



Herleitung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachtanlage Asse

Bearbeiter: V. Eikmeier

GSF FB Asse

Dr. B. Förster

Dr. G. Hensel

G. Kappei

Dr. N. Stockmann

L. Teichmann

DBE Tec

Stand:	02.10.2006
Revisionsnummer:	05

Inhalt	Blatt
1. Einleitung	4
2. Rahmenbedingungen	5
3. Varianten der Schließung	7
3.1 Schließung ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen (Trockenverwahrung)	7
3.2 Schließung mit Durchführung zusätzlicher Sicherungsmaßnahmen (Naßverwahrung)	7
4. Sicherheitskonzept	10
5. Schließungskonzept	13
5.1 Verfüllung des Tiefenaufschlusses unterhalb der 775-m-Sohle	13
5.2 Bau von Strömungsbarrieren im Nahbereich der LAW-Einlagerungskammern	14
5.3 Resthohlraumverfüllung in den LAW-Einlagerungskammern	15
5.4 Resthohlraumverfüllung in den Kali-Abbauen	15
5.5 Verfüllung des Bereiches vom Tiefenaufschluss bis zur 700-m-Sohle	16
5.6 Maßnahmen im Bereich der MAW-Einlagerungskammer	17
5.7 Verfüllung des Bereiches zwischen der 700-m- und 490-m-Sohle	17
5.8 Bohrungen durch die Steinsalz-Schutzschicht zum Deckgebirge und zu Anhydriten	19
5.9 Verfüllung und Verschluss der Tagesschächte 2 und 4	20
5.10 Rückbau der Tagesanlagen	20
6. Zeitplan	20
7. Zusammenfassung	21
Quellenverzeichnis	23

Anhang

Blatt

Stand und zeitlicher Verlauf der Versatzeinbringung in der Südflanke (Stand: 01/05)

24

Exemplar für BMBF und BMU

1. Einleitung

In der Schachtanlage 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 schwach- und mittelradioaktive Abfälle mit einer Gesamtaktivität von $7,8 \text{ E}+15 \text{ Bq}$ eingelagert. Nach der Einstellung der Einlagerung radioaktiver Abfälle wurden ausschließlich F+E – Arbeiten durchgeführt, die mit der Auflösung des GSF – Instituts für Tief Lagerung (IFT) am 30.02.1995 endeten. Da eine weitere Verwendung des Bergwerkes nicht beabsichtigt ist wird die Schließung der Schachtanlage vorbereitet wird.

Die Schließung der Schachtanlage Asse II erfolgt nach den Vorschriften des Bundesberggesetzes (BBergG). Gemäß § 53 BBergG ist ein Abschlussbetriebsplan einzureichen, der eine genaue Darstellung der technischen Durchführung der Schließungsmaßnahmen sowie Nachweise enthält, dass die in § 55 BBergG bezeichneten Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt werden. Der Langzeitsicherheitsnachweis für die Nachbetriebsphase wird in einem Sicherheitsbericht geführt.

Die wesentlichen Schutzziele für die Nachbetriebsphase der Schachtanlage Asse II leiten sich aus dem BBergG und den Konkretisierungen in den „Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk“ (RSK 1983), die Bezug nehmen auf die Strahlenschutzverordnung (StrlSchV), sowie aus dem Wasserrecht ab. Es handelt sich um:

- den 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 möglicher Senkungen an der Tagesoberfläche als Folge der Konvergenz der Resthohlräume des stillgelegten Bergwerkes.

Im Folgenden wird das standortspezifische Schließungskonzept für die Schachtanlage Asse II hergeleitet und beschrieben.

Zu Beginn werden die Standortbedingungen analysiert und hieraus die für die Schließung entscheidenden Rahmenbedingungen definiert (Kap. 2). Anschließend wird die Standortentwicklung in der Nachbetriebsphase ohne und mit Sicherungsmaßnahmen untersucht (Kap. 3), um das Erfordernis sowie die Art und den Umfang von Schließungsmaßnahmen abzuschätzen. Um die oben genannten gesetzlichen Schutzziele einzuhalten, ergeben sich an die Schließungsmaßnahmen die

Anforderungen den Schadstofftransport in die Biosphäre zu verzögern und/oder zu begrenzen sowie das Grubengebäude zu stabilisieren. Entsprechend diesen Anforderungen wurde ein Sicherheitskonzept entwickelt und die dafür vorgesehenen Schließungsmaßnahmen dargestellt (Kap. 4). Im Schließungskonzept (Kap. 5) werden die Schließungsmaßnahmen im Detail sowie in ihrer räumlichen und zeitlichen Abfolge beschrieben. Weiterhin wird die prinzipielle technische Machbarkeit der einzelnen Maßnahmen belegt. Die zeitliche Abfolge der Schließungsmaßnahmen wird in Form von Meilensteinen (Kap. 6) dargestellt. Die zusammenfassende Bewertung hat ergeben, dass das Schließungskonzept die Anforderungen des Sicherheitskonzeptes erfüllt (Kap. 7).

2. Rahmenbedingungen

Die Schachanlage Asse diente in der Zeit von 1909 bis 1964 ausschließlich der Mineralgewinnung. Die Einlagerung radioaktiver Abfälle wurde erst nach Einstellung der Förderung durchgeführt. Hieraus ergeben sich für das Schließungskonzept der Schachanlage Asse und den Langzeitsicherheitsnachweis sowie für die daraus abzuleitenden technischen Maßnahmen im Wesentlichen zwei Rahmenbedingungen:

1. Die zur Mineralgewinnung angelegten Abbaue im Leine-Steinsalz liegen in unmittelbarer Nähe zum südlichen Salzsattelrand. Die Mächtigkeit der Steinsalz-Barriere bis zum Rötanhydrit beträgt auf den oberen Sohlen nur wenige Meter. Das Abbaufeld ist durch einen hohen Durchbauungsgrad gekennzeichnet. Das Tragsystem, bestehend aus Pfeilern und Schweben, wurde mit Abmessungen gebaut, die zu einem nachgiebigen Tragverhalten mit begrenzter Tragfähigkeit geführt haben.

Infolge des wirkenden Gebirgsdrucks über die mehrere Jahrzehnte andauernde, unverfüllte Standzeit der Abbaue fand eine fortschreitende Entfestigung der Tragelemente statt, die zu hohen Gebirgsverformungen geführt hat. Aus den Pfeilerstauchungen konnte eine Durchbiegung der Südflanke von bis zu 6 m abgeleitet werden. Die Pfeiler und Schweben sind so stark beansprucht worden, dass deren Tragfähigkeitsmaximum überschritten wurde und sie sich überwiegend im Entfestigungszustand befinden. Ein Großteil der Schweben sind infolge dessen gebrochen und nehmen nur noch als Tragring am Lastabtrag teil. Der Lastabtrag erfolgt zunehmend über die Ränder des Baufeldes und das Deckgebirge in der Südflanke, das seinerseits mit Scherdeformationen und Dilatanz auf die Gebirgsspannungsumlagerung reagiert hat.

Aufgrund der bisher abgelaufenen Deformationen in der Südflanke ist die als Schutzschicht fungierende Steinsalz-Barriere geschädigt worden. Es ist davon auszugehen, dass sich um das Grubengebäude eine Auflockerungszone gebildet hat, die hydraulisch wirksam ist. Bei fortschreitender Deformation des Grubengebäudes in der Nachbetriebsphase muss mit einer Ausweitung dieser hydraulisch wirksamen Bereiche gerechnet werden.

Um den Verformungen entgegenzuwirken, wurden die Abbaue in der Südflanke versetzt (siehe Anhang). Je nach Einbaudichte und Kompaktionszeit haben sich bereits Versatzwiderstände aufgebaut, die das Tragsystem zunehmend stabilisieren. Dieses äußert sich nach Abschluss der Verfüllmaßnahme in einer degressiven Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten.

2. Dem Grubengebäude tritt eine an NaCl und CaSO₄ gesättigte Salzlösung mit einer Rate von zur Zeit etwa 12 m³/Tag zu. Die geophysikalischen, hydrogeologischen und geochemischen Untersuchungen weisen darauf hin, dass diese Salzlösung eine Mischung aus Oberflächen- und Formationswässern darstellt. Das Modell sieht ein Vordringen der Salzlösung vom Unteren Muschelkalk über einen gebirgsmechanisch entstandenen Scherdeformationsbereich im Oberen Buntsandstein bis zum Rötanhydrit vor und von dort durch die Steinsalz-Barriere zwischen der 511-m- und 574-m-Sohle in das Grubengebäude. Untergeordnet sind auch Lösungszuflüsse vom Verstürzten Deckgebirge über den Gipshut oder an diesem vorbei in den Rötanhydrit denkbar [1].

Es wird davon ausgegangen, dass die Schüttungsmenge des Salzlösungszutritts derzeit nicht durch Lösungsprozesse entlang des Fließweges im Steinsalz (Übertrittsstelle) sondern von gebirgsmechanischen Reaktionen, wie dem Öffnen oder Verschließen von Wegsamkeiten im Oberen Buntsandstein und Rötanhydrit durch Verformungen, beeinflusst wird. Auf Grund von gebirgsmechanischen Modellrechnungen wird eine fortgesetzte Schädigung der Schutzschicht prognostiziert, die das Schließen der Wegsamkeiten in absehbarer Zeit verhindert. Daher ist davon auszugehen, dass der derzeitige Salzlösungszutritt bis in die Nachbetriebsphase unvermindert anhält, sich aber durchaus auch durch weiter ablaufende Verformungen im Deckgebirge erhöhen kann. Eine Untersättigung an NaCl ist dann nicht mehr auszuschließen.

Der Chemismus der an der Südflanke zutretenden Salzlösung lässt den Schluss zu, dass eine hydraulische Verbindung zum Grundwasserbereich besteht. Nachdem die Salzlösung durch die Steinsalz-Barriere in das Grubengebäude eintritt, muss die gesamte Auflockerungszone um das Grubengebäude als potenzieller Migrationspfad angenommen werden. Eine Abdichtung der Zutrittsstellen kann nicht erfolgen, weil die Wegsamkeiten des Salzlösungszutritts nicht genau bekannt sind. Weiterhin ermöglicht die Gebirgsspannungssituation im Scherde-

formationsbereich, insbesondere die geringen Minimalspannungen, sowie die fortlaufende Scherbeanspruchung keine dauerhafte Abdichtung des Zutrittsbereichs.

3. Beim Kontakt der zutretenden Salzlösung mit dem zwischen der 532-m- und 750-m-Sohle großflächig aufgeschlossenen Carnallit würde es aufgrund der Löslichkeiten der im Carnallit enthaltenen Minerale zu Umlösungen kommen, die mit Gesteinszersetzungen einhergehen würden [2]. Die Salzlösung würde sich dabei vor allem an $MgCl_2$ aufsättigen. Die zersetzten Gebirgsbereiche des Kaliflözes würden sich gebirgsmechanisch wie Versatzkörper mit deutlich reduzierter Festigkeit verhalten. Da Carnallit nördlich der Abbaue der Südflanke (Leine-Steinsalz) durch die Wendelstrecke und die Abbaubegleitstrecken bis hinauf zur 532 m Sohle aufgeschlossen ist, würden solche Gesteinszersetzungen – in Verbindung mit Tragfähigkeitsverlusten im Versatz und in durchfeuchteten Gebirgsbereichen – zu erhöhten Verformungen im Grubengebäude bis zum Deckgebirge und damit zu einer gebirgsmechanischen Destabilisierung dieses ohnehin gebirgsmechanisch stark beanspruchten Gebirgsbereiches führen. Die Auswirkungen auf das Deckgebirge sind nicht abzuschätzen und die Bildung neuer Wegsamkeiten in der Steinsalz-Barriere ist dann nicht auszuschließen. Infolge dessen könnte die Zutrittsrate ansteigen und zunehmend auch an NaCl untersättigte Lösungen dem Grubengebäude zutreten. Auswirkungen auf die Tagesoberfläche in Form von Tagesbrüchen wären nicht mehr auszuschließen.

Weiterhin ist davon auszugehen, dass die in der Nachbetriebsphase zutretende Salzlösung in die Einlagerungskammern und dort in Kontakt mit den Abfallgebänden gelangt.

Zusammenfassend ist nach derzeitigem Kenntnisstand der für die Schachanlage Asse geltenden Rahmenbedingungen festzustellen, dass

- 1. ein vollständiger, trockener Einschluss der Abfälle aufgrund des bestehenden Salzlösungszutritts und der um die Einlagerungskammern entstandenen Auflockerungszone nicht möglich ist,**
- 2. der weitere Zulauf von Salzlösung in der Nachbetriebsphase zu gebirgsmechanischen Reaktionen im Grubengebäude und im Deckgebirge führen würde, die den dauerhaft sicheren Einschluss der Abfälle gefährden würden.**

Aus den genannten Rahmenbedingungen wird deutlich, dass nur durch standortspezifische Schließungsmaßnahmen die Einhaltung der Schutzziele sichergestellt und ein Langzeitsicherheitsnachweis erbracht werden kann.

3. Varianten der Schließung

3.1 Schließung ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen (Trockenverwahrung)

Bei dieser Variante wird vorausgesetzt, dass das Grubengebäude vollständig trocken verfüllt und die Tagesschächte im intakten Steinsalz der Leine-Serie dicht verschlossen werden.

Wie in Kapitel 2 dargelegt, wird davon ausgegangen, dass der Salzlösungszutritt in der Nachbetriebsphase andauert. Somit wird sich der Porenraum der versetzten Grube vom Tiefsten aufsteigend mit Salzlösung füllen. Beim Ansteigen der an NaCl gesättigten Lösung wird sich diese am aufgeschlossenen Carnallit mit $MgCl_2$ aufsättigen, wobei Carnallit zersetzt wird. Untersuchungen belegen eine schnelle Umlösung bis zum invarianten Punkt Q, wobei $1,0 \text{ m}^3$ an NaCl gesättigter Lösung ca. $1,6 \text{ m}^3$ des anstehenden Carnallits in alteriertes Gestein und Q-Lösung umbildet [2]. Bei einer langfristigen Umlösung bis zum Punkt R werden weitere $1,4 \text{ m}^3$ Carnallit zersetzt.

Falls sich der Sättigungsgrad der Lösung verringert und es zum Anstieg der Zutrittsrate käme, könnte das zu unkontrollierten Lösungsprozessen in der Südflanke führen. Bruchvorgänge im Grubengebäude und im Deckgebirge mit Auswirkungen auf die Tagesoberfläche, die zwar qualitativ aber nicht quantitativ eingeschätzt werden können, wären nicht auszuschließen.

Eine solche Entwicklung birgt für die sichere Schließung der Schachanlage Asse ein zu großes Risiko. Außerdem können die gebirgsmechanischen und transportrelevanten Ereignisabläufe im Grubengebäude quantitativ nicht prognostiziert werden. Damit ist die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises nicht möglich. Deshalb wird die Variante Trockenverwahrung nicht verfolgt.

3.2 Schließung mit Durchführung zusätzlicher Sicherungsmaßnahmen (Naßverwahrung)

Da in der Nachbetriebsphase ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen von einem Volllaufen der noch vorhandenen Porenräume mit Lösung und den sich daraus ergebenden Umlösungsprozessen mit den entsprechenden gebirgsmechanischen und hydrochemischen Konsequenzen ausgegangen werden muss, ist es sinnvoll, diese Porenräume im Grubengebäude gezielt mit einer Lösung weitgehend aufzufüllen, die sich im chemischen Gleichgewicht mit den anstehenden Salzen befindet (Schutzfluid). Dadurch wird gewährleistet, dass Umlösungen im Salzgestein, einschließlich der o. g. Gesteinszersetzungen, verhindert werden. Der Einsatz von Schutzfluid ist ein erprobtes Verfahren bei der Schließung von Kali- und Steinsalzbergwerken.

Diese in den Porenraum des Versatzmaterials und der aufgelockerten Gebirgsbereiche eingebrachte Schutzfluid ist ein zeitlich und technisch kontrollierbarer Vorgriff auf später sich im Grubengebäude ohnehin einstellende Verhältnisse.

Aus gebirgsmechanischer Sicht ergibt sich durch die Einleitung des Schutzfluids in die versetzten Hohlräume gegenüber dem natürlichen Volllaufen der Vorteil, dass sich bereits zu Beginn der Nachbetriebsphase ein dem Gebirgsdruck entgegen wirkender Fluiddruck aufbaut, der zur Stützung des Grubengebäudes und der Deckgebirgsschichten führt. Dadurch wird der Verformungsprozess im Grubengebäude und im Deckgebirge stark verlangsamt [3]. Die Senkungsraten an der Tagesoberfläche gehen ebenfalls deutlich zurück. Somit ist die Einleitung eines Schutzfluids aus gebirgsmechanischer Sicht als positiv zu bewerten und wird bis oberhalb des aufgeschlossenen Carnallitits (511-m-Sohle) als notwendig erachtet.

Da durch die Einleitung des Schutzfluids der Versatz und die aufgelockerten Gebirgsbereiche um das Grubengebäude durchfeuchtet werden, reduziert sich der Tragwiderstand des Systems aus Pfeilern, Schweben und Versatz. Dies würde ohne zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen zu temporär erhöhten Verformungsraten im Tragsystem sowie in deren Folge zu erhöhten Beanspruchungen des Deckgebirges bei der Schutzfluideinleitung führen. Damit würde sich auch das Risiko für Bruchvorgänge im Deckgebirge und damit eines signifikanten Anstiegs der Zutrittsrate des Salzlösungszutritts erhöhen. Diese negativen Effekte der Schutzfluideinleitung können jedoch durch einen pneumatischen Innendruck kompensiert werden [3].

Durch das Einleiten eines Schutzfluids werden zusätzlich geochemische Randbedingungen geschaffen, die sowohl den Nachweis der langzeitigen Funktionalität von technischen Maßnahmen im Nahbereich vereinfachen als auch die Beurteilung der langzeitigen Wirksamkeit von Rückhalteeffekten erst erlauben und damit deren Einbeziehung in den Langzeitsicherheitsnachweis überhaupt ermöglichen.

Fazit

Die Verfüllung der Porenräume im Grubengebäude mit einem Schutzfluid hat entscheidende positive Auswirkungen auf die langfristige Sicherheit des Grubengebäudes und die Langzeitstabilität von technischen Barrieren. Bei der Einleitung des Schutzfluids kann durch geeignete technische Maßnahmen eine ausreichende gebirgsmechanische Stabilisierung des Tragsystems gewährleistet werden. Da sich aus chemischen und hydraulischen Gesichtspunkten keine negativen Aspekte

ergeben, bildet die Einleitung eines Schutzfluids die Grundlage für das Schließungskonzept und macht die Nachweisführung der Langzeitsicherheit überhaupt erst möglich.

4. Sicherheitskonzept

Um die gesetzlichen Schutzziele einzuhalten, müssen die Schließungsmaßnahmen den Schadstofftransport in die Biosphäre verzögern und/oder begrenzen sowie das Grubengebäude stabilisieren. Entsprechend diesen Anforderungen wurde das im Folgenden dargestellte Sicherheitskonzept entwickelt und die dafür erforderlichen Schließungsmaßnahmen identifiziert:

1. das Begrenzen der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallbinden durch
 - das gezielte Beeinflussen des geochemischen Milieus in den Einlagerungskammern durch Mg-Depots und
 - die Behinderung des Lösungsaustausches in den Einlagerungsbereichen durch den Bau von Strömungsbarrieren.
2. das Begrenzen der Lösungsbewegung im Grubengebäude durch
 - das Reduzieren der Konvergenzrate in folge des Stützdrucks, der sich durch den Feststoffversatz und das Schutzfluid im Grubengebäude aufbaut,
 - das weitgehende Vermeiden der Entstehung konvektiver Strömungen in folge von Umlösungen am Carnallit durch das Einleiten des Schutzfluids,
 - die Vermeidung konvektiver Lösungsbewegungen im Grubengebäude durch das qualitätsgesicherte Einbringen des Schutzfluids, dessen Dichte mit der Teufe gleich bleibend bis zunehmend ist sowie
 - das Verfüllen noch offen stehender Abbaubegleitstrecken und der Wendelstrecke mit Sorelbeton
3. das Begrenzen der Auspressung von Lösungen aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge durch
 - die Hohlraumreduzierung durch Salzversatz und stützenden Versatz aus Sorelbeton,
 - den Stützdruck, der sich durch den Feststoffversatz und das Einleiten des Schutzfluids im Grubengebäude aufbaut; sowie
 - den Einbau von Schachtverschlüssen

4. die Vermeidung der Entstehung zusätzlicher hydraulischer Wegsamkeiten auf Grund von gebirgsmechanischen Reaktionen durch Umlösungen am Carnallit durch das Einbringen des Schutzfluids,
5. die Stabilisierung des Grubengebäudes durch Verfüllung des Grubengebäudes mit Versatz und Schutzfluid,
6. eine temporäre Stabilisierung des Grubengebäudes während der Einbringung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle durch einen pneumatischen Stützdruck.

Das Schließungskonzept der Schachanlage Asse sieht demnach die systematische Verfüllung des Grubengebäudes vom Grubentiefsten mit Salzversatz und das anschließende Einleiten eines Schutzfluids vor. Das Einleiten des Schutzfluids soll in fünf Phasen erfolgen, wobei die Zusammensetzung und die Anforderungen an die Dichte des Schutzfluids variieren (siehe Tabelle 1). Die Zusammensetzungen und Dichten des Schutzfluids werden in Kapitel 5 beschrieben. In Phase 1 wird Salzversatz und anschließend Schutzfluid in den Tiefenaufschluss eingebracht. In den Phasen 2 bis 4 wird das Porenvolumen von der 775-m- bis einschließlich der 700-m-Sohle mit Schutzfluid aufgefüllt, das zusätzlich mit Brucit in Suspension angereichert wird. Der Porenraum der bereits mit Salzversatz verfüllten Grubenbaue oberhalb der 700-m-Sohle wird in Phase 5 mit Schutzfluid gefüllt.

In dieser systematischen Verfüllung der Grube sind der Bau von Strömungsbarrieren im Nahbereich der Einlagerungskammern und eine Resthohlraumverfüllung in den Einlagerungskammern mit Mg-Depot vorgesehen. Die Verfüllung der Tagesschächte 2 und 4 erfolgt unterhalb der Dichtelemente mit Sorelbeton. Ausgewählte Bereiche werden dabei zur Lenkung der Fluidbewegungen als Strömungsbarrieren ausgelegt. Der konzeptionelle Aufbau der Dichtelemente erfolgte auf Grundlage der Erfahrungen aus dem Kali- und Steinsalzbergbau, der Kavernentechnik sowie in Anlehnung an das Forschungsvorhaben „Schachtverfüllung Salzdetfurth“ unter Berücksichtigung der standortspezifischen Erfordernisse. Damit wird gewährleistet, dass beide Schächte gegenüber dem Deckgebirge dicht verschlossen werden.

Die Auslegung der Strömungsbarrieren, Mg-Depots und Schachtverschlüsse erfolgt so, dass eine ausreichende Begrenzung der Schadstoffausbreitung gewährleistet wird.

Ein zügiges Fortführen der Schließungsarbeiten ist wegen des vorhandenen Salzlösungszutritts und dessen nicht prognostizierbare Entwicklung geboten.

Das Einleiten von Schutzfluid, der Einbau der geplanten Strömungsbarrieren, das Einbringen von Mg-Depot in den Einlagerungskammern, das Verfüllen der zur Zeit noch offenstehenden Abbau-begleitstrecken mit Sorelbeton und das Verschließen der Tagesschächte sind für das Erreichen der Schutzziele zwingend erforderlich.

Exemplar für BMBF und BMU

Tabelle 1: Phasen der Schutzfluideinleitung

Phase Nr.	Grubenbereich	Schutzfluidniveau [m]	Voraussetzungen für den Beginn der Phase
1	Tiefenaufschluß	780	Infrastruktur ist verlegt
2	775-m-Sohle	760	SB auf der 775-m-Sohle eingebaut, unverfüllte Grubenbaue versetzt, Infrastruktur verlegt
3	750-m-Sohle	730	SB und Mg-Depots auf der 750-m-Sohle eingebaut, unverfüllte Grubenbaue versetzt, Infrastruktur verlegt
4	725-m- und 700-m-Sohle	685	SB und Mg-Depots auf der 725-m- sowie 700-m-Sohle eingebaut, unverfüllte Grubenbaue versetzt, erwartete Gebirgsverformungen im prognostizierten Bereich, Infrastruktur verlegt
5	679-m- bis 490-m-Sohle	490	alle Grubenbaue versetzt, SB im Bereich von MAW eingebaut; Infrastruktur verlegt, Abbaubegleitstrecken, Wendelstrecke und Tagesschächte verfüllt, Schachtverschluss Schacht 2 eingebaut, temporärer Schachtverschluss Schacht 4 installiert, pneumatischer Innendruck im Grubengebäude auf 1,0 bis 1,5 MPa erhöht.

SB Strömungsbarrieren

5. Schließungskonzept

5.1 Verfüllung des Tiefenaufschlusses unterhalb der 775-m-Sohle

Die Verfüllung der Abbaue in der Südflanke mit Salzversatz ist im I. Quartal 2004 abgeschlossen worden. Im Sinne einer zügigen Fortführung der Schließungsmaßnahmen wurde anschließend mit der Verfüllung des Tiefenaufschlusses begonnen. Der Tiefenaufschluss umfasst die Grubenbaue

vom Grubentiefsten bis zum Sohlenniveau der 775-m-Sohle. Mit der Verfüllung des Tiefenaufschlusses werden folgende Ziele verfolgt:

- Reduzierung konvergenzaktiver Hohlraumvolumina und
- frühzeitige Stützwirkung des eingebrachten Versatzes entgegen dem Gebirgsdruck bzw. der Hohlraumkonvergenz

Das Schutzfluid, welches zur Verfüllung des Tiefenaufschlusses eingeleitet wird, muss folgenden Anforderungen genügen:

- Lösungsdichte: $\geq 1,311 \text{ g/cm}^3$
- MgCl_2 -Konzentration: $\geq 375 \text{ g/l}$

Bei der Verfüllung der Grubenbaue im Tiefenaufschluss mit Salzversatz wird eine integrale Einbaudichte von mindestens $1,46 \text{ g/cm}^3$ für den gesamten Tiefenaufschluss gewährleistet. Zur Verfüllung der Schächte und Blindschächte sowie von Bohrungen und einigen horizontalen Streckenabschnitten wird Sorelbeton mit einer Einbaudichte von ca. $1,9 \text{ g/cm}^3$ oder Schotter mit einer Einbaudichte von ca. $1,8 \text{ g/cm}^3$ eingebracht. Das Schutzfluid wird anschließend in den Porenraum des Versatzes eingeleitet. Die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids darf sich durch Wechselwirkungen mit dem Salzversatz nicht soweit ändern, dass die o.g. Anforderungen nicht mehr eingehalten werden

Im Rahmen der Verfüllung des Tiefenaufschlusses ist auch das Einkürzen der Schächte, die Verfüllung der Kaverne mit Schotter, die Verfüllung der vorhandenen Bohrungen sowie der Einbau von setzungsarmen Sorelbetonsäulen in den Schächten Asse 2 und 4 bis zur 800-m-Sohle entsprechend dem Verfüllkonzept für die Tagesschächte auszuführen.

Die geplante Verfüllung aller Grubenbaue, die den Tiefenaufschluss mit dem darüber liegenden Grubengebäude verbinden, ist in Kapitel 5.5 beschrieben.

5.2 Bau von Strömungsbarrieren im Nahbereich der LAW-Einlagerungskammern

In der Nachbetriebsphase werden durch die Strömungsbarrieren Fluidbewegungen im Nahbereich der Einlagerungskammern gezielt beeinflusst. Die Kanalisierung von Lösungen aus tieferen oder benachbarten Grubenbereichen an den Einlagerungskammern vorbei und die Lenkung von Lösungsbewegungen im Nahbereich der Einlagerungskammern sind sicherheitsrelevant, da hier-

durch der Lösungsaustausch im Porenvolumen der Einlagerungskammern eingeschränkt wird. Die festgelegte Anordnung der Strömungsbarrieren genügt diesen Anforderungen. Aus Transportmodellierungen wurden allgemeine Anforderungen für die Strömungsbarrieren abgeleitet. Die ausgewählten Standorte sind unter Berücksichtigung der spezifischen gebirgsmechanischen Situation auf ihre Eignung geprüft worden. Der Nachweis der technischen Machbarkeit ist durch den Bau eines Prototyps erbracht worden. Die Ausführungsplanungen für die Strömungsbarrieren beinhalten Standorterkundungen, Auslegungsrechnungen und bautechnische Nachweise, in denen standortspezifisch der Nachweis der Funktionalität geführt wird. Im Rahmen der Ausführungsplanung werden die hydraulischen Anforderungen präzisiert und daraus Vorgaben für die bautechnische Umsetzung abgeleitet [4].

Um Umläufigkeiten an den Strömungsbarrieren, die z. T. im Carnallitit errichtet werden müssen, im Bereich zwischen der 775-m- und 700-m-Sohle zu vermeiden und damit deren Wirksamkeit zu gewährleisten, müssen Umlösungen am Carnallitit weitgehend vermieden werden. Daher wird bis zum Firstniveau der 700-m-Sohle ein Schutzfluid eingebracht, dessen Zusammensetzung sich bei Gebirgstemperatur nahe des chemischen Gleichgewichts mit dem anstehenden Carnallitit befindet.

5.3 Resthohlraumverfüllung in den LAW-Einlagerungskammern

Die Einlagerungskammern auf der 750-m- und 725-m-Sohle sind nicht alle vollständig mit Abfall und Salzversatz verfüllt. Die unverfüllten Resthohlräume sollen entweder mit Mg-Depot (Brucit-Granulat und -Suspension) zur Beeinflussung des geochemischen Milieus oder mit stützendem Versatz (Sorelbeton) zur Einschränkung der Konvergenz sowie der verbleibende Porenraum mit Schutzfluid – siehe Kapitel 5.2 – verfüllt werden. Im Rahmen von Modellrechnungen zur Entwicklung des geochemischen Milieus wurden die kammer-spezifisch einzubringenden Mengen ermittelt. Die prinzipielle technische Machbarkeit der Errichtung von Mg-Depots ist belegt [5].

Die Nachverfüllung der Einlagerungskammern erfolgt über Bohrungen. Mit den Maßnahmen kann erst begonnen werden, wenn die jeweilige Einlagerungskammer durch Strömungsbarrieren oder Verschlussbauwerke vom übrigen Grubengebäude separiert ist.

5.4 Resthohlraumverfüllung in den Kali-Abbauen

Gebirgsmechanische Untersuchungen haben gezeigt, dass die vor ca. 80 Jahren eingebrachten Rückstände aus der Kalibiaufbereitung (Altversatz) einen Kompaktierungszustand erreicht haben,

der eine tragende Wirkung ausübt [3]. Da die markscheiderischen Unterlagen aus der Gewinnungsphase unverfüllte Hohlräume vermuten ließen, wurde der Verfüllungsgrad durch Auffahrungen im Firstbereich des Carnallitbaufelds erkundet. Das anfallende Haufwerk wurde für die Verfüllung der vorgefundenen Hohlräume verwendet. Die übrigen Hohlräume sowie die Erkundungsstrecken wurden bzw. werden mit Salzversatz verfüllt. Durch die Kompaktion des Versatzes ist der Porenraum auf durchschnittlich 22 % reduziert.

Der westliche Blindschacht im Carnallitbaufeld wird zwischen der 800- und 750-m-Sohle mit Schotter verfüllt. Über diesen Blindschacht soll die durch Konvergenz aus dem Tiefenaufschluss ausgepresste Salzlösung in weiter Entfernung von den Einlagerungsbereichen abgeführt sowie eine signifikante Erhöhung des Fluiddrucks im Tiefenaufschluss durch Konvergenz verhindert werden.

5.5 Verfüllung des Bereiches vom Tiefenaufschluss bis zur 700-m-Sohle

Mit Ausnahme des westlichen Blindschachtes und einer Bohrung im Firstniveau der Kammer 4/775 werden vertikale Grubenbaue mit Sorelbeton verfüllt. Gleiches gilt für Auffahrungen und Bohrungen, die zum Einbringen von Versatzstoffen oder für das Einleiten des Schutzfluids zwischen der 800-m- und 700-m-Sohle gestoßen werden oder bereits aufgefahren worden sind. Dadurch sollen Kanalisierungen des vertikalen Schadstofftransports im Nahbereich der Einlagerungskammern und damit verkürzte Transportzeiten im Grubengebäude unterbunden werden.

Die übrigen, noch unverfüllten Grubenbaue von der 775- bis zur 700-m-Sohle werden mit Sorelbeton, Salzgrus oder Schotter verfüllt, wenn diese zur technischen Umsetzung der Maßnahmen (siehe Kapitel 5.2 bis 5.4) oder für den Grubenbetrieb bzw. die Wetterführung nicht mehr benötigt werden. Anschließend wird der Porenraum mit Schutzfluid gefüllt.

Das Schutzfluid, welches im Nahbereich der Einlagerungskammern eingesetzt werden soll, muss daher folgenden Anforderungen genügen:

- 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)
- KCl-Konzentration Bandbreite 11 bis 24 g/l

- CaSO_4 -Konzentration Bandbreite 0 bis 2 g/l

Außerdem wird dieses Schutzfluid mit Brucit ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) angereichert, wodurch der pH-Wert des Schutzfluids im schwach alkalischen Bereich gepuffert wird. Der Brucit-Gehalt in Suspension wird entsprechend der Anforderung eingegrenzt, die sich aus den Modellrechnungen zum geochemischen Milieu in den Einlagerungskammern ergeben.

Der zeitliche Ablauf dieser Maßnahme wird im Schutzfluidkonzept beschrieben [6]. Die Abfolge der Errichtung der Strömungsbarrieren hängt vom Einleitregime des Schutzfluids, das mehrere Phasen aufweist (siehe Tabelle 1), und dem Einbau des Mg-Depots ab.

5.6 Maßnahmen im Bereich der MAW–Einlagerungskammer

In der MAW-Kammer wird Brucit-Granulat auf dem Fasskegel aufgebracht. Der noch verbleibende, unverfüllte Hohlraum wird dann vollständig mit Sorelbeton verfüllt. Dieses Verfüllkonzept behindert die Konvergenz der MAW-Kammer stark. Die Beschickungsbohrlöcher in der Firste und die Beschickungskammer, einschließlich der Zugangsstrecken auf der 490-m-Sohle, werden mit Sorelbeton verfüllt.

Die Schwebelücke zwischen der MAW-Kammer und dem darunter liegenden Abbau 8a/532 ist durch gebirgsmechanische Beanspruchungen aufgelockert. Nach derzeitigem Erkenntnisstand sind diese Schwebelücke sowie der mit der Strahlenschutzmauer und mit Salzbeton verschlossene Durchbruch die wesentlichen Migrationspfade für Fluide in die MAW-Kammer bzw. aus dieser heraus. Zur Behinderung einer möglichen Schadstoffausbreitung werden die unterhalb der MAW-Kammer liegenden Abbaue 8a und 8b auf der 532-m-Sohle im Firstniveau vom Baufeld in der Südflanke separiert. Deshalb wird in die derzeit noch zugänglichen Zugänge dieser Abbaue Sorelbeton eingebracht.

5.7 Verfüllung des Bereiches zwischen der 700-m- und der 490-m-Sohle

Die Abbaue ab der 700-m-Sohle wurden mit Salzversatz verfüllt. Der Porenraum dieser Versatzkörper und der aufgelockerten Gebirgsbereiche im Wirtsgestein oberhalb der 700-m-Sohle wird auch mit Schutzfluid gefüllt. Dieses Schutzfluid muss folgenden Anforderungen genügen:

- Bandbreite der Lösungsdichte: 1,30 bis 1,32 g/cm^3
- Bandbreite der MgCl_2 -Konzentration: 350 bis 450 g/l

- Bandbreite MgSO_4 -Konzentration: 5 bis 46 g/l
- Bandbreite KCl-Konzentration: 2 bis 20 g/l

Damit wird ein Schutzfluid eingeleitet, dessen mittlere Lösungszusammensetzung sich nahe der einer R-Lösung befindet, dessen Lösungsdichte die mittlere Dichte einer R-Lösung aber nicht überschreitet. Dieses Schutzfluid wird bis zum Grubenhöchsten im Bereich der 490-m-Sohle eingeleitet.

Das Schutzfluid ruft keine Änderungen der Lösungsdichte durch Umlösungen am Carnallit hervor. Gleiches gilt für den Kontakt mit den anstehenden Steinsalz. Im Kontakt mit dem Salzversatz können lokal und kurzzeitig Veränderungen der Lösungsdichte auftreten. Diese Löseprozesse erfolgen instantan mit dem Einleiten des Schutzfluids und haben keinen Einfluß auf den Schadstofftransport.

Die unverfüllten Bereiche der Abbaubegleitstrecken, die Wendelstrecke und die Blindschächte werden von der 700-m-Sohle bis einschließlich der 490-m-Sohle mit Sorelbeton verfüllt.

Auf der Grundlage gebirgsmechanischer Modellrechnungen [3] ist davon auszugehen, dass bei der Einleitung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle ohne eine Stabilisierung mit Druckluft erhöhte Deckgebirgsschiebungsraten von bis zu 1 m/Jahr auftreten werden. Eine Reduzierung der Verformungsraten ergibt sich erst nach vollständiger Füllung des Grubengebäudes mit Schutzfluid. Durch die temporär erhöhten Verformungsraten kann sich die Salzlösungs-Zutrittsrate aus dem Deckgebirge verstärken und eine Untersättigung der Lösung an NaCl eintreten.

Es ist daher erforderlich, durch technische Maßnahmen sicherzustellen, dass die derzeit degressive Entwicklung der Deckgebirgsverschiebungsraten auch während der Einleitung des Schutzfluids beibehalten wird. Dieses soll durch den Aufbau eines pneumatischen Innendruckes von 1,0 bis 1,5 MPa während der Einleitung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle sichergestellt werden. Da für den Aufbau des pneumatischen Innendruckes ein geschlossenes System erforderlich ist, sind vorlaufend die Arbeiten im Grubengebäude abzuschließen und die Schächte abzudichten. Zur technischen Steuerung der Druckluft und Schutzfluideinleitung sowie zur gebirgsmechanischen Überwachung sind automatische Messsysteme mit Datenfernübertragung erforderlich.

Nach Aufbau des pneumatischen Innendruckes wird der Porenraum des Salzversatzes im Baufeld der Südflanke über verrohrte Bohrungen mit Schutzfluid bis mindestens 490 m Teufe aufgefüllt. Untersuchungen an den im Grubengebäude eingebrachten Versatzmaterialien belegen, dass mit ausreichendem Fluidruck der Porenraum weitgehend mit Schutzfluid gefüllt wird. Die verbleiben-

den Luftporen werden bis zur Angleichung des Druckes komprimiert [3]. Sobald der Fluiddruck im Grubengebäude konstant bleibt oder sogar ohne Zugabe von Schutzfluid ansteigt und mindestens einem Schutzfluidniveau von 490 m Teufe entspricht, ist das Schutzziel einer Stabilisierung des Grubengebäudes erreicht. Dann ist sichergestellt, dass der Zutritt von Salzlösung aus dem Deckgebirge durch den sich aufbauenden Fluiddruck im Grubengebäude kontinuierlich abnimmt.

Die mannlose Einleitung von Schutzfluid unter Beaufschlagung des Grubengebäudes mit Druckluft ist technisch machbar [6].

Die zutretende Salzlösung wird mindestens bis zum Abschluss der Schließungsarbeiten unterhalb der 679-m-Sohle gefasst und nach über Tage gefördert. Die anschließend noch bis zu einem hydraulischen Druckausgleich mit der aus dem Deckgebirge zutretenden Salzlösung zutretende Salzlösung wurde bei den Transportrechnungen zur Schadstoffausbreitung berücksichtigt und beeinträchtigt diese sowie die Stabilität des Tragsystems nicht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

- Für eine zügige und weitgehend vollständige Füllung des Porenraums mit Schutzfluid ist ein möglichst hoher hydraulischer Druck erforderlich. Dies wird durch eine mannlose Schutzfluideinleitung durch einen ausreichend druckdichten Schachtverschluss erfolgen.
- Durch einen pneumatischen Stützdruck von 1,0 bis 1,5 MPa werden die Konvergenzraten deutlich reduziert und dynamische Effekte, die durch Sackungen im Versatz und lokale Bruchvorgänge im Deckgebirge initiiert werden können, begrenzt. Dieser pneumatische Stützdruck kann ebenfalls nur bei verschlossenen Schächten aufgebracht werden.
- Durch den Aufbau eines pneumatischen Stützdrucks wird sich die Salzlösungszutrittsrate verringern.
- Mit dem Verfüllen der Abbaubegleitstrecken und anderer noch unversetzten Grubenbaue mit Sorelbeton sowie dem Verschließen der Schächte 2 und 4 werden die im Sicherheitskonzept geforderten Maßnahmen erfüllt.
- Die Stabilisierung des Grubengebäudes mit Druckluft vor der Einleitung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle bewirkt einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn.

5.8 Bohrungen durch die Steinsalz-Schutzschicht zum Deckgebirge und zu Anhydriten

Bohrungen, die aus dem Grubengebäude heraus den Rötanhydrit in der Südflanke anschneiden oder in der Nordflanke die Anhydrite der Leine- und Aller-Serie durchhörtern, wurden nach ihrer

Erstellung vollständig und qualifiziert mit Magnesiamörtel verfüllt. Magnesiamörtel sind im Kontakt mit Schutzfluid langzeitstabil.

Die Tiefbohrung Remlingen 1 aus der Erkundungsphase (1896 gestoßen) durchörtert von über Tage her das verstürzte Deckgebirge, das Hutgestein, Anhydrite und die Steinsalz-Schutzschicht. Die Bohrung verläuft im Pfeiler zwischen den Abbaureihen 4 und 5 des Baufelds in der Südflanke und wurde ordnungsgemäß dicht verfüllt. Die Bohrung wurde im Jahr 1988 kontrolliert und trocken angetroffen. Da sich die integrale Permeabilität solcher Bohrungen langfristig durch Konvergenz verringert und weiterhin die Druckdifferenz zwischen den grundwasserführenden Horizonten und dem Grubengebäude derzeit maximal ist und sich langfristig reduzieren wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Bohrung auch weiterhin hydraulisch unwirksam bleibt.

5.9 Verfüllung und Verschluss der Tagesschächte 2 und 4

Die Tagesschächte 2 und 4 werden ausgeraubt und bis zur 490-m-Sohle eingekürzt. Vom Tiefsten bis zur 490-m-Sohle werden Füllsäulen aus Sorelbeton eingebracht. Das ist erforderlich, um die Setzungsstabilität, Umlösungen am Carnallit und unverhältnismäßig große Druckdifferenzen an den Strömungsbarrieren zu verhindern.

Der Verschluss der Tagesschächte sieht oberhalb der 490-m-Sohle den Bau von Dichtelementen im intakten Steinsalz der Leine-Serie vor. Oberhalb der Dichtelemente wird eine Füllsäule aus Hartgesteinsschotter sowie gesättigte Salzlösung eingebracht. Dieses Konzept gewährleistet die Anforderung, dass die Tagesschächte langfristig ebenso dicht zu verschließen sind wie das angrenzende Gebirge. Damit wird ein Austreten von Salzlösung über die Tagesschächte in die Biosphäre verhindert.

5.10 Rückbau der Tagesanlagen

Die Tagesanlagen werden zurückgebaut. Vorher ist zu prüfen, ob vorhandene Gebäudeteile für eine anderweitige Nutzung in Frage kommen können. Die nicht mehr benötigten Flächen können wieder nutzbar gemacht werden. Für das Schachtgerüst und das Fördermaschinenhaus sind die Belange des Denkmalschutzes zu berücksichtigen.

6. Zeitplan

Der Zeitplan sieht die Durchführung der Maßnahmen des Schließungskonzeptes bis zum Jahr 2016 (Verschluß der Schächte) vor. Die Meilensteine dabei sind:

- | | | |
|---|---|----------|
| - | Verfüllen des Tiefenaufschlusses bis zur 800-m-Sohle | 2009 |
| - | Bau der Strömungsbarrieren im Nahbereich der Einlagerungskammern | 2012 |
| - | Verfüllen des Bereichs zwischen der 700-m- und 490-m-Sohle einschl.
Einbringen des Schutzfluides | bis 2016 |
| - | endgültiger Verschluß der Tagesschächte | 2016 |

7. Zusammenfassung

Aus den Rahmenbedingungen der Schachanlage Asse II ergibt sich, dass ein vollständiger trockener Einschluss der Abfälle nicht möglich ist, und dass sowohl das Wirtsgestein als auch das Deckgebirge nur eine eingeschränkt wirksame geologische Barriere bilden.

Es wurde belegt, dass eine Trockenverwahrung bei vollständigem Versatz der Grubenbaue und bei Verschluss der Tagesschächte zum natürlichen Volllaufen mit Salzlösung führt. Erhebliche Umlösungen im Carnallit oder sogar Auflösungen im Steinsalz wären die Folge, wodurch zunehmende Verformungen im Salzgestein und im Deckgebirge initiiert würden. Die daraus resultierenden Ereignisse und Entwicklungen - wie z. B. erhöhte Zutrittsraten aus dem Deckgebirge, Veränderungen der Scherdeformationszone sowohl im Deckgebirge als auch in der Steinsalz-Barriere mit deutlich erhöhten Konvergenzraten - sind nicht einzuschätzen. Da somit keine Prognose der Verformungen im Salzgestein und im Deckgebirge, der Auspressraten und des Schadstofftransports in der Nachbetriebsphase möglich wäre, kann unter diesen Randbedingungen die Einhaltung der Schutzziele nicht nachgewiesen werden.

Auf der Grundlage der Rahmenbedingungen wurde das Schließungskonzept für den Standort Asse entwickelt. Die wichtigsten Komponenten sind das Einleiten von Schutzfluid in die Porenräume, der Einbau von Strömungsbarrieren, das Einbringen von Mg-Depots, die weitgehende Verfüllung

der Grubenbaue mit Versatz und der Verschluss der Tagesschächte, wobei die Schutzfluideinleitung oberhalb der 700-m-Sohle zusätzlich unter Beaufschlagung mit Druckluft erfolgt.

Diese Maßnahmen des Schließungskonzepts ergeben sich als Konsequenz des Sicherheitskonzeptes, das durch folgende Merkmale gekennzeichnet ist:

- Begrenzung der Schadstoffmobilisation aus den Abfallgebinden
- Begrenzung und Lenkung der Lösungsbewegungen im Grubengebäude
- Verlängerung der Transportwege im Grubengebäude
- Begrenzung des Austritts von Lösung aus dem Grubengebäude ins Deckgebirge
- Einschränkung von Wegsamkeiten zwischen Einlagerungskammern und Deckgebirge

Die mangelnde Prognostizierbarkeit der Entwicklung des Salzlösungszutritts und der erhebliche Zeitbedarf für die Ausführung der Arbeiten erfordern eine zügige Umsetzung der geplanten technischen Maßnahmen zur Schließung. Weiterhin ist bei der Umsetzung der Schließungsmaßnahmen eine laufende Überwachung und Bewertung der gebirgsmechanischen Reaktionen im Tragsystem erforderlich.

Quellenverzeichnis

- [1] GSF: Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase, Remlingen Januar 2006 Revision 03
- [2] ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH: Untersuchungen zum Löseverhalten der in der Schachanlage Asse anstehenden Salzgesteine. Abschlußbericht Projekt EGB-060-98, Erfurt, 24.03.2004
- [3] Institut für Gebirgsmechanik GmbH: Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase, Leipzig, Oktober 2006
- [4] GSF/DBE Technology GmbH: Technisches Konzept zum Bau von Strömungsbarrieren basierend auf Erfahrungen aus dem Bau der Pilotströmungsbarriere; Remlingen, 12.12.2005
- [5] DBE Technology GmbH: Die Einbringung des Mg-Depots in die Einlagerungskammern, Remlingen, Juli 2005
- [6] GSF/DBE Technology GmbH: Schutzfluidkonzept, Remlingen, Juli 2005

Anhang Stand und Zeitfolge der Versatzeinbringung in der Südflanke

