



Schutzfluidkonzept

Bearbeiter: Dipl. Ing. L. Teichmann DBE Tec
Dr. rer. nat. G. Stolzenberg FB Asse
Dr. rer. nat. B. Förster FB Asse
Dr. Ing. N. Stockmann FB Asse

Stand:	31.10.2006
Revisionsnummer:	02

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Aufgabenstellung	3
3	Grundlagen	4
3.1	Standortbedingungen und gebirgsmechanische Situation	4
3.2	Standortspezifische Anforderungen an das Schließungskonzept	11
3.3	Technische Maßnahmen zur Erfüllung der standortspezifischen Anforderungen	11
4	Systementwicklung im Nahfeld mit und ohne Schutzfluid	13
4.1	Volllaufen des Grubengebäudes mit der zutretenden Salzlösung	13
4.1.1	Modellvorstellungen	13
4.1.2	Auswirkungen auf das Tragsystem und die Schadstoffausbreitung	16
4.2	Einleitung eines Schutzfluids in das Grubengebäude	17
4.2.1	Modellvorstellungen zum Ablauf der Schutzfluideinbringung	17
4.2.2	Kalkulation der einzubringenden Schutzfluidmenge	18
4.2.3	Auswirkungen auf das Tragsystem und die Schadstoffausbreitung	19
5	Technische Realisierung der Schutzfluideinbringung	21
5.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften des Schutzfluids	21
5.2	Einordnung der Schutzfluideinbringung in das Schließungskonzept	23
5.3	Begleitende gebirgsmechanische Überwachung und Begutachtung	24
5.4	Technischer Ablauf der Schutzfluideinleitung	24
5.4.1	Tiefenaufschluss unterhalb der 775-m-Sohle (Phase 1)	24
5.4.2	775-m-Sohle (Phase 2)	25
5.4.3	750-m-Sohle (Phase 3)	25
5.4.4	725-m- und 700-m-Sohle (Phase 4)	26
5.4.5	679-m- bis 490-m-Sohle (Phase 5)	26
5.4.6	Verfüllung der Schächte	29
6	Zusammenfassung	30
	Quellenverzeichnis	33
	Anlagenverzeichnis	35

1 Einleitung

Die Maßnahmen für die Schließung der Schachtanlage Asse sind durch den Unternehmer im Sinne des Bundesberggesetzes (BBergG), d.h. von der GSF, verantwortlich zu planen und durchzuführen. Hierbei muss Vorsorge gegen Gefahren, die sich aus den bergbaulichen Tätigkeiten für Leben, Gesundheit und Sachgüter Dritter ergeben, getroffen werden. Insbesondere muss nachgewiesen werden, dass durch die Schließungsmaßnahmen ein gefahrloser Abschluss der eingelagerten radioaktiven Abfälle von der Biosphäre gewährleistet ist. Unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse und der Rahmenbedingungen wurde ein Schließungskonzept [1] erarbeitet, das technische Maßnahmen vorsieht, mit denen eine ausreichende Rückhaltung der Schadstoffe realisiert werden kann und das den wesentlichen Prozessen und Abläufen in den einzelnen Grubenbereichen in der Nachbetriebsphase Rechnung trägt.

Ein wesentlicher Aspekt für die im Rahmen des Schließungskonzeptes umzusetzenden Maßnahmen ist die seit 1988 dem Grubengebäude im Bereich der Südflanke zutretende, lediglich an NaCl und Anhydrit gesättigte Salzlösung (Deckgebirgslösung). Die aufgefangene Menge liegt derzeit bei ca. 12 m³ pro Tag [2]. Es wird davon ausgegangen, dass der Zutritt der Deckgebirgslösung auch in der Nachbetriebsphase anhält und ohne zusätzliche Maßnahmen die zur Verfügung stehenden Porenräume im Versatz und im aufgelockerten Wirtsgestein mit Salzlösung gefüllt werden. Eine Zunahme der Zutrittsrate und ein Rückgang der Salzkonzentrationen in der Lösung wird zwar nicht erwartet, ist jedoch nicht auszuschließen. Da im Grubengebäude der Schachtanlage Asse Kalisalze (Carnallit) des Flözes Staßfurt (K2C) anstehen, werden diese im Falle eines Zutritts von Lösungen, die nicht annähernd mit den Carnallititen im Gleichgewicht stehen, zersetzt. Dabei werden leicht lösliche Minerale des Carnallitits gelöst, während andere, vergleichsweise schwerer lösliche Minerale aus der Salzlösung ausfallen. Die zutretende Deckgebirgslösung reichert sich im Kontakt mit Carnallitit relativ schnell u.a. an MgCl₂ bis zum invarianten Punkt Q des quinären Systems an. Über einen längeren Zeitraum wird sich eine Lösungszusammensetzung nahe des invarianten Punktes R des quinären Systems einstellen, wobei die Lösung u. a. MgSO₄ und MgCl₂ aufnimmt, bis sie mit dem anstehenden Carnallitit im Gleichgewicht steht. Mit der Umbildung des Carnallitits wird die Gesteinsmatrix des Kaliflözes zersetzt, was zu einer Entfestigung des Gesteins führt.

Die Erfahrungen beim Ersaufen von Kali- bzw. Steinsalzbergwerken zeigen, dass es bei einem unkontrolliert ablaufenden Einleitprozess zu weitreichenden gebirgsmechanischen Auswirkungen kommen kann. Für die Schachanlage Asse wurde daher ein Schließungskonzept entwickelt, das zum Schutz gegen ein Volllaufen des Grubengebäudes mit Deckgebirgslösung in der Nachbetriebsphase und den damit verbundenen negativen Prozessen die Einleitung einer $MgCl_2$ -reichen Lösung – das sog. Schutzfluid – vorsieht. Damit soll der Zutritt von lösungsfähigen Salzlösungen bzw. Wässern aus dem Deckgebirge in der Nachbetriebsphase und die hieraus resultierenden Umbildungsprozesse im Carnallitit minimiert werden (Schutzfluidkonzept).

Im Rahmen des Schließungskonzeptes bildet die Einbringung des Schutzfluids eine Voraussetzung für die langzeitige Wirksamkeit der zusätzlichen technischen Maßnahmen im Nahbereich der Einlagerungskammern (ELK). Für den Langzeitsicherheitsnachweis werden durch das Schutzfluid ausreichend prognosefähige Randbedingungen geschaffen.

2 Aufgabenstellung

In der vorliegenden Unterlage wird dargestellt, warum unter den gegebenen Standortbedingungen und den technischen Einflussmöglichkeiten die Einleitung eines Schutzfluides ein unverzichtbarer Baustein des Schließungskonzeptes ist. Hierzu wird die zu erwartende Entwicklung des natürlichen Volllaufens des Grubengebäudes mit Salzlösung analysiert und mit der Entwicklung bei Einleitung eines Schutzfluides in das Grubengebäude verglichen.

Weiterhin wird die konzeptionelle Vorgehensweise bei der Einleitung des Schutzfluides unter Berücksichtigung der technischen Machbarkeit und anderer technischer Maßnahmen des Schließungskonzeptes sowie der gebirgsmechanischen und sicherheitlichen Aspekte dargestellt. Die im Hinblick auf die Umsetzung und Funktionalität der Maßnahme, die Langzeitsicherheit sowie die Nachweisführung bestehenden Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des Schutzfluides, die Einbringtechnik und die geotechnische Überwachung werden beschrieben.

3 Grundlagen

3.1 Standortbedingungen und gebirgsmechanische Situation

Für die Schachtanlage Asse sind bis zum Ende der Betriebsphase aus gebirgsmechanischer Sicht drei Phasen für das Verhalten der Tragelemente (Pfeiler und Schweben) im Grubengebäude und damit für das Gesamttragsystem bestimmend:

Abbauphase (1909 bis 1964)

Die Abbauphase ist im Wesentlichen gekennzeichnet durch die Auffahrung der drei Baufelder für die Mineralgewinnung (siehe Abb. 1) [3, 5]:

- das Carnallitbaufeld an der Nordflanke mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 1.000.000 m³ im Zeitraum von 1909 bis 1925, wobei bereits während der Gewinnung die Hohlräume größtenteils wieder versetzt worden sind,
- das bis in die achtziger Jahre unverfüllte Steinsalzbaufeld an der Südflanke (Leine-Steinsalz oder Jüngerer Steinsalz) mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 3.400.000 m³ im Zeitraum von 1916 bis 1964 und
- Steinsalzbaufeld im Sattelkern (Staßfurt-Steinsalz oder Älterer Steinsalz) mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 440.000 m³ im Zeitraum von 1927 bis 1963. Wobei die Abbaue auf der 775-m-Sohle bereits vor 1962 mit Salzpuder verfüllt worden.

Aus Abbildung 1 und 3 ist ersichtlich, dass das Baufeld im Leine-Steinsalz (Na 3) an der Asse-Südflanke auf Grund seiner Größe, seiner langen unverfüllten Standzeit und seines hohen Durchbauungsgrades für das Gesamttragsystem und damit auch für das gebirgsmechanische Systemverhalten bestimmend ist. Bezogen auf den querschlägig zum Streichen des Asse-Sattels erfolgenden Lasteintrag aus dem Deckgebirge der Asse-Südflanke in den Salzsattel [4] ergibt sich für das Steinsalzbaufeld an der Südflanke eine gebirgsmechanisch wirksame Baufeldgröße von 178.750 m².

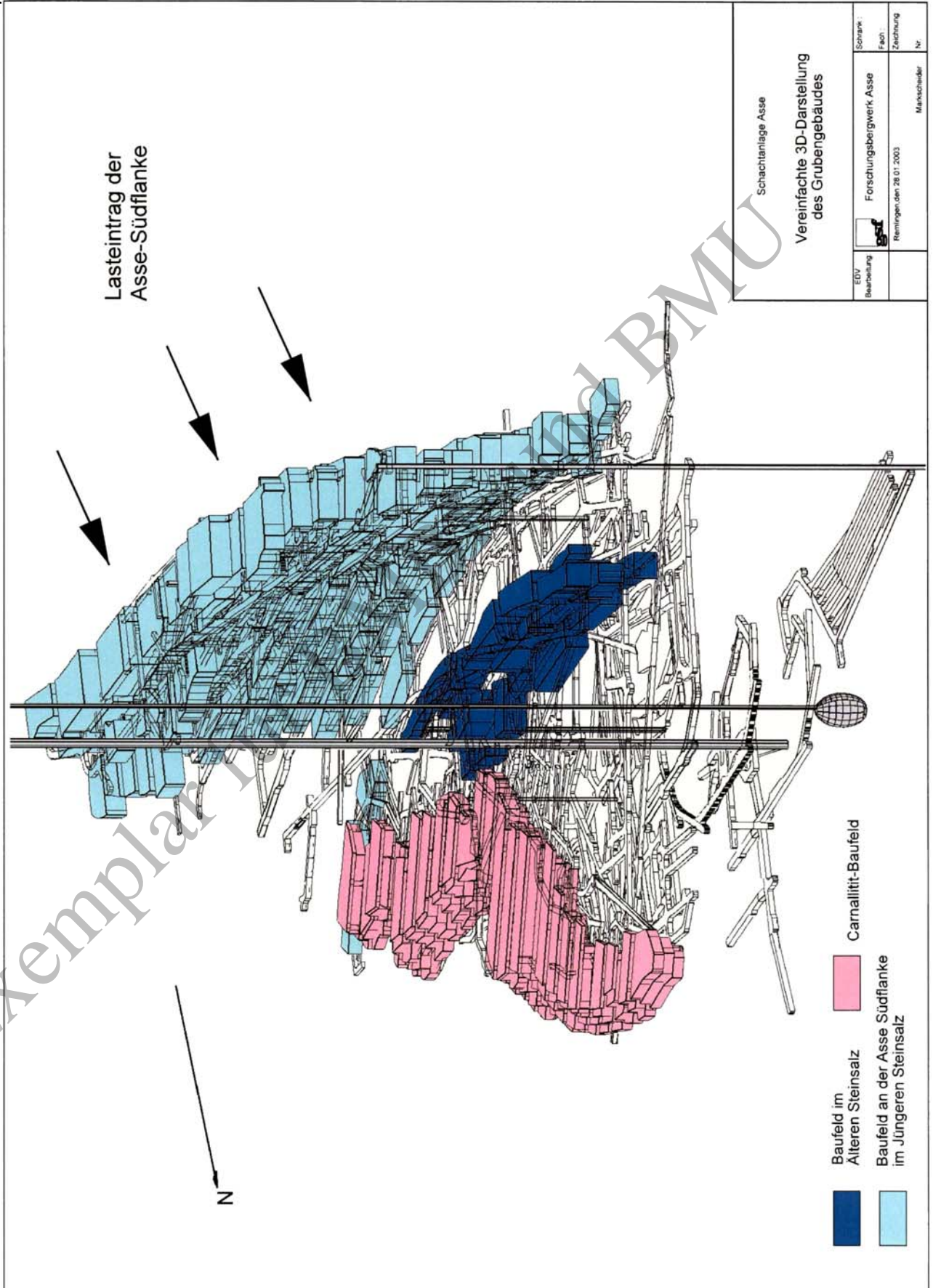


Abbildung 1: Baufelder der Mineralgewinnung im Grubengebäude der Schachanlage Asse

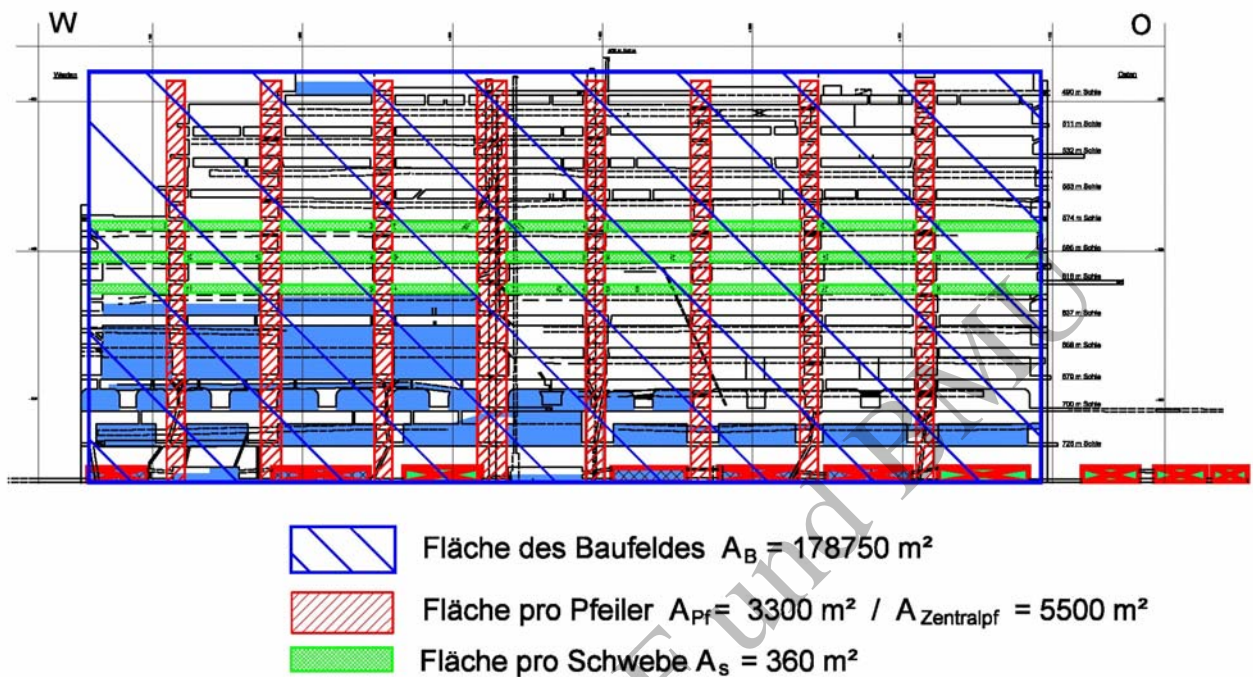


Abb. 3: Anordnung der Tragelemente im Abbausystem an der Asse-Südflanke

Standphase (1965 bis 1994)

Nach Beendigung der Abbauphase im Jahr 1964 beginnt ein Zeitabschnitt ohne bergmännische Gewinnung, der als Standphase bezeichnet wird. Die Standphase erstreckt sich von 1965 bis 1994 und ist dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrzahl der Abbaue an der Südflanke unversetzt dem wirkenden Gebirgsdruck ausgesetzt sind. Der während der Abbauphase beginnende Verformungsprozess setzt sich in der Standphase unvermindert fort. Durch die Standzeit von 29 bis 75 Jahren hat ein Großteil der Tragelemente, infolge seines nachgiebigen Tragverhaltens mit begrenzter Tragfähigkeit, das Tragfähigkeitsmaximum überschritten [5]. Der durch die anhaltende Verformung des Tragsystems bewirkte Entfestigungsprozesses hat zu Spannungsumlagerungen vom Tragsystem auf die Baufeldränder und das Deckgebirge an der Südflanke geführt. Mit der zunehmenden Beanspruchung des Deckgebirges kam es lokal zu Scherdeformationen, die Durchlässigkeiten in der Steinsalzbarriere zwischen dem Grubengebäude an der Asse-Südflanke und dem Rötanhydrit im Bereich von der 511-m- bis zur 574-m-Sohle erzeugt haben. In den Bereichen maximaler Scherbeanspruchung hat sich der Durchtrennungsgrad soweit erhöht, dass Salzlösungen vordringen können. Bedingt durch die damit wirkenden hydraulischen Drücke wird die Mobilität des Deckgebirges erhöht.

Die beschriebenen Prozesse führten im Zeitraum von 1985 bis 1991 zur Beschleunigung der Pfeilerstauchungen [4, 5) sowie zur Entstehung hydraulischer Wegsamkeiten für den seit 1988 beobachteten Salzlösungszutritt [2].

Die Beobachtungen von Salzlösungszutritten im Bergbau zeigen, dass häufig Trennflächen hydraulisch wirksam geworden sind, die durch dilatante Verformungen beeinflusst wurden [5]. Als Migrationspfade wirken dabei gebirgsmechanisch entstandene Scherflächen, die sich primär am vorhandenen Trennflächengefüge orientieren, oder Trennflächen mit geringen Festigkeiten bzw. leicht löslichem Mineralbestand. Daher ist auch für die Situation auf der Schachanlage Asse zu erwarten, dass die Salzlösung aus dem Buntsandstein bzw. dem Rötanhydrit bevorzugt über die Bereiche maximaler Scherbeanspruchung dem Grubengebäude zutritt. Die Auswertung der Beobachtungsergebnisse ergab, dass sich die Zutrittsstelle im Bereich der abbaubedingt geringmächtigen Steinsalzbarriere zwischen 500 und 574 m Teufe befindet [2]. Auf Grund des hohen Durchbauungsgrades in der Südflanke der Schachanlage Asse verbinden sich die durch den dilatanten Verformungsprozess entstandenen aufgelockerten Bereiche um die einzelnen Abbaue zu einer zusammenhängenden Auflockerungszone. Die Salzlösung migriert entlang der Auflockerungszone bis in die Grubenbaue. Durch die weiterhin ablaufenden dilatanten Verformungen im Gesamtsystem verlagerten sich naturgemäß die Zutrittsstellen in die Grubenbaue auf tieferen Sohlen. Die Entwicklung des Salzlösungszutritts zeigt, dass die Schüttungsmenge des Salzlösungszutritts durch gebirgsmechanische Bewegungen und nicht durch chemische Lösungsprozesse kontrolliert wird [2].

Von 1984 bis 1994 wurde der Tiefenaufschluss unterhalb der 775-m-Sohle aufgefahren. Das anfallende Salz wurde zunächst in die Großabbaue 1 bis 4 des Westflügels auf der 658-/679-m-Sohle und später durchgängig in die Abbaue der 725-m- und 700-m-Sohle sowie in den 1980er Jahren in die Abbaue im Sattelkern auf der 750- und 725-m-Sohle mit einer mittleren Schüttdichte von $1,46 \text{ g/cm}^3$ versetzt. Der Tiefenaufschluss hat mit ca. 240.000 m^3 Ausbruchsvolumen auf Grund seines sehr geringen Durchbauungsgrades gebirgsmechanisch für das Gesamtragsystem nur eine untergeordnete Bedeutung [6].

Versatzphase (1995 bis 2010)

Der ablaufende Entfestigungsprozess der Tragelemente im Steinsalzbaufeld in der Südflanke erfordert aus gebirgsmechanischer Sicht eine vollständige Verfüllung sämtlicher noch offener Abbaue. Daher wurde ab 1995 sohlenweise täglich 1.200 t Salz der Halde Ronnenberg unter Zugabe geringer Mengen an NaCl gesättigter Salzlösung in den offenen Hohlraum der Abbaue der Südflanke eingeblasen. Bis Anfang 2004 wurden die Abbaue weitgehend mit einer durchschnittlichen Einbaudichte von ca. $1,27 \text{ g/cm}^3$ versetzt. Aus Abbildung 4 sind die unterschiedlichen Versatzarten und der Zeitraum der Einbringung ersichtlich. Die Hohlraumvolumina und die Versatzparameter, die nach der Verfüllung des Grubengebäudes mit Fremdversatz erwartet werden, sind in [3] angegeben.

Der eingebrachte Versatz führt zur Konturstabilisierung der Tragelemente, insbesondere der Pfeiler. Die noch vorhandenen Schweben bzw. Schwebenreste haben im Gesamtragssystem nur noch eine begrenzte gebirgsmechanische Wirkung, die jedoch wichtig zur Stabilisierung der Pfeiler ist. Trotz der Konturstabilisierung der im Versatz eingebetteten Pfeiler schreitet der Entfestigungsprozess im Bereich der Südflanke fort.

Es ist nachweisbar, dass das Tragsystem der Südflanke durch die Versatzmaßnahme seit Ende der 90er Jahre stabilisiert wurde. Aktuell nehmen die Pfeilerstauchungsraten, bedingt durch die Querdehnungsbehinderung der Pfeilerkonturen, generell langsam ab. Weiterhin sind erste Anzeichen für eine Zunahme der Minimalspannungen in den Pfeilern festzustellen [4].

Von 2004 bis 2010 werden die im Schließungskonzept vorgesehenen Maßnahmen im Nahbereich der Einlagerungskammern umgesetzt. Hierbei sollen ca. 340.000 m^3 Sorelbeton für stützenden Versatz und Strömungsbarrieren (SB) eingebaut werden. Weiterhin sollen in die unverfüllten Hohlräume in den LAW-Kammern und in einige potenzielle Transportpfade ca. 20.000 m^3 Brucit-Granulat eingebracht werden [6]. Alle anderen derzeit noch offenen Grubenbaue werden mit Salzversatz oder Sorelbeton verfüllt. Diese Maßnahmen und die ablaufende Konvergenz werden den Porenraum im Grubengebäude weiter reduzieren.

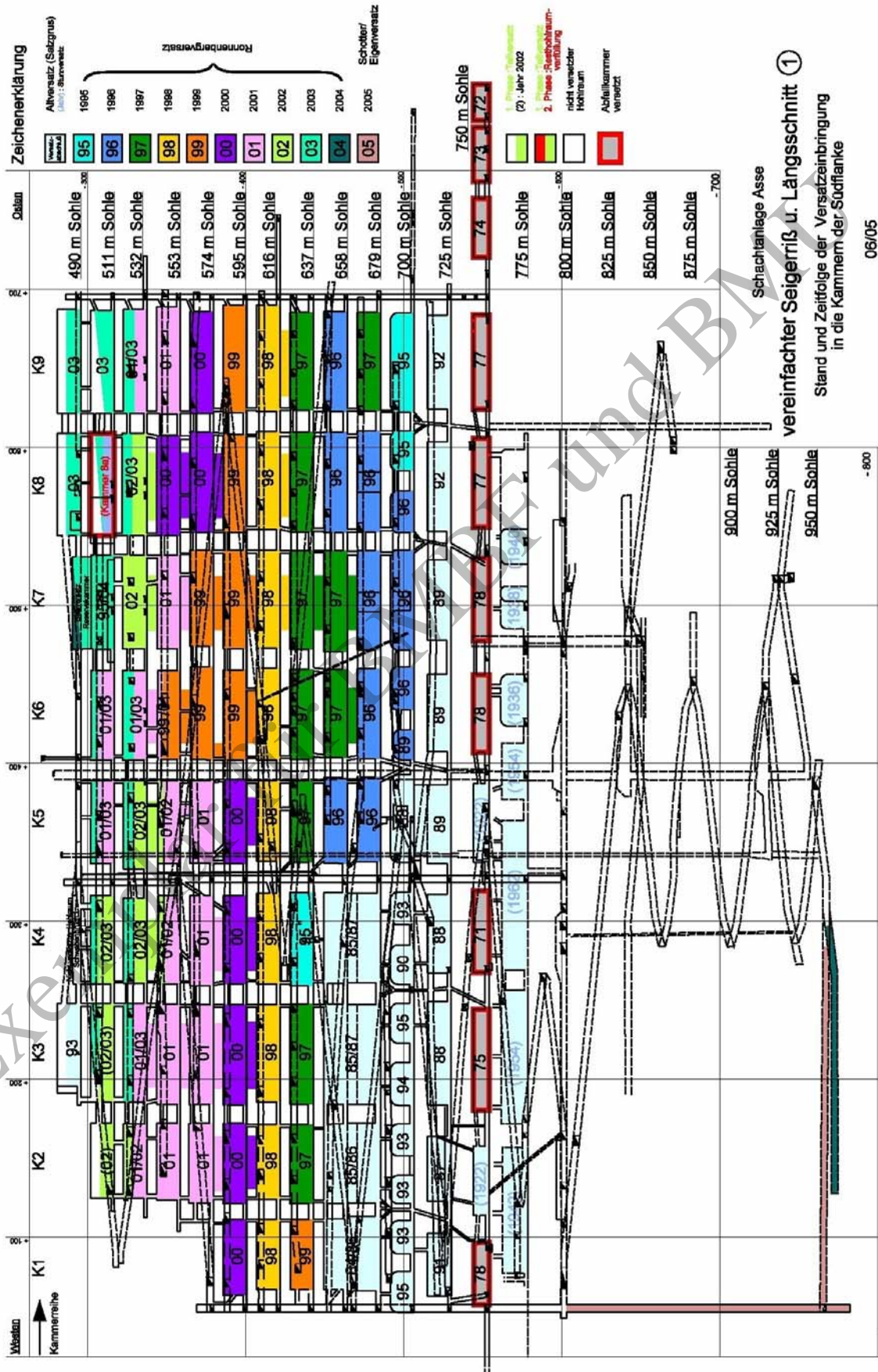


Abb. 4: Stand der Verfüllung der Abbaue im Grubengebäude der Schachanlage Asse

3.2 Standortspezifische Anforderungen an das Schließungskonzept

Bei der Schachtanlage Asse handelt es sich um ein ca. 100 Jahre altes Bergwerk mit erheblichen Schädigungen der Tragelemente und einem mit den Gebirgsverformungen im Zusammenhang stehenden Lösungszutritt von derzeit ca. 12 m³/d. Aufgrund der vorliegenden Informationen zu den hydrogeologischen und gebirgsmechanischen Verhältnissen im Deckgebirge ist eine Prognose der Zuflussentwicklung weder im Hinblick auf die Zuflussrate noch auf die Lösungszusammensetzung bzw. Salzkonzentrationen möglich [2]. Untersuchungsmethoden, die eine substantielle Verbesserung der Datenlage erwarten lassen, sind derzeit nicht bekannt. Da für den Langzeitsicherheitsnachweis ausreichend prognostizierbare Entwicklungen für den Standort eine unabdingbare Voraussetzung sind, ergeben sich aus den gebirgsmechanischen und hydrogeologischen Standortverhältnissen folgende grundlegende Anforderungen an das Schließungskonzept:

- Schutz des Grubengebäudes vor dem Zutritt von ungesättigten Lösungen in der Nachbetriebsphase,
- Frühzeitige Stützung der Tragelemente und Deckgebirgsschichten,
- Schaffen von gesicherten Randbedingungen für die Modellrechnungen.

3.3 Technische Maßnahmen zur Erfüllung der standortspezifischen Anforderungen

Damit die Anforderungen an das Schließungskonzept erfüllt werden können, sind technische Maßnahmen erforderlich. Zunächst wurde geprüft, ob durch geeignete technische Maßnahmen der Salzlösungszutritt direkt gestoppt werden kann, um Umlösungsprozesse mit allen negativen Folgeerscheinungen verhindern zu können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die bereits von 1985 bis 1988 versetzten Kammern der Abbaureihe 3, in denen die primäre Zutrittsstelle der Salzlösung vermutet wird, aus betriebssicherheitlichen Gründen nicht zugänglich sind. Direkte Gegenmaßnahmen an der Zutrittsstelle sind daher nicht möglich. Weiterhin ist die Steinsalzbarriere im Zutrittsbereich nur wenige Meter mächtig und befindet sich in einem gebirgsmechanisch stark beanspruchten Bereich. Da der Steinsalzversatz in den Abbauen bisher nur eine geringe Stützwirkung besitzt, fehlt für eine Abdichtung generell das notwendige Widerlager. Für die Injektion von Spezialmörteln oder Kunststoffen kommt hinzu, dass ein Anbohren des oder der Fließwege nur von den oberen Sohlen aus möglich wäre. Dies ist ebenfalls nicht zielführend, weil die Lage der diskreten Fließwege nicht detektiert werden konnte. Die bestehenden Risiken durch Bohrungen in

die Barrierschichten und Rissbildungen bei der Injektion die Zuflussentwicklung zu verschlechtern, steht damit ein unsicherer Injektionserfolg gegenüber. Die Erfahrungen aus dem Salzbergbau zeigen zudem, dass solche Abdichtmaßnahmen in den Schutzschichten selbst unter günstigen Bedingungen die Zuflüsse nur wenige Jahre reduzierten [7]. Insgesamt betrachtet scheidet somit eine direkte Abdichtung des Salzlösungszutritts aus.

Da Carnallit im Wesentlichen zwischen der 532- und der 800-m-Sohle großflächig aufgeschlossen ist und sich durch die lange Standzeit des Grubengebäudes Auflockerungszonen gebildet haben, ist eine Versiegelung des Carnallits mit Feststoffen als Schutz vor der zutretenden Salzlösung nicht möglich. Die zutretende Salzlösung würde somit in der Nachbetriebsphase mit dem Carnallit bzw. - falls die Sättigung an NaCl abnimmt - auch mit Steinsalz reagieren, so dass die im folgenden Kapitel beschriebenen Auswirkungen zu erwarten wären [8].

Maßnahmen zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Versatzkörpers, insbesondere in den Abbauen der Südflanke, wie z. B. Verdichtung, Injektionen oder Pumpversatz, würden zwar die Tragelemente zusätzlich stützen und damit ihre gebirgsmechanische Beanspruchung reduzieren, sie hätten jedoch keinen nachweisbaren Einfluss auf den Salzlösungszutritt. Somit wäre auch bei diesen Verfahren mit Umlösungsprozessen in der Nachbetriebsphase zu rechnen.

Demgegenüber können durch die Einleitung eines Schutzfluids, welches mit den wesentlichen Salzvarietäten im Grubengebäude nahezu im Gleichgewicht steht, die gestellten Anforderungen erfüllt werden und ein darauf aufbauendes Schließungskonzept ist – in Kombination mit einer temporären Druckluftbeaufschlagung - technisch umsetzbar [1], [5], [9], [10]. Im Folgenden werden die Entwicklungen beim „Volllaufen des Grubengebäudes mit der zutretenden Salzlösung“ und beim „Einbringen eines Schutzfluides in das Grubengebäude“ näher analysiert, um die Notwendigkeit der Schutzfluideinbringung für die sichere Schließung der Schachanlage Asse zu zeigen.

4 Systementwicklung im Nahfeld mit und ohne Schutzfluid

4.1 Volllaufen des Grubengebäudes mit der zutretenden Salzlösung

4.1.1 Modellvorstellungen

Ausgangspunkt der Betrachtungen ist ein vollständig mit Salz versetztes Grubengebäude mit im Bereich der Restfestigkeit befindlichen Tragelementen und der Verschluss der Tagesschächte durch Dichtelemente im intakten Steinsalz der Leine-Serie oberhalb 474 m Teufe. Dem Grubengebäude treten ca. 12 m³/d an NaCl und Anhydrit gesättigte Salzlösung im Bereich der 574-m-Sohle zu. Eine Prognose der natürlichen Zuflussentwicklung ist nicht möglich, da weder Fließweg noch Fließwiderstand bekannt sind. Weiterhin werden mit dem natürlichen Volllaufen gebirgsmechanische Wechselwirkungen zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge einhergehen, die zu einer Änderung der Zutrittsrate und der Salzkonzentrationen führen können [7], [9], [11].

Die Geschwindigkeit des Anstiegs des Lösungsspiegels ist von der Zutrittsrate, dem zur Verfügung stehenden Porenraum und der Konvergenzrate der bereits mit Lösung erfüllten Grubenbereiche abhängig. Dabei ist zu beachten, dass der Konvergenzprozess sowohl durch die Kompaktion des Versatzes und den sich aufbauenden hydrostatischen Innendruck im Porenraum als auch durch die Veränderung der mechanischen Eigenschaften des Versatzes und des Salzgesteins aufgrund der Durchfeuchtung beeinflusst wird [5], [11].

Aufgrund der räumlichen Verteilung der aufgeschlossenen Carnallitflächen im Grubengebäude wird es bei dem Zustrom teilgesättigter Deckgebirgslösungen in folgenden Bereichen zu Gesteinszersetzungen kommen (vgl. Tabelle 1):

1. Im Tiefenaufschluss steht nur wenig Carnallit an (etwa 5 % des Ausbruchsvolumens). Hier sind keine signifikanten Auswirkungen auf das Tragsystem zu erwarten.
2. Im Bereich von der 700- bis zur 775-m-Sohle steht Carnallit
 - im Carnallitbaufeld (Pfeiler und unmittelbare Umgebung der Abbaue)
 - südlich der Abbaue und ELK im Älteren Steinsalz
 - nördlich der Abbaue und ELK im Jüngeren Steinsalz an.
3. Von der 700-m-Sohle bis zur der 532-m-Sohle sind die nördlich der Abbaue liegenden Abbaubegleitstrecken sowie Teile der Wendelstrecke und der Schächte betroffen.

Tabelle 1: Oberflächen und Hohlräume im Carnallitit

Sohle	aufgefahren		Versetzt bzw. konvergiert		noch unversetzt	
	Oberfläche [m ²]	Volumen [m ³]	Oberfläche [m ²]	Volumen [m ³]	Oberfläche [m ²]	Volumen [m ³]
553	1.400	1.400	0	0	1.400	1.400
574	5.100	5.500	0	0	5.100	5.500
595	7.500	8.100	0	0	7.500	8.100
616	7.500	8.100	7.000	7.600	500	500
637	9.100	10.000	5.500	6.600	3.600	3.300
658	8.400	9.500	6.900	7.600	1.500	1.900
679	4.900	5.600	4.900	5.600	0	0
700	33.000	26.900	6.600	6.900	26.400	20.100
D-Sohle	5.200	3.300	0	0	5.200	3.300
725	10.100	8.300	4.100	4.500	6.000	3.800
B-Sohle	8.800	5.600	0	0	8.800	5.600
A-Sohle	9.100	5.900	0	0	9.100	5.900
Kaliabbaue	198.600	1.027.400	190.600	1.007.400	8.000	20.000
750	21.500	16.900	1.800	1.800	19.700	15.100
775	1.400	1.500	0	0	1.400	1.500
800	4.800	3.300	0	0	4.800	3.300
825	1.400	900	0	0	1.400	900
850	2.600	1.800	400	300	2.200	1.500
Wendelstr.	25.700	30.100	0	0	25.700	30.100
Seigere Baue	5.700	4.800	0	0	5.700	4.800
Summe	371.800	1.184.900	227.800	1.048.300	144.000	136.600

Ausgehend von der durchschnittlichen mineralogischen Zusammensetzung des Carnallitits kommt es bei Einwirkung einer nur an NaCl und CaSO₄ gesättigten Salzlösung u. a. zur raschen Auflösung der Minerale Bischofit und Carnallit [8]. Der Umlösungsprozess kann in zwei Teilschritte untergliedert werden. Im initialen, schnell verlaufenden Stadium der Umlösung reagiert die zutretende Lösung mit dem Carnallitit unter Bildung einer Lösung am invarianten Punkt Q des quinären Systems. Während der Umbildung bis zum Punkt Q wird bei 35 °C zusätzlich zum vorhandenen Porenvolumen ein Gesteinsvolumen zersetzt, das je nach Varietät etwa dem 1,2- bzw. 1,4-fachen des Volumens der zutretenden Salzlösung entspricht (Trümmern carnallitit bzw. geschichteter Carnallitit) [8]. Im lösungserfüllten Hohlraum fällt im Wesentlichen Halit aus.

Bei der nachfolgenden, langsamer verlaufenden Umlösung vom Punkt Q bis zu einer Lösung nahe Punkt R des quinären Systems bei 35 °C werden zusätzlich etwa 0,6 m³ Trümmercarnallitit bzw. 1,2 m³ geschichteter Carnallitit pro m³ Lösung zersetzt [8]. Dabei wird Kieserit aus dem Carnallitit und Zersetzungssylvin gelöst sowie Kainit aus der Lösung gefällt. Bezogen auf die mittlere Zusammensetzung des Carnallitits am Standort Asse befindet sich R-Lösung im Gleichgewicht mit dem anstehenden Kaliflös. Der durch Gesteinszerrüttung entstehende Porenraum wird sich mit an MgCl₂ gesättigter Lösung füllen. Die gebirgsmechanischen Eigenschaften des zersetzten Gebirgsbereiches werden vergleichbar mit denen eines durchfeuchteten Salzversatzes sein.

Zusammenfassend ergeben sich damit folgende Randbedingungen für diese Entwicklung:

1. Es existiert ein versetztes Grubengebäude mit einem mit Lösung füllbaren Porenraum von ca. 1,45 Mio. m³ (für 2014) [3].
2. Die Lösung gelangt ungehindert über nicht definierbare Wege bis zum Grubentiefsten bzw. bis zum Lösungsspiegel.
3. Die Lösung wird den zur Verfügung stehenden Porenraum kontinuierlich füllen und flächenhaft im Grubengebäude aufsteigen. Beim Kontakt dieser Lösung mit Carnallitit kommt es zur Aufsättigung an MgCl₂, MgSO₄ und KCl. Die Umbildung bis zum Punkt Q erfolgt schnell, so dass nahe des Lösungsspiegels Q-Lösung vorhanden ist.
4. Die dem Grubengebäude zufließende Salzlösung wird die bereits vorhandene Lösung überschichten, ohne dass es zu einer signifikanten Vermischung kommt, weil die Zuflussrate gering ist und die Zutrittslösung (Dichte ca. 1,21 t/m³) leichter als die an MgCl₂ u. a. aufgesättigte Lösung (Dichte ca. 1,29 bis 1,31 t/m³) ist.
5. Der Zutritt in das Grubengebäude kommt zum Erliegen, wenn das Porenvolumen im Grubengebäude gefüllt ist und an der Zutrittsstelle der Druck der im Deckgebirge anstehenden Lösung dem hydraulischen Innendruck im Grubengebäude entspricht.
6. Die Umbildung des Carnallitits erfolgt bis zur Einstellung einer Lösung am Punkt R und zersetzt dabei ein Gesteinsvolumen, das dem 1,8-fachen (Trümmercarnallitit) bzw. 2,6-fachen (geschichteter Carnallitit) des Lösungsvolumens bei 35 °C entspricht [8]. Dabei werden vorrangig die Carnallititbereiche betroffen sein, die der vorhandenen Lösung am ehesten zugänglich sind.
7. Die von der Umbildung betroffenen Carnallititbereiche erreichen durch Zersetzung Festigkeitseigenschaften, die denen von durchfeuchtetem Versatz vergleichbar sind.

4.1.2 Auswirkungen auf das Tragsystem und die Schadstoffausbreitung

Aufgrund der Durchfeuchtung des Gebirges in der Auflockerungszone um die Hohlräume, wird es zu einem erhöhten Kriechen dieser Bereiche kommen. Außerdem wird sich die Durchfeuchtung tragfähigkeitsmindernd auf die bereits entfestigten Tragelemente (Pfeiler und Schweben) des Abbaufeldes in der Südflanke auswirken, da Flüssigkeit die Reibung auf vorhandenen Bruchflächen, die auch in den Pfeilerkernen vorhanden sind, herabsetzt und die auf die Bruchfläche wirkende Normalspannung vermindert (Wirkung neutraler Spannungen). Aus den gleichen Gründen werden sich die Versatzfestigkeit und damit seine Stützwirkung verringern. Durch die mit dem Volllaufen mit Salzlösung einhergehende Gesteinszersetzung werden im Abbaufeld in der Südflanke die nördlichen Widerlager der Tragelemente geschwächt [11].

Gebirgsmechanische Laboruntersuchungen und Modellrechnungen belegen die oben getroffenen Aussagen und prognostizieren beschleunigte Deformationen und eine damit einhergehende verstärkte Beanspruchung des Deckgebirges [5], [11]. Dabei können durch bruchhafte Verformungen in den Deckgebirgsschichten Scherbänder bis in Grundwasser führende Bereiche entstehen, die zusätzliche hydraulisch wirksame Wegsamkeiten zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge schaffen bzw. vorhandene erweitern können. Damit wären ein exponentieller Anstieg der Zuflussraten und eine Abnahme der Salzkonzentration in der Lösung bis hin zu Süßwasser sowie großräumige Zersetzungen im anstehenden Gebirge und ein Anstieg der übertägigen Senkungen verbunden.

Da es in diesem Fall zur Zersetzung von Carnallit auch im Nahbereich der ELK kommen würde, ergeben sich hieraus für die Schadstoffausbreitung folgende Aspekte:

1. Die noch vorhandene Barrierewirkung des Wirtsgesteins geht im Nahbereich partiell verloren.
2. Strömungsbarrieren wären entweder nicht vorhanden oder in ihrer Wirksamkeit stark eingeschränkt, da erhebliche Umläufigkeiten nicht ausgeschlossen werden können. Hierdurch ist ein erhöhter Lösungsaustausch im Porenvolumen der ELK zu erwarten, der die Belastbarkeit der Prognosen zum chemischen Milieu deutlich einschränkt.
3. Der Lösungskontakt mit den Abfallgebänden erfolgt durch Salzlösungen, deren Zusammensetzung wenig eingegrenzt werden kann. Dies setzt die Belastbarkeit des Kor-

rosionsfortschritts der Abfallmatrizes bzw. die Mobilisierung der Schadstoffe sowie des chemischen Milieus und damit die Ermittlung der maximal möglichen Schadstoffkonzentrationen in der Lösung deutlich herab.

4. Die Langzeitstabilität der technischen Barrieren und die Wirksamkeit der natürlichen Barriere sind nicht nachweisbar.
5. Die erhöhten Konvergenzraten bedingen erhöhte advective Lösungsbewegungen, die durch dichtebedingte Konvektionsströme infolge der Carnallitersetzung noch beschleunigt werden würden. Diese würden den Transport der Schadstoffe aus den ELK beschleunigen.
6. In den Bereichen der Schächte, die im Kaliflöz stehen, führt die Zersetzung des Carnallitits zu einer Vergrößerung des Querschnittes. Die damit einhergehenden Setzungen der Füllsäulen würden sich sukzessive bis in die Bereiche der Schachtverschlüsse fortsetzen, was letztlich deren Funktionsverlust bewirken würde.

Aus den oben dargestellten Aspekten ist zu schlussfolgern, dass für das Volllaufen des Grubengebäudes mit Deckgebirgslösung keine belastbare Prognose der gebirgsmechanischen und geochemischen Entwicklung sowie der Schadstoffausbreitung möglich ist, mit denen ein robuster Langzeitsicherheitsnachweis für den Standort geführt werden kann.

4.2 Einleitung eines Schutzfluids in das Grubengebäude

4.2.1 Modellvorstellungen zum Ablauf der Schutzfluideinbringung

Ein wesentlicher positiver Aspekt der Schließung mit Schutzfluideinleitung ist die Vermeidung der Zersetzung des Carnallitits und der damit verbundenen Beeinträchtigungen des Tragsystems (s. o.) [5]. Weiterhin ergeben sich bei der Einleitung eines Schutzfluids folgende gebirgsmechanische Effekte:

1. Mit zunehmendem Fluiddruck im Grubengebäude erfolgt eine Stützung der noch intakten Tragelemente und des Deckgebirges.
2. Die Durchfeuchtung des Versatzes setzt dessen Festigkeitsparameter herab.
3. In den Tragelementen werden die Festigkeitsparameter auf vorhandenen Scherflächen und in Bruchzonen durch die Feuchtigkeit reduziert und das Kriechvermögen der durchfeuchteten Gebirgsbereiche erhöht.

Da mit der Einleitung des Schutzfluides die beiden letztgenannten tragfähigkeitsmindernden Effekte mit der Durchfeuchtung des Versatzes und der aufgelockerten Gebirgsbereiche sehr schnell auftreten und der stützend wirkende Fluiddruck sich erst verzögert aufbaut, entsteht temporär ein Tragfähigkeitsverlust. Um die dadurch initiierten Verformungen zu minimieren, ist oberhalb der 700-m-Sohle eine Stabilisierung mit einem pneumatischen Innendruck von 1,0 MPa bis 1,5 MPa, verbunden mit einer mannlosen Einleitung des Schutzfluids, vorgesehen [1], [5].

Die Ausbreitung des Schutzfluides im Grubengebäude wird unter Berücksichtigung der Permeabilität des Versatzes, der Konvergenz, der Festigkeitsparameter im Versatz und im Gebirge sowie der Spannungssituation prognostiziert [12], [13]. Aufgrund der in der Südflanke geringen Festigkeitsparameter des eingebrachten Versatzes und der großräumigen Auflockerungszone im Salzgestein erfolgt bei Erhöhung des Fluiddrucks eine schnelle Durchdringung des Versatzes und der Auflockerungszone durch Permeation bzw. Überschreitung des „Minimalspannungskriteriums“ [5].¹

Das im Versatz verbleibende kapillar gebundene und in Firstbereichen noch vorhandene Gasvolumen wird mit zunehmendem Fluiddruck entsprechend verdichtet. Da für die gebirgsmechanische Stützwirkung der Fluiddruck maßgeblich ist, spielt hierfür der eingeschlossene Gasanteil keine relevante Rolle. Die Gasspeicher im Versatz, in der Firstrauhigkeit der Abbaue und evtl. Gaspolster im Bereich der 490-m-Sohle werden jedoch bei den Transportmodellierungen berücksichtigt [14].

4.2.2 Kalkulation der einzubringenden Schutzfluidmenge

Das gesamte Hohlraumvolumen im Grubengebäude der Asse beträgt im Jahre 2005 ca. 4,3 Mio. m³ (inklusive der bereits bis 2005 versetzten Bereiche) [3]. Davon sind nach Abschluss der Versatarbeiten ca. 1,5 Mio. m³ mit Luft gefüllt (Porenraum). Durch Konvergenz und die geplanten Schließungsmaßnahmen wird sich der Porenraum bis 2014 auf ca. 1,45 Mio. m³ reduzieren. Bei einer Verfüllung des Bergwerks mit Schutzfluid ist bei Normaldruck von einem, durch Kapillarkräfte bedingten, nicht mit Schutzfluid auffüllbaren Porenanteil von ca. 16 % und Gaspolstern in den Firstbereichen von ca. 0,3 m Höhe unter

¹ Hydraulisch wirksame Risse entstehen, wenn der Fluiddruck größer als die kleinste Hauptnormalspannung plus der Aufreißfestigkeit des anstehenden Salinars ist.

Normaldruck auszugehen [14]. Der Gasanteil im Porenvolumen beträgt demnach etwa 20 % unter Normaldruck. Dieses Volumen wird durch die Beaufschlagung mit Druckluft und mit zunehmendem Fluiddruck durch das Einleiten des Schutzfluids komprimiert. Nach Abschluss der Verfüllmaßnahmen wird sich der mit Gas aufgefüllte Porenanteil bei einem durchschnittlichen Pegel der Salzlösung von 200 m und einem auf diesen wirkenden pneumatischen Druck von 1,0 MPa auf ca. 5 % reduzieren. Der mit Schutzfluid füllbare Porenraum beträgt demnach im Jahre 2014 ca. 1,45 Mio. m³ [3]. Unter Berücksichtigung bereits vorhandener und weiter zutretender Lösungen aus dem Carnallititbaufeld von ca. 3.000 m³, eines weitgehend konstanten Lösungszutritts in Höhe von 12 m³/d, der im Zeitraum von 2011 bis 2014 nicht gefasst werden kann und kumulativ ca. 18.000 m³ beträgt, sowie einem technisch nicht füllbaren Porenraum im Bereich der 490-m-Sohle von ca. 55.000 m³ ergibt sich ein Bedarf an Schutzfluid von etwa 1,37 Mio. m³.

Aufgrund der Unsicherheit in den markscheiderischen Hohlraumangaben, insbesondere in den schon seit langer Zeit nicht mehr zugänglichen Grubenbauen, von 20 %, der Unsicherheit bei der Kalkulation der eingebrachten Versatzmenge im Carnallititbaufeld von ca. 10%, der Bandbreite der prognostizierten Konvergenzentwicklung von ca. 5 % sowie nicht genauer bilanzierbarer Porenräume im anstehenden Gebirge, in die Schutzfluid eindringen kann, ergibt sich für den Schutzfluidbedarf eine Bandbreite von 1,30 ± 0,26 Mio. m³.

4.2.3 Auswirkungen auf das Tragsystem und die Schadstoffausbreitung

Durch die gezielte Verfüllung des Grubengebäudes mit einem Schutzfluid ergeben sich aus gebirgsmechanischer Sicht und für die Schadstoffausbreitung folgende Unterschiede gegenüber dem natürlichen Volllaufen mit Salzlösung:

1. Die Durchfeuchtung der Auflockerungszonen und der Tragelemente des Grubengebäudes führt hinsichtlich des Festigkeits- und Verformungsverhaltens des Gebirges und des Versatzes zu vergleichbaren Auswirkungen wie beim natürlichen Volllaufen.
2. Die Schutzfluideinbringung erfolgt in einem relativ kurzen Zeitraum von ca. 10 Jahren (oberhalb der 700-m-Sohle in ca. 3 Jahren).
3. Bei der Einleitung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle werden durch einen pneumatischen Innendruck die mit der Durchfeuchtung einhergehenden negativen Auswirkungen auf das Tragsystem weitgehend kompensiert [5].

4. Der nach dem Verschluss der Schächte in wenigen Jahren auf das hydrostatische Niveau ansteigende Innendruck im Grubengebäude führt zu einer Stützung der noch intakten Tragelemente. Die Konvergenzraten und die damit verbundenen Deformationen im Wirtsgestein und Deckgebirge werden signifikant reduziert. In der Nachbetriebsphase verringert dies die Beanspruchung der am Lastabtrag beteiligten Gebirgsbereiche und die Senkungsrate an der Tagesoberfläche.
5. Durch die Einbringung einer Salzlösung, die weitgehend im Gleichgewicht mit den anstehenden Carnallitit steht, werden signifikante Lösungs- und Umbildungsprozesse im Grubengebäude und die damit verbundene Gesteinszersetzung verhindert.

Für die Schadstoffausbreitung im Nahbereich der ELK ergeben sich folgende Aspekte [14]:

1. Die derzeit noch vorhandene Barrierewirkung des Wirtsgesteins (Steinsalz) bleibt im Nahbereich weitgehend erhalten.
2. Die Strömungsbarrieren sind nicht in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt. Dadurch kann die Lösungsbewegung und die Schadstoffausbreitung herabgesetzt bzw. gelenkt werden. Weiterhin wird der Lösungsaustausch im Porenvolumen der ELK reduziert, wodurch die Robustheit des chemischen Milieus nachweisbar wird.
3. Der Lösungskontakt mit den Abfallbinden erfolgt durch das Schutzfluid, dessen Zusammensetzung definiert ist. Dadurch lässt sich der Korrosionsfortschritt der Abfallmatrices bzw. die Mobilisierung der Schadstoffe sowie das chemische Milieu und damit die maximal möglichen Schadstoffkonzentrationen in Lösung belastbar ermitteln.
4. Die Langzeitstabilität der technischen Barrieren und die Wirksamkeit der natürlichen Barriere sind nachweisbar.
5. Die durch die Lösungs- und Umbildungsprozesse am Carnallitit ggf. initiierten Dichteströmungen werden signifikant reduziert.
6. Die Funktionalität des Verfüllkonzepts für die Tagesschächte und die Langzeitstabilität der Dichtelemente lässt sich nachweisen [15].

Die dargestellten Aspekte belegen, dass eine gezielte Verfüllung des Grubengebäudes mit einem Schutzfluid frühzeitig stabile gebirgsmechanische und geochemische Bedingungen schafft, die zur Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises geeignet sind.

5 Technische Realisierung der Schutzfluideinbringung

5.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften des Schutzfluids

Unter Beachtung der o. g. Entwicklung der lediglich an NaCl und Anhydrit gesättigten Deckgebirgslösung hin zu einer R-Lösung und der damit verbundenen Carnallitersetzung ist es erforderlich, eine Lösung einzubringen, die sich weitgehend mit dem Carnallit im geochemischen Gleichgewicht befindet, also einen bestimmten $MgCl_2$, $MgSO_4$ und KCl-Gehalt aufweist. Um das Potenzial großräumiger dichtebedingter Konvektionsströme signifikant einzuschränken und die chemischen Randbedingungen im Bereich der ELK zu optimieren, ergeben sich folgende bereichsspezifische Anforderungen an die Zusammensetzung und Dichte des Schutzfluids bei der jeweiligen Gebirgstemperatur:

1. Tiefenaufschluss (Bereich unterhalb der 775-m-Sohle) – Schutzfluid TA
 - Lösungsdichte : $\geq 1,311 \text{ g/cm}^3$
 - $MgCl_2$ -Konzentration : $\geq 375 \text{ g/l}$
 2. Bereich der LAW-ELK (775-m bis einschließlich der 700-m-Sohle) - Schutzfluid LAW
 - Mittlere Lösungsdichte : $1,311 \text{ g/cm}^3$ (Bandbreite: $1,303$ bis $1,320 \text{ g/cm}^3$)
 - Mittlere $MgCl_2$ -Konzentration : $375,8 \text{ g/l}$ (Bandbreite: 370 bis 386 g/l)
 - Mittlere $MgSO_4$ -Konzentration : $39,2 \text{ g/l}$ (Bandbreite: 29 bis 46 g/l)
 - Mittlere KCl-Konzentration : $11,43 \text{ g/l}$ (Bandbreite: 11 bis 24 g/l)
 - $CaSO_4$ -Konzentration : 0 bis 2 g/l
- Anreicherung des Schutzfluids mit Brucit $\geq 5 \text{ g/l}$ Schutzfluid. Der Wert wird entsprechend der Anforderung, die sich aus den Modellrechnungen zum geochemischen Milieu ergeben, eingegrenzt.
3. Bereich oberhalb der 700-m-Sohle – Schutzfluid SF
 - Bandbreite Lösungsdichte : $1,300$ bis $1,320 \text{ g/cm}^3$
 - Bandbreite $MgCl_2$ -Konzentration : 350 bis 450 g/l
 - Bandbreite $MgSO_4$ -Konzentration : 5 bis 46 g/l
 - Bandbreite KCl-Konzentration : 2 bis 20 g/l

Generell ist die Anforderung für das Schutzfluid eine Lösungszusammensetzung nahe dem Punkt R des quinären Systems für $25 \text{ }^\circ\text{C}$ nach D'Ans (1933) [16] (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Lösungszusammensetzung am Punkt R des quinären Systems für 25°C nach D`Ans (1933) [10].

in g/100g H ₂ O				in mol/1000mol H ₂ O			
NaCl	KCl	MgCl ₂	MgSO ₄	Na ₂ Cl ₂	K ₂ Cl ₂	MgCl ₂	MgSO ₄
1,1	2,1	45,2	5,3	1,7	2,5	85,5	8,0
in g/l				In mol/l			
NaCl	KCl	MgCl ₂	MgSO ₄	Na ₂ Cl ₂	K ₂ Cl ₂	MgCl ₂	MgSO ₄
9,41	17,64	385,4	45,59	0,081	0,118	4,05	0,379

Ein Schutzfluid mit einer Einleittemperatur von 25 °C wird sich unter Tage relativ schnell auf Gebirgstemperatur erwärmen. Diese liegt bei ca. 30 °C im oberen Bereich der Grube bis etwa zur 574-m-Sohle und bei ca. 35 °C im Bereich der 775-m-Sohle. Der Dichteunterschied von -Salzlösungen, die in der Nähe des Punktes R liegen, beträgt zwischen 25 °C und 40 °C lediglich $\leq 0,001 \text{ g/cm}^3$. Auf Grund dieses vernachlässigbaren Dichteunterschieds in diesem Temperaturbereich sind dichtebedingte Konvektionsströme im Grubengebäude infolge des geothermischen Gradienten am Standort zu vernachlässigen. Im Rahmen der Ausführungsplanung wird der für das Schutzfluid bei der Einbringung zulässige Temperaturbereich festgelegt.

Je nach Zusammensetzung des Schutzfluides innerhalb der oben angegebenen technischen Bandbreite und lokalen Ausbildung des Carnallitits kann es eingeschränkt zu Umbildungsprozessen am Carnallitit kommen, die dichtebedingte Konvektionsströme hervorrufen. Zur sicheren Vermeidung von aufwärts gerichteten konvektiven Lösungsströmen, so genannten Ausgleichsbewegungen infolge des Absinkens schwerer Lösung im Baufeld in der Südflanke, sollen die Bereiche in der Wendelstrecke, in den Schächten und den noch zugänglichen Abbaubegleitstrecken, in denen Carnallitit ansteht, mit Sorelbeton verfüllt werden. Diese Verfüllung behindert sowohl das Anströmen von Schutzfluid an die aufgeschlossenen Carnallititflächen als auch das Abströmen der konvertierten, schweren Lösung zu den Abbauen im Baufeld. Letzteres kann vorwiegend nur noch diffusiv erfolgen. Sorelbeton ist unter den zu erwartenden chemischen Milieubedingungen langzeitbeständig [17], [18].

5.2 Einordnung der Schutzfluideinbringung in das Schließungskonzept

Unter den Standortbedingungen der Schachanlage Asse ist die Einbringung eines Schutzfluids der zentrale Baustein des Schließungskonzeptes. Sowohl vom Ablauf der technischen Umsetzung als auch von den Auswirkungen auf das Tragsystem des Grubengebäudes ist jedoch eine Untergliederung der Maßnahme Schutzfluideinbringung in Phasen notwendig und auch zweckmäßig.

Um die Einordnung der Schutzfluideinbringung in das Schließungskonzept zu veranschaulichen, sind in Tabelle 3 diese Phasen und ihre Abhängigkeiten zu anderen Schließungsmaßnahmen dargestellt. Im Schließungskonzept ist der zeitliche Rahmen für die wesentlichen beschriebenen Arbeiten angegeben [1].

Tabelle 3: Phasen der Schutzfluideinbringung

Phase Nr.	Betroffener Grubenbereich	Fluidniveau [m Teufe]	Abhängigkeit des Beginns dieser Phase von der Umsetzung folgender technischer Maßnahmen
1	Tiefenaufschluss	780	Infrastruktur ist verlegt
2	775-m-Sohle	760	Fertigstellung SB auf der 775-m-Sohle, unverfüllte Grubenbaue sind versetzt, Infrastruktur ist verlegt
3	750-m-Sohle	730	Fertigstellung SB auf der 750-m-Sohle, Mg-Depots eingebaut, unverfüllte Grubenbaue und Resthohlräume in den ELK sind versetzt, Infrastruktur ist verlegt
4	725-m- und 700-m-Sohle	685	Fertigstellung SB auf der 725-m- und 700-m-Sohle, unverfüllte Grubenbaue und Resthohlraum der ELK ist versetzt, Verformungen sind im prognostizierten Bereich, Infrastruktur ist verlegt
5	679- bis 490-m-Sohle	≤ 490	alle Grubenbaue inkl. MAW sind versetzt, Fertigstellung der SB im Nahbereich von MAW; Infrastruktur ist verlegt, Abbaubegleitstrecken, Wendelstrecke und Schächte sind mit Sorelbeton verfüllt, vorläufiger Schachtverschluss Schacht 2 ist eingebaut, vorläufiger Schachtverschluss im Schacht 4 ist installiert, pneumatischer Innendruck im Grubengebäude ist auf 1,0 MPa bis 1,5 MPa erhöht.

SB Strömungsbarriere(n)

MAW ELK Einlagerungskammer mit mittelradioaktiven Abfällen

5.3 Begleitende gebirgsmechanische Überwachung und Begutachtung

In den gebirgsmechanischen Modellrechnungen müssen aufgrund der vorliegenden Standortbedingungen neuartige Ansätze zur Erfassung der Tragwiderstände von im Bereich der Restfestigkeit befindlichen Gebirgsbereichen mit und ohne Schutzfluideinwirkung verwendet werden. Zur Validierung und bei Bedarf Kalibrierung der Berechnungsergebnisse ist deshalb eine begleitende Begutachtung der ablaufenden Gebirgsreaktionen während der Schutzfluideinleitung in der Betriebsphase erforderlich. Hierzu sollen durch exemplarische Erfassung des Fluiddrucks und des Fluidniveaus sowie durch Pfeilerspannungs-, Pfeilerstauchungs- und Konvergenzmessungen, mikroseismische Beobachtungen und übertägige Nivellements insbesondere die Veränderungen der Deformationsraten durch das Schutzfluid (Feuchtekrichen) bzw. der sich aufbauende Fluiddruck erfasst werden. Aufgrund der eingeschränkten Zugänglichkeit sind hierfür automatische Messsysteme mit Datenfernübertragung erforderlich.

Die gebirgsmechanische Überwachung dient der Erfassung und genaueren Prognose der Gebirgsreaktionen in der Betriebsphase, dem Nachweis der Funktionalität der errichteten Strömungsbarrieren und der Validierung der gebirgsmechanischen Modellrechnungen für die Nachbetriebsphase. Die gebirgsmechanischen Begutachtungen erfolgen ab der Phase 2 jeweils vor der Schutzfluideinleitung im jeweiligen Teufenbereich. Sie werden so in den Betriebsablauf integriert, dass diese in der Regel keine Verzögerungen bei der Umsetzung des Schließungskonzeptes bewirken. Sie berücksichtigen generell die aktuellen Standortdaten zum Spannungs- und Verformungszustand des Tragsystems und die erreichten Versatzparameter. Bei Bedarf werden zusätzliche Überwachungs- und Sicherungsmaßnahmen bzw. Vorgaben zur Schutzfluideinleitung sowie zum pneumatischen Innendruck festgelegt.

5.4 Technischer Ablauf der Schutzfluideinleitung

5.4.1 Tiefenaufschluss unterhalb der 775-m-Sohle (Phase 1)

Derzeit wird der Tiefenaufschluss mit Salzgrus, Sorelbeton und Schotter versetzt sowie das Schutzfluid TA eingebracht. Damit dichtegetriebene Konvektionsströmungen zwischen Tiefenaufschluss und der übrigen Grube vermieden werden, soll die Lösung im Tiefenaufschluss nicht leichter sein als die Lösung, die oberhalb des Tiefenaufschlusses einge-

bracht wird bzw. sich bilden kann. Es ist somit zu berücksichtigen, dass bei Reaktionen des Schutzfluids mit dem Versatz eine Dichteentwicklung zu Werten kleiner $1,311 \text{ g/cm}^3$ auszuschließen ist.

5.4.2 775-m-Sohle (Phase 2)

Aufgrund der Anordnung der geplanten Strömungsbarrieren ist zur Sicherstellung einer ausreichend schnellen und gleichmäßigen Verteilung des Schutzfluides die Einleitung im Firstbereich der Abbaue 3 und 1a vorgesehen. Um ein ausreichendes Druckniveau sicherzustellen, soll die Einleitung über die in Anlage 1 dargestellten Bohrungen oder vorhandene vertikale Verbindungen erfolgen. Bei der Schutzfluideinleitung ist ein gleichmäßiger Druckanstieg an den Strömungsbarrieren entsprechend den in den Ausführungsplanungen festgelegten Raten einzuhalten. Die Bohrungen werden, soweit diese nicht bei den Transportrechnungen zum Langzeitsicherheitsnachweis als offen bleibend berücksichtigt sind, danach vollständig mit Sorelmörtel verfüllt.

5.4.3 750-m-Sohle (Phase 3)

Zur Sicherstellung einer ausreichend schnellen und gleichmäßigen Verteilung des Schutzfluids sowie zur Minimierung der Durchströmung der ELK ist die Einleitung über Bohrungen oder vorhandene Blindschächte in folgender Reihenfolge zweckmäßig (siehe Anlage 1, 2 und 3):

- in das Carnallititbaufeld durch je eine Bohrung in die 2. nördliche Richtstrecke nach Osten und nach Westen,
- in die Abbaue 4 und 5 im Älteren Steinsalz (Na2) durch je eine Bohrung,
- in die Abbaue 1 und 3 im Älteren Steinsalz (Na2) durch je eine Bohrung,
- in den Abbau 3 bzw. 9 im Jüngeren Steinsalz (Na3) durch je eine Bohrung,
- in die ELK über möglichst wenige jedoch mindestens zwei Bohrungen je Kammer von der Überfahrungsstrecke auf der 725-m-Sohle (Westflügel – ELK 10/750, 8/750, 4/750), aus Abbau 5b auf der 750-m-Sohle (Zentralbereich – ELK 5/750, 6/750, 7/750, 11/750) und von der neu aufgefahrenen Erkundungsstrecke im östlichen Carnallititbaufeld in ca. 710 m Teufe aus (Ostflügel – ELK 12/750, 2/750, 1/750). Alternativ können die Bohrungen auch aus der Wendelstrecke oder der Richtstrecke nach Osten auf der 700-m-Sohle erstellt werden.

Falls die vorhandenen Resthohlräume in den ELK nicht ausreichen, um die für die chemische Pufferung erforderlichen Mengen Brucit-Granulat einzubringen, wird zusätzliches Brucit-Granulat in einem Betonierprozess in die potenziellen Transportpfade eingebaut [19]. Bei der Schutzfluideinleitung ist ein gleichmäßiger Druckanstieg an den Strömungsbarrieren entsprechend den in den Ausführungsplanungen festgelegten Raten einzuhalten. Abschließend werden alle Bohrungen mit Sorelmörtel verfüllt. Die Anzahl und Lage der Einleitpunkte bzw. Bohrungen kann im Zuge der Ausführungsplanung noch variieren.

5.4.4 725-m- und 700-m-Sohle (Phase 4)

Zur Sicherstellung einer ausreichend gleichmäßigen Verteilung des Schutzfluids sowie zur Minimierung der Durchströmung der ELK ist die Einleitung über Bohrungen von der 700-m-Sohle, von der Wendelstrecke aus oder über vorhandene Blindschächte in folgender Reihenfolge zweckmäßig (siehe Anlage 3 und 4):

- in das Carnallitbaufeld durch das Hauptgesenk 1 westlich,
- in die Abbaue 4 und 7 im Jüngeren Steinsalz (Na3) durch je eine Bohrung,
- in die Abbaue 6 und 8 im Älteren Steinsalz (Na2) durch je eine Bohrung,
- in die ELK 7/725 im Älteren Steinsalz (Na2) durch voraussichtlich 2 Bohrungen.

In die ELK 7/725 Na2 wird in die vorhandenen Resthohlräume Brucit-Granulat (Mg-Depot) mit Schutzfluid eingepumpt. Bei der Schutzfluideinleitung ist ein gleichmäßiger Druckanstieg an den Strömungsbarrieren entsprechend den in den Ausführungsplanungen festgelegten Raten einzuhalten. Abschließend werden alle Bohrungen mit Sorelmörtel verfüllt. Die Anzahl und Lage der Einleitpunkte bzw. Bohrungen kann im Zuge der Ausführungsplanung noch variieren.

5.4.5 679-m- bis 490-m-Sohle (Phase 5)

Bei der Einleitung des Schutzfluids oberhalb von 679 m Teufe wären ohne zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen erhebliche Spannungsumlagerungen und erhöhte Gebirgsverformungen auch im Deckgebirge zu erwarten. Um den Anstieg der Verformungsrate in den Deckgebirgsschichten zu minimieren, erfolgt hier die Einleitung des Schutzfluids erst nach Abschluss aller Arbeiten im Grubengebäude, dem Bau des vorläufigen Schachtverschlusses im Schacht 2, dem Einbau eines vorläufigen Schachtverschlusses im Schacht 4 (siehe Kap. 5.2.7) und dem Aufbau eines pneumatischen Innendrucks von 1,0 MPa bis 1,5 MPa

im Grubengebäude [17]. Anschließend ist ein möglichst gleichmäßiger Anstieg des Schutzfluidpegels und damit des Fluiddrucks im Baufeld in der Südflanke vorgesehen.

Die Einleitung des Schutzfluides erfolgt durch verrohrte Bohrungen, die von der Oberkante des vorläufigen Schachtverschlusses im Schacht 4 in geeignete Abbaue der Südflanke erstellt werden. Grundsätzlich bietet die Einleitung durch Bohrungen folgende Vorteile [17]:

1. Innerhalb der Bohrung kann die Einleitung durch eine Verrohrung erfolgen, die nach Abschluss der Arbeiten ausgebaut werden kann. Die Bohrung wird abschließend mit Sorelbeton verfüllt und stellt damit keine Wegsamkeit in der Nachbetriebsphase dar.
2. Da sich das Schutzfluid bei der Einleitung in der Bohrung und im Bereich des Einleitpunktes erwärmen wird und aus technischen Gründen ggf. eine geringe NaCl-Untersättigung des Schutzfluids besteht, sind im Bereich des Einleitpunktes keine durch Auskristallisationen zunehmenden hydraulischen Widerstände zu erwarten. Falls sich entgegen der geochemischen Prognosen in den Rohrleitungen oder im Bereich der Einleitpunkte durch Auskristallisationen erhöhte Strömungswiderstände ergeben, werden diese durch Aufbohren in der Rohrleitung und bei Bedarf auch des Versatzes im Einleitbereich beseitigt.
3. Bei der Einleitung des Schutzfluids über Bohrungen kann zusätzlich bei Bedarf bzw. soweit möglich auch Feststoff (Salzversatz) zugegeben werden.
4. Grundsätzlich werden die Verrohrungen mit einer für die zu erwartenden Belastungen ausreichenden Wandstärke ausgeführt. Für den Fall, dass sich wieder erwarten z. B. durch gebirgsmechanisch induzierte Scherbeanspruchung der Querschnitt der Verrohrung so verengt, dass ein Aufbohren nicht möglich ist, wird eine Ersatzbohrung erstellt.
5. Die bei Verlegung von Leitungen in Strecken erforderlichen Redundanzen sind bei der Einleitung durch Bohrungen im geringeren Umfang erforderlich, da durch Vorhalten einer Bohrmaschine und von Ersatzinstallationen auf dem vorläufigen Schachtverschluss im Schacht 4 Störungen behoben werden können.

Die Einleitung des Schutzfluids in den Bereich von der 679-m-Sohle bis zur 574-m-Sohle soll in den Abbau 3 der 658-m-Sohle erfolgen (siehe Anlage 5 bis 9). Von der 574-m-Sohle bis zur 511-m-Sohle soll das Schutzfluid in den Abbau 5 der 574-m-Sohle eingeleitet wer-

den. Ab der 511-m-Sohle kann bei Bedarf die Einleitung auch durch die zur Druckluftbeaufschlagung genutzte Leitung im Abbau 3 der 490-m-Sohle erfolgen. Mit dieser Vorgehensweise wird eine dem Anstieg des Schutzfluidniveaus vorlaufende Durchfeuchtung von Tragelementen weitgehend reduziert. Durch die Einleitung des Schutzfluids in Abbaue mit großen Permeationsflächen zur Ausbreitung des Schutzfluids können sich aufgrund der Permeabilität des Versatzes und der geringen Einspannung keine signifikanten Druckdifferenzen aufbauen [5], [13] [14]. Die Auswahl der Einleitpunkte erfolgte aus folgenden Gesichtspunkten [10] :

1. Abbau 3 der 658-m-Sohle

Die Schweben zum Abbau 3 der 679-m-Sohle wurde 1955 bis 1958 hereingewonnen und der entstandene Großabbau wurde 1985 bis 1987 mit im Tiefenaufschluss gewonnenen Steinsalz mit einer Einbaudichte von ca. $1,46 \text{ g/cm}^3$ versetzt. Zum Fangen der zutretenden Salzlösung wurde 1996/97 im oberen Bereich des Abbaus eine horizontale Drainagefolie und ca. 9.500 m^3 Kies mit einer Einbaudichte von $1,67 \text{ g/cm}^3$ eingebracht. Hieraus ergibt sich, dass zum Zeitpunkt der Schutzfluideinleitung der Versatz bereits etwa 25 Jahre durch Konvergenz und sein Eigengewicht kompaktiert wurde. Beim Beginn der Schutzfluideinleitung sind daher keine signifikanten Sackungen und aufgrund der nicht mehr vorhandenen Schweben auch eine gute Drainage der Salzlösung zum anfangs im unteren Bereich der 679-m-Sohle stehenden Schutzfluidniveau zu erwarten. Die horizontale Ausbreitung des Schutzfluids wird in den versetzten Abbauen, den Pfeilerdurchhieben und den Auflockerungszonen in den Pfeilern, Schweben und am Südstoß erfolgen.

2. Abbau 5 der 574-m-Sohle

Der Abbau 5 der 574-m-Sohle wurde 2001 mit Blasversatz verfüllt. Die darüber angeordneten Schweben zur 553-m-Sohle und von dort zur 532-m-Sohle sind gebrochen. Damit ist ein vertikaler Anstieg des Schutzfluidniveaus bis zur 532-m-Sohle ohne signifikante Strömungswiderstände möglich. Die horizontale Ausbreitung des Schutzfluids wird ebenfalls in den versetzten Abbauen, den Pfeilerdurchhieben und den Auflockerungszonen in den Pfeilern, Schweben und am Südstoß erfolgen.

3. Abbau 3 der 490-m-Sohle

Der Abbau 3 der 490-m-Sohle wurde 1993 mit Eigenversatz teilversetzt. Derzeit befinden sich im oberen Bereich des Abbaus 3 Vorhaltebecken für MgCl_2 -Lösungen sowie die zur Zu- und Weiterleitung erforderlichen technischen Ausrüstungen. Da

im Ostflügel der gesamte Bereich oberhalb der MAW-Kammer mit Sorelbeton verfüllt ist und im Westflügel nur der Abbau 3 in voller Abbauhöhe von 15 m aufgeföhren wurde, kann der Abbau 3 für die letzte Phase der Schutzfluideinleitung bei Bedarf genutzt werden.

Die Druckluft wird durch Bohrungen oder Leitungen in den Firstbereich der Abbaue 3 und 8 der 490-m-Sohle in der Südflanke eingeleitet. Nach Abschluss der Schutzfluideinleitung werden die hierfür gestoßenen Bohrungen bzw. installierten Leitungen mit Sorelmörtel verfüllt. Im Rahmen einer Konzeptplanung wird die genauere technische Umsetzung untersucht. Der geplante Ablauf der Schutzfluideinleitung in der Südflanke steht im Einklang mit den aus der Tragfähigkeitsanalyse abgeleiteten Anforderungen und ist konsistent mit den Modellrechnungen zum Schadstofftransport.

5.4.6 Verfüllung der Schächte

Die Schächte 2 und 4 werden im Tiefenaufschluss bzw. im Bereich des Kavernenhalses unterhalb des Schachtes 4 mit Sorelbeton verfüllt. Ab dem Firstniveau der 800-m-Sohle sind die Schächte 2 und 4 zum Bau von Strömungsbarrieren und zum Schutz der Carnallitbereiche vor Umlösungen bis 553 m Teufe bzw. 490 m Teufe mit Sorelbeton zu verfüllen. Anschließend ist im Schacht 4 ein vorläufiger Schachtverschluss aus Sorelbeton einzubauen [15]. Von der Oberkante des vorläufigen Schachtverschlusses bei 464 m Teufe sind Bohrungen zu dem Einleitpunkt für das Schutzfluid im Abbau 3 der 658-m-Sohle und Abbau 5 der 574-m-Sohle zu erstellen, in die zur Einbringung des Schutzfluides Packer mit Rückschlagventil und angeschlossener Verrohrung eingebaut werden. Weitere Bohrungen, die zur Schutzfluid- und Drucklufteinleitung sowie zur Aufnahme von Messleitungen für die Überwachung von gebirgsmechanischen Reaktionen und technischen Parametern dienen, werden ebenfalls von der Oberkante des vorläufigen Schachtverschlusses erstellt. Alternativ ist auch eine Durchführung durch den vorläufigen Schachtverschluss möglich.

Wenn alle Arbeiten im Grubengebäude abgeschlossen sind, wird im Schacht 2 der Schachtverschluss eingebaut [15]. Anschließend wird durch den vorläufigen Verschluss im Schacht 4 Druckluft in das Grubengebäude eingeleitet. Ab einem Innendruck von 1 MPa kann parallel Schutzfluid bis zum Erreichen des entsprechend der gebirgsmechanischen

Begutachtung des Tragsystems notwendigen Fluiddruckniveaus eingeleitet werden. Der pneumatische Druck wird während der Einleitung des Schutzfluids zwischen 1,0 MPa und 1,5 MPa stabilisiert. Zum Nachweis der gebirgsmechanisch erforderlichen Stützwirkung des Schutzfluids wird der anstehende Fluiddruck im Bereich der Südflanke an exemplarischen Positionen durch Drucksensoren erfasst. Zur Beweissicherung wird eine Volumenbilanz zwischen dem berechneten Porenvolumen und dem eingebrachten Schutzfluidvolumen geführt und ausgewertet. Als Abbruchkriterium für die Einleitung des Schutzfluides gilt der Fluiddruck, der einem Schutzfluidniveau von mindestens 490 m Tiefe entspricht. Wenn dieser Fluiddruck stabil erreicht ist, werden die Bohrungen im vorläufigen Verschluss im Schacht 4 durch die o. a. Packer - ohne vorherige Druckentlastung - verschlossen. Die Verrohrungen werden - soweit möglich - ausgebaut und die Bohrungen qualitätsgerecht mit Sorelmörtel verfüllt. Anschließend wird über dem Sorelbetonabschnitt im Schacht 4 das Dichtelement eingebracht [15].

6 Zusammenfassung

Ein qualitativer Vergleich der Entwicklungen im Nahbereich der Schachanlage Asse beim Volllaufen des Grubengebäudes mit der zutretenden Deckgebirgslösung oder bei der Einleitung eines Schutzfluids ergibt, dass die Einleitung des Schutzfluids zu einem Sicherheitsgewinn führt. In Verbindung mit weiteren technischen Maßnahmen wird hierdurch der Nachweis der Langzeitsicherheit für die Schachanlage Asse ermöglicht. Die vorliegenden Berechnungsergebnisse zeigen, dass die gebirgsmechanischen Effekte bei der Einleitung des Schutzfluids prognostizierbar sind. Durch die Stabilisierung des Grubengebäudes mit Druckluft wird die Sicherheit der Bauzustände während des Einleitens von Schutzfluides nachgewiesen.

In der Nachbetriebsphase ergeben sich durch das Schutzfluid folgende wesentlichen Effekte, die insgesamt ausreichend prognosefähige Randbedingungen sicherstellen:

1. Das Schutzfluid bewirkt gegenüber dem Salzlösungszutritt ganz wesentlich geringere Umlösungsprozesse. Damit wird signifikant weniger Gestein zerrüttet (Carnallitumlösung vernachlässigbar gering) und das Potenzial für Dichteströmungen reduziert.

2. Die chemische Zusammensetzung des Schutzfluids lässt einen robusten Nachweis der Wirksamkeit bzw. der Langzeitstabilität der geplanten Baustoffe zu und gewährleistet somit die langzeitige Funktionalität der geplanten technischen Barrieren im Nahbereich. Dies ist erforderlich, um einerseits die Lösungsbewegungen zu lenken und zu begrenzen und andererseits die chemischen Rückhalteeffekte in den ELK nachzuweisen.
3. Der in der Nachbetriebsphase schnell ansteigende Fluiddruck reduziert die Konvergenzraten und damit die Volumenströme und Auspressraten signifikant. Weiterhin werden die Beanspruchungen der Deckgebirgsschichten und dadurch die übertägigen Senkungen reduziert.

Für die Entwicklung ohne Schutzfluid ergeben sich bezüglich der Umlöseprozesse, der Langzeitstabilität der technischen Barrieren, des anfänglich eintretenden chemischen Milieus in den ELK, der hydraulischen Verbindungen zum Deckgebirge, des Konvergenzverhaltens und des Fluiddrucks in der Nachbetriebsphase Randbedingungen, die unter Berücksichtigung des Salzlösungszutritts nicht prognosefähig sind.

Die Stabilität des Tragsystems und damit die Wirksamkeit des Schutzfluidkonzeptes wird durch gebirgsmechanische Modellrechnungen belegt und durch geotechnische Messungen, die im Rahmen der Standortüberwachung während der Umsetzung der Schließungsmaßnahmen durchgeführt werden, validiert. Aufgrund der gebirgsmechanischen Situation und noch umzusetzender weiterer Maßnahmen soll die Einleitung des Schutzfluids in fünf Phasen stattfinden, wobei die Segmentierung durch Strömungsbarrieren im Bereich von der 775-m-Sohle bis einschließlich der 700-m-Sohle (Phasen 2 bis 4) eine gezielte Einleitung in ausgewählte Grubenbereiche erfordert.

Mit Beginn der Einleitung des Schutzfluids auf der 679-m-Sohle sind gebirgsmechanische Auswirkungen auf das gesamte Tragsystem zu erwarten (Phase 5), die ohne zusätzliche Stabilisierungsmaßnahmen eine deutliche Beschleunigung des Konvergenzprozesses bewirken würden und zu dynamischen Reaktionen des Tragsystems führen könnten. Daher erfolgt die Einleitung des Schutzfluids oberhalb der 700-m-Sohle mannlos und zur Stabilisierung des Tragsystems bei einem pneumatischen Innendruck von 1,0 MPa bis 1,5 MPa. Das Grubengebäude wird bis mindestens 490 m Teufe mit Schutzfluid gefüllt. Durch geo-

technische Messungen werden der Fluiddruck sowie die eingebrachte Menge Schutzfluid und ggf. die des Feststoffs überwacht und dokumentiert.

Nach Verschluss der technischen Bohrungen im vorläufigen Schachtverschluss und Einbau des Dichtelements im Schacht 4 erhöht sich durch Konvergenz, Gasentwicklung und dem Salzlösungszutritt der Innendruck im Grubengebäude weiter. Damit wird ein Anstieg des Fluiddrucks im Grubengebäude auf den hydrostatischen Druck innerhalb weniger Jahre erreicht. Der stützend wirkende Innendruck im Grubengebäude entlastet das Tragsystem und reduziert die Konvergenzraten deutlich. Damit wird eine langfristig stabile bergsmechanische Situation erreicht und die Grundlage für belastbare Prognosen zur Konvergenzentwicklung, zum geochemischen Milieu und zur Schadstoffausbreitung in der Nachbetriebsphase geschaffen.

Exemplar für BMBF und BMD

Quellenverzeichnis

- [1] GSF, Forschungsbergwerk Asse: Herleitung und Beschreibung des Konzeptes zur Schließung der Schachanlage Asse, Bericht, Stand: 10/2006, Rev. 05
- [2] GSF, Forschungsbergwerk Asse: Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase. Bericht, Rev. 03; GSF FB Asse, März 2006
- [3] GSF, Forschungsbergwerk Asse: Ermittlung des Volumens der Resthohlräume für das Einbringen eines Schutzfluids, Bericht, Stand 03/2006, Rev. 03
- [4] GSF, Forschungsbergwerk Asse: Ergebnisse der Spannungsmessungen in den Tragelementen des Grubengebäudes der Schachanlage Asse, 7. Zwischenbericht, FB Asse, 01/2006
- [5] Institut für Gebirgsmechanik GmbH: Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase, Leipzig, 10/2006.
- [6] DBE tec, GSF Forschungsbergwerk Asse: Technisches Konzept zum Einbringen des Mg-Depots in die Einlagerungskammern und ihren Nahbereich, Bericht, Rev. 00, Stand: 03/2006,
- [7] Schwandt, Seifert: Natürliche und gelenkte Flutung von Salzbergwerken in Mitteldeutschland, Exkursionsführ. Veröffentl. GWB Berlin, 205, 61-72, 1999
- [8] 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.
- [9] Breidung, Verwahrung von Kali- und Steinsalzbergwerken einschließlich langzeitsicherer Schachtabdichtungen, Kali und Steinsalz, 02/2002, 28-39, Kassel
- [10] ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft Geotechnik und Bergbau mbH: Machbarkeitsstudie Druckluft - Drucklufteinspeisung zur Stabilisierung der Grubenbaue während der Einleitung von Schutzfluid oberhalb 679-m-Teufe im Bergwerk Asse II, Erfurt, 31.03.2005
- [11] Institut für Gebirgsmechanik GmbH: Gebirgsmechanische Langzeitprognose für die Schachanlage Asse, Leipzig, 10/2006.
- [12] Häfner u.a., TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bohrtechnik und Fluidbergbau: In-situ-Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter den gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge. Abschlussbericht, Freiberg, April 2001.
- [13] IBeWa, Permeabilitäts- und Porositätsuntersuchungen an Versatzmaterialien, Freiberg, Mai 2005

- [14] NRG, Colenco, GRS Braunschweig: Transportmodellierung Fluid- und Radionuklidtransport am Standort Asse, Petten, 07/2005
- [15] DBE Tec, Konzeptplanung Verfüllung und Verschluss der Schächte 2 und 4 des Bergwerkes Asse, Peine, 10/2006
- [16] d`Ans: Die Lösungsgleichgewichte der Systeme der Salze ozeanischer Salzablagerungen. Herausgegeben von der Kali-Forschungs-Anstalt GmbH, Berlin 1933 (Verlagsgesellschaft für Ackerbau mbH).
- [17] Kienzler, Metz, FZK-INE: Stellungnahme zur Beständigkeit von Baustoffen auf der Basis von Sorel-Phasen und Salzbeton gegenüber den im Grubengebäude des FB Asse auftretenden Lösungen. Karlsruhe, 10.06.2003.
- [18] K-UTEC – Kali-Umweltechnik GmbH: Untersuchungen zur Anpassung der Rezeptur 29.6 an die konkreten Einsatzstoffe des Bergwerkes Asse, Stand 31.01.2003

Tabellenverzeichnis

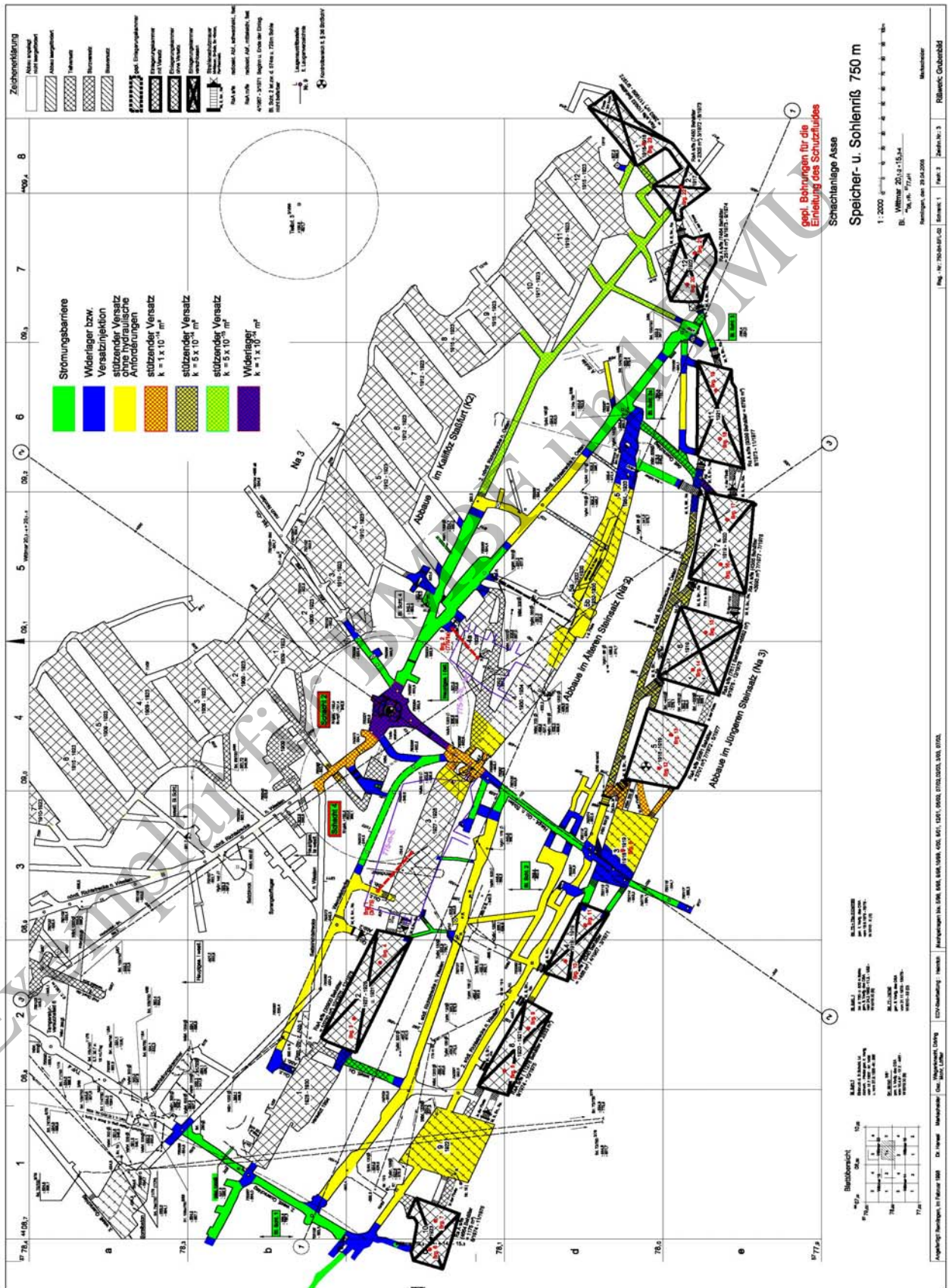
Tabelle 1	Oberflächen und Hohlräume im Carnallit	Blatt 14
Tabelle 2	Lösungszusammensetzung am Punkt R des quinären Systems für 25 °C nach D`Ans (1933) [10]	Blatt 21
Tabelle 3	Phasen der Schutzfluideinbringung	Blatt 23

Abbildungsverzeichnis

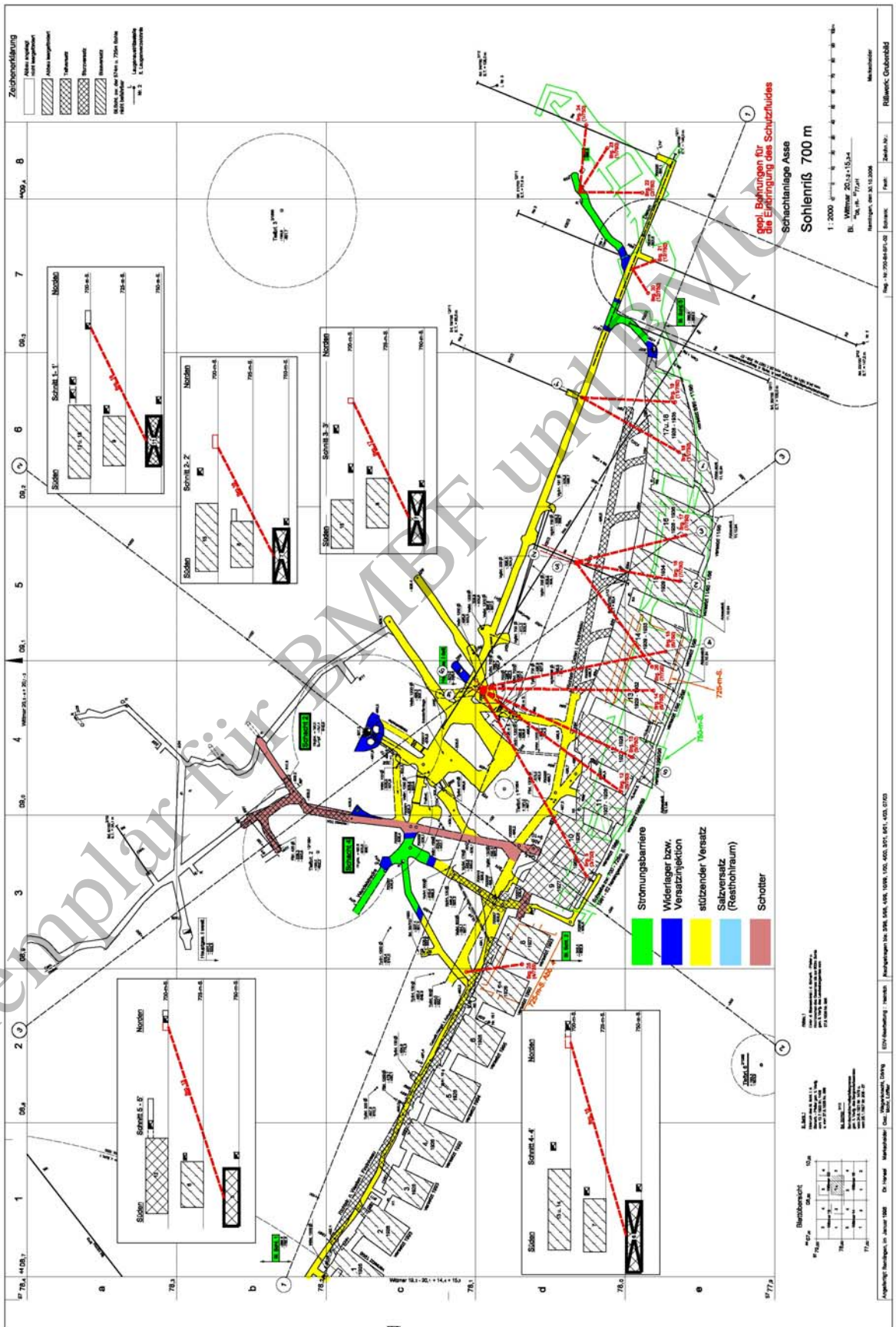
Abbildung 1	Baufelder der Mineralgewinnung im Grubengebäude der Schachanlage Asse	Blatt 5
Abbildung 2	Prinzipskizze des Abbausystems an der Asse-Südflanke	Blatt 6
Abbildung 3	Anordnung der Tragelemente im Abbausystems an der Asse-Südflanke	Blatt 7
Abbildung 4	Stand der Verfüllung der Abbaue im Grubengebäude der Schachanlage Asse	Blatt 10

Anlagenverzeichnis

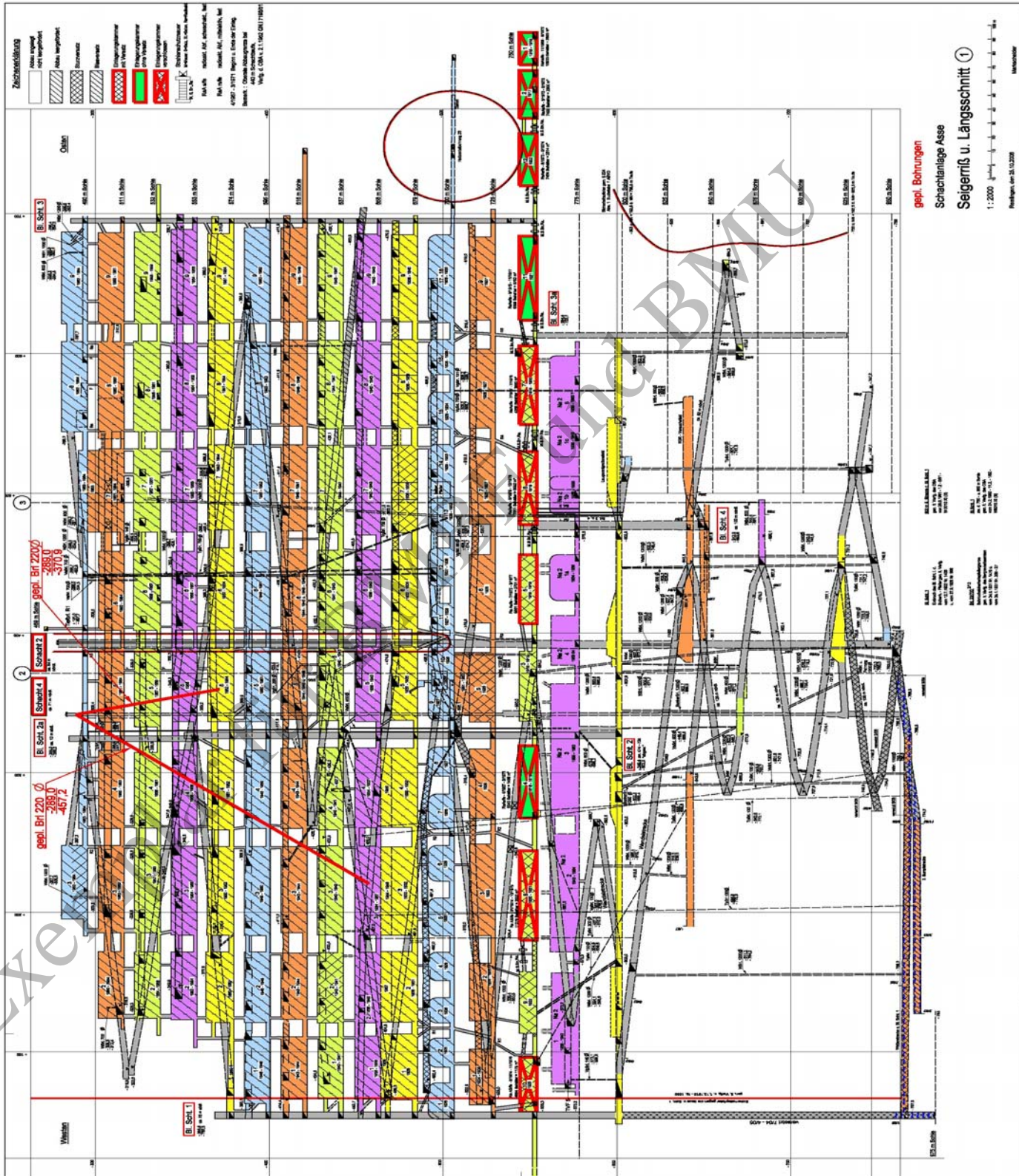
Anlage 1	Sohlenriss der 750-m-Sohle mit den Einleitpunkten für das Schutzfluid	Blatt 35
Anlage 2	Sohlenriss der 725-m-Sohle mit den Einleitpunkten für das Schutzfluid	Blatt 36
Anlage 3	Sohlenriss der 700-m-Sohle mit den Einleitpunkten für das Schutzfluid	Blatt 37
Anlage 4	Sohlenriss der 679-m-Sohle mit den Einleitpunkten für das Schutzfluid	Blatt 38
Anlage 5	Längsschnitt mit Bohrungen zur Schutzfluideinleitung oberhalb der 700-m-Sohle	Blatt 39
Anlage 6	Grundriss der 658-m-Sohle mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 3	Blatt 40
Anlage 7	Schnitt A – A' mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 3 der 658-m-Sohle	Blatt 41
Anlage 8	Grundriss der 574-m-Sohle mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 4	Blatt 42
Anlage 9	Schnitt B – B' mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 4 der 574-m-Sohle	Blatt 43



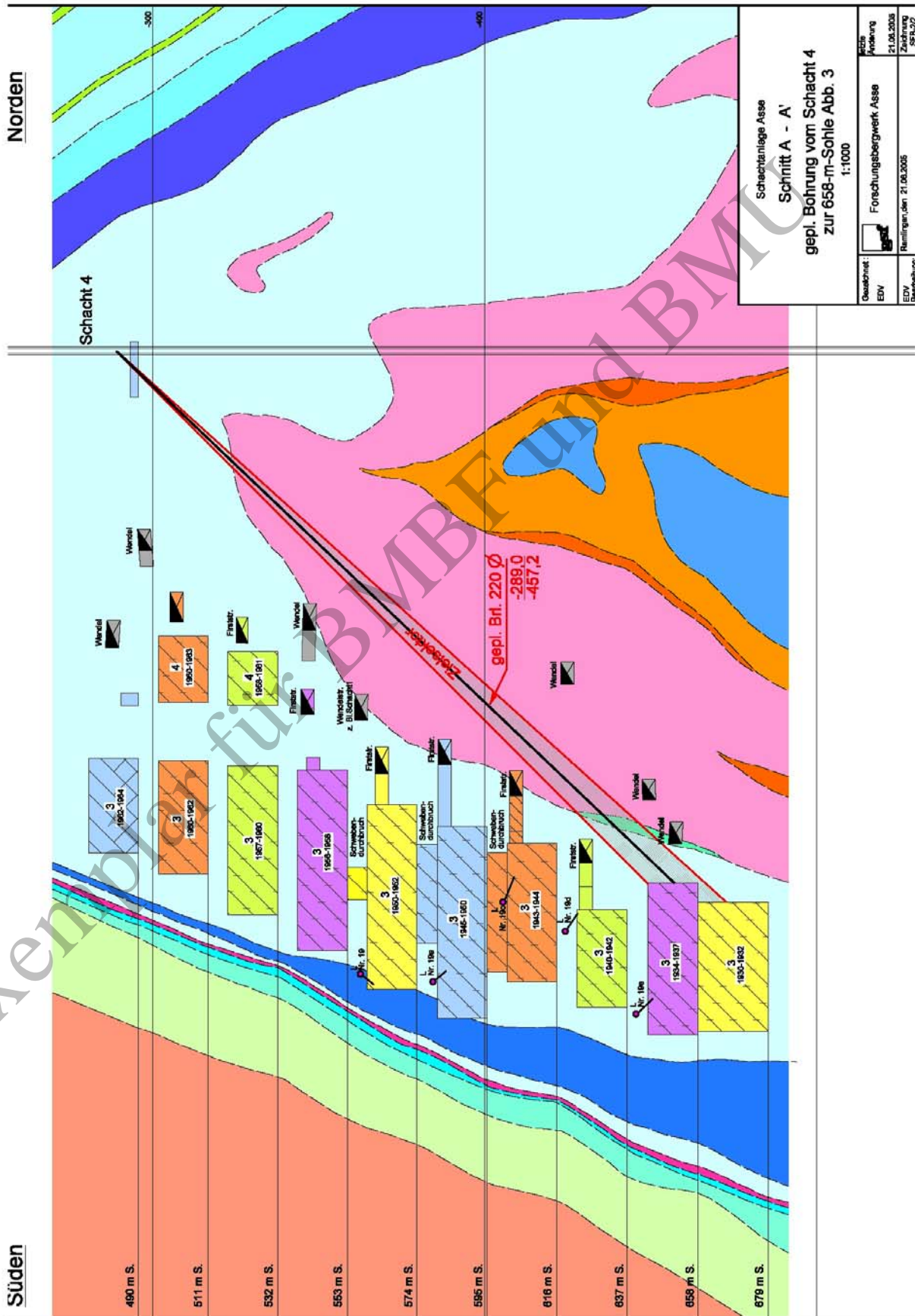
Anlage 1: Sohlenriß der 750-m-Sohle mit den Einleitpunkten für das Schutzfluid



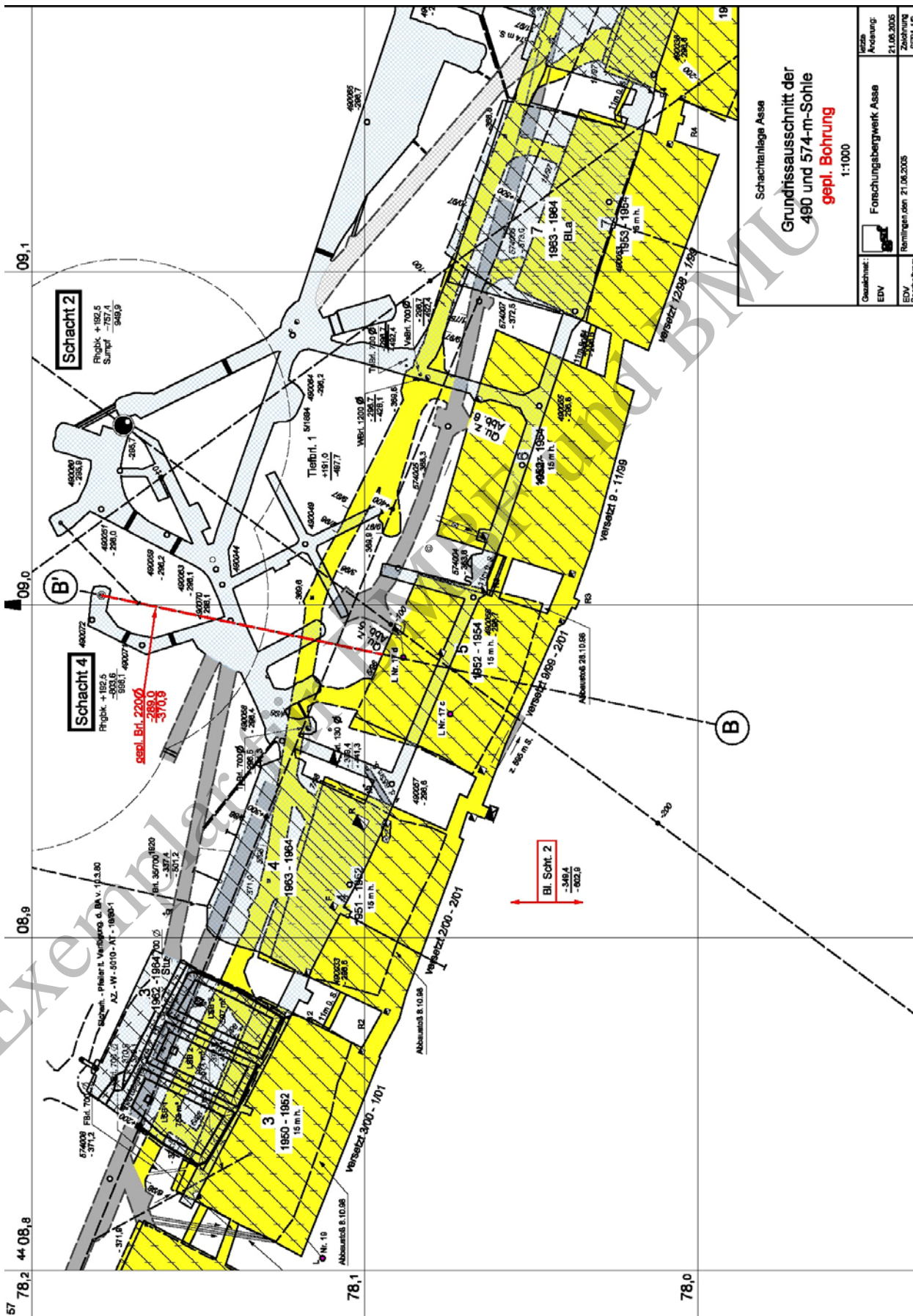
Anlage 3: Sohlenriss der 700-m-Sohle mit den Einleitpunkten für das Schutzfluid



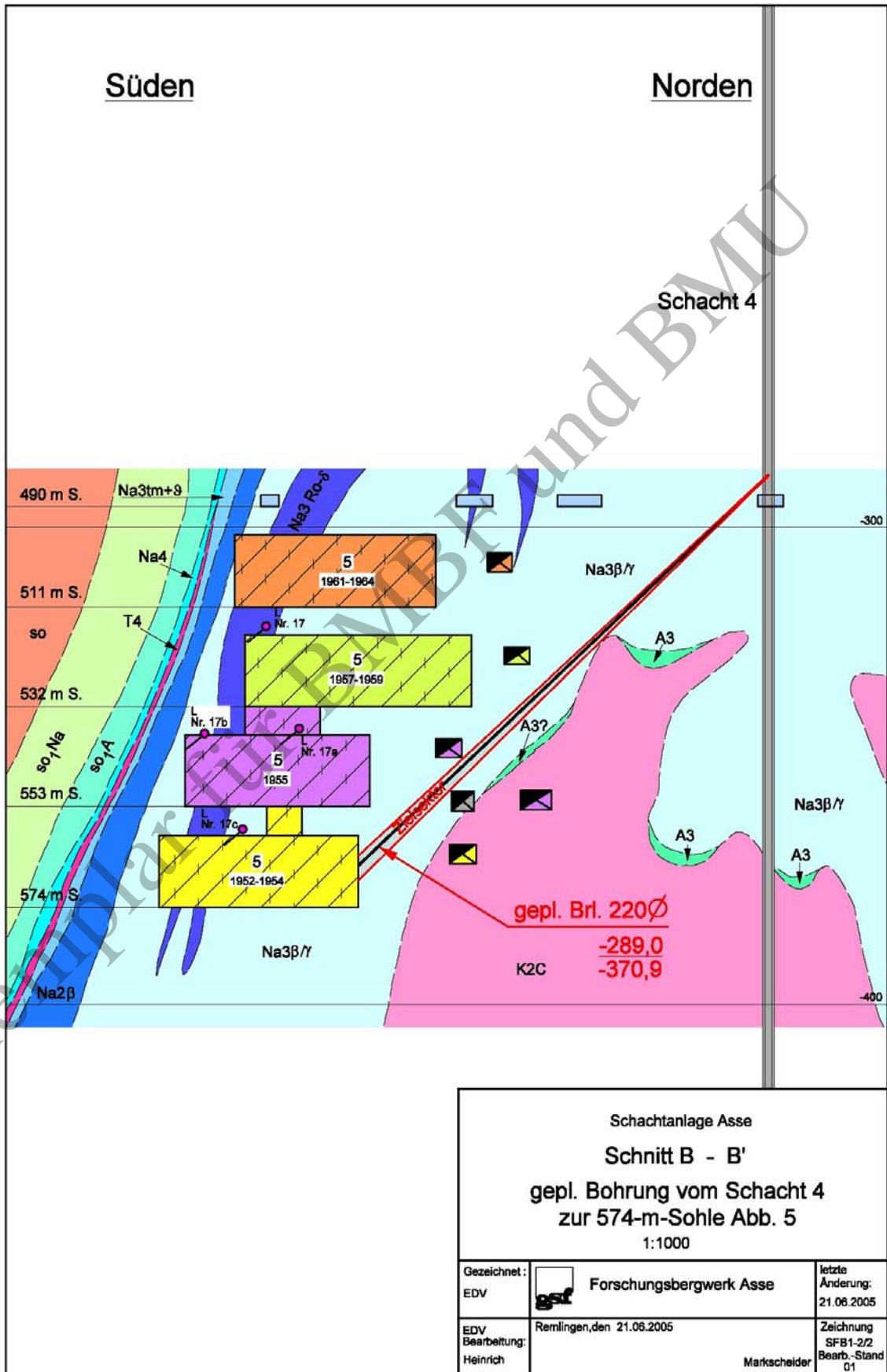
Anlage 5: Längsschnitt mit Bohrungen zur Schutzfluideinleitung oberhalb der 700-m-Sohle



Anlage 7: Schnitt A – A' mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 3 der 658-m-Sohle



Anlage 8: Grundriss der 574-m-Sohle mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 4



Anlage 9: Schnitt B – B' mit Bohrung zur Schutzfluideinleitung in Abbau 4 der 574-m-Sohle