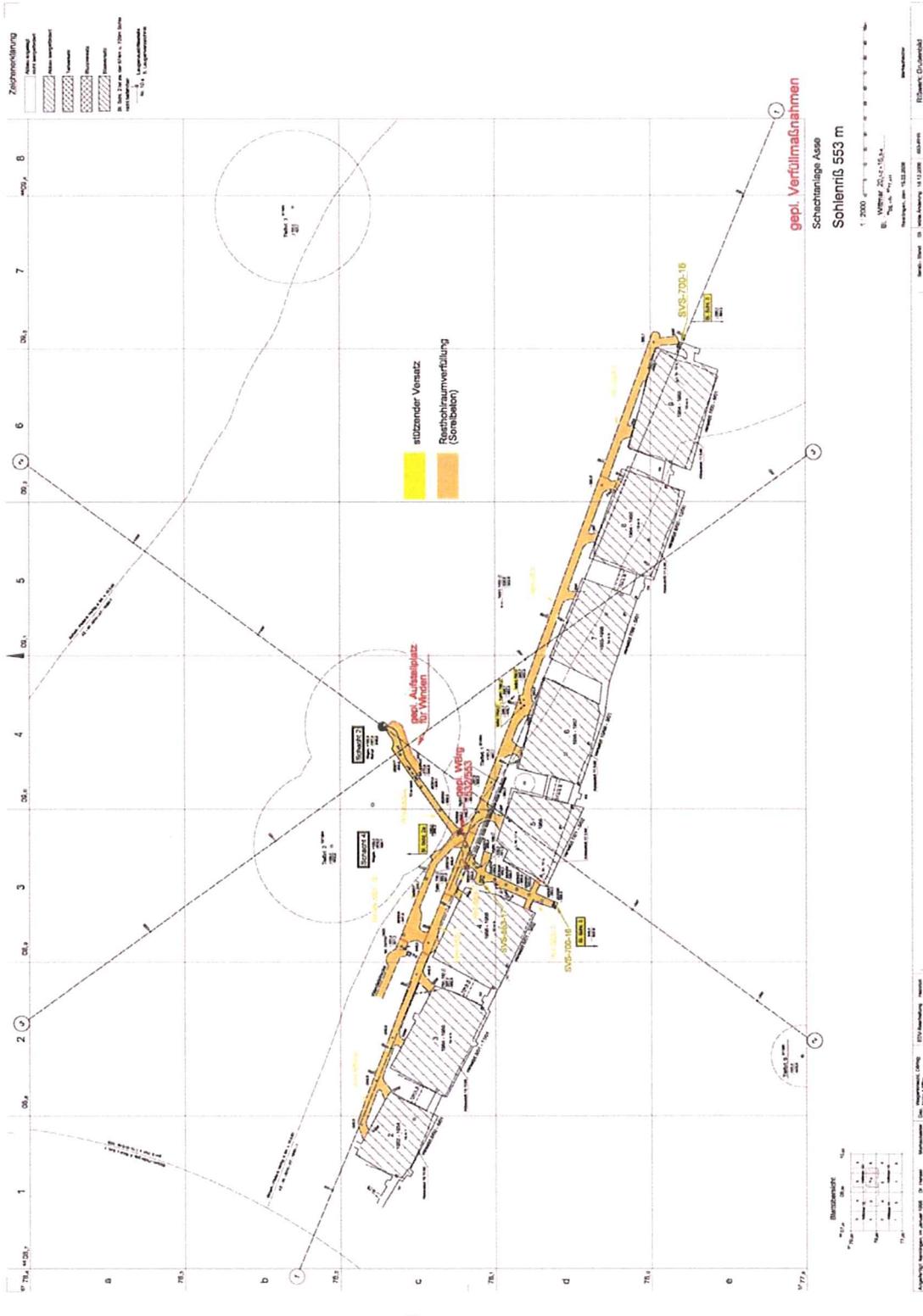
Anlage 2: Geplante technische Maßnahmen auf der 775-m-Sohle



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



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



Anlage 10: Zeitlicher Ablauf der Schließungsmaßnahmen

