

Stellungnahme zum Bericht der CDM Consult GmbH Bochum:

„Konzeptstudie zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachanlage Asse II“

Arbeitsgruppe Optionenvergleich

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)

(Kleemann, U., Ranft, M.)

Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe – Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE)

(Bühler, M., Pitterich, H.)

Sachverständige der Begleitgruppe Asse II des Landkreises Wolfenbüttel

Bertram, R.

Kreusch, J.

Krupp, R.

STAND: 29.10.2008

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS	2
1 GRUNDLAGEN	3
1.1 Wiedergabe der Aufgabenstellung.....	3
1.2 Vorbemerkung zur Jahresangabe „2014“	3
1.3 Bewertungskriterien der AGO	5
1.4 Allgemeine Bewertung durch die AGO	5
2 AUSGANGSSITUATION IN DER SÜDWESTFLANKE DER ASSE II	5
2.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts.....	5
2.2 Bewertung durch die AGO	6
3 REDUZIERUNG DER VERFORMUNGSRATEN DER SÜDWESTFLANKE	7
3.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts.....	7
3.2 Bewertung durch die AGO	9
4 TECHNISCHES KONZEPT ZUR ERHÖHUNG DER VERSATZSTEIFIGKEIT	10
4.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts.....	10
4.2 Bewertung durch die AGO	15
5 VORUNTERSUCHUNGEN	17
5.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts.....	17
5.2 Bewertung durch die AGO	19
6 KOSTEN UND ZEITAUFWAND	19
6.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts.....	19
6.2 Bewertung durch die AGO	20
7 ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG	20
QUELLEN	22

1 Grundlagen

1.1 Wiedergabe der Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung wird von CDM in Kap. 4 behandelt. Im Rahmen der Konzeptstudie zur „Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachanlage Asse II“ entwickelte CDM Maßnahmen zur Aktivierung und Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Abbaukammern der Südwestflanke. CDM schätzte die technische Realisierbarkeit und kurzfristig aktivierbare geomechanische Wirksamkeit ab und benannte den erforderlichen Zeit- und Kostenrahmen für eine solche Ertüchtigungsmaßnahme. Darüber hinaus schätzte CDM mögliche Auswirkungen auf den bereits geführten Nachweis der Langzeitsicherheit ab.

CDM teilte die Bearbeitung des Vorhabens in folgende Arbeitsschritte auf:

- Entwicklung eines technischen Konzeptes zur Aktivierung und Erhöhung der Versatzsteifigkeit,
- Beurteilung der technischen Realisierbarkeit,
- Beurteilung der geomechanischen Wirksamkeit,
- Einschätzung der Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit,
- Bewertung des entwickelten Konzeptes.

Im Einzelnen behandelte CDM folgende Punkte:

- Recherche der vorhandenen Gegebenheiten in der Schachanlage Asse II und Aufarbeitung von bestehenden Unterlagen,
- Durchführung von überschlägigen Spannungs- und Verformungsanalysen mit Auswahl der zu ertüchtigenden Abbaukammern, Analyse und Darstellung der geomechanischen Wirksamkeit der vorgesehenen Maßnahmen,
- Untersuchung und Bewertung der Möglichkeiten für eine Erhöhung der Versatzsteifigkeit mit geeigneten technischen Maßnahmen und der damit beabsichtigten frühzeitigen Reduzierung der Verformungsraten,
- Einschätzung des Zeitrahmens und der Kosten für die Durchführung der Maßnahmen,
- Einschätzung der Auswirkungen auf das Tragverhalten des Deckgebirges der Südwestflanke und die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises,
- Ggf. Angaben hinsichtlich eines einzuleitenden Genehmigungsverfahrens.

1.2 Vorbemerkung zur Jahresangabe „2014“

Aus Sicht des IfG Leipzig (IfG2007) ist gegenwärtig eine belastbare Prognose für eine weitere Verlängerung der Betriebsphase bis zur Einleitung des Schutzfluids aus folgenden Gründen nicht möglich:

- In einer ersten Rechnung mit dem großräumigen 3D-Modell wurde der Konvergenzprozess ohne technische Maßnahmen bis Anfang 2016 gerechnet. Wie nachstehende Abbildung (IfG2007, Bild 15) zeigt, kommt es ab Anfang 2014 auch ohne Schutzfluideinleitung infolge der oben beschriebenen und in situ nachprüfaren Entfestigungs- und Bruchprozesse zu einem zunehmenden Tragfähigkeitsverlust und damit einer Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten. Diese Rechnung belegt die begrenzte Verlängerungsmöglichkeit der trockenen Betriebsphase und bestätigt die aus der gebirgsmechanischen Zustandsanalyse abgeleitete Empfehlung, das Bergwerk schnellstmöglich zu schließen.

- Das großräumige Rechenmodell bzw. alle gebirgsmechanischen Modelle müssen im Rahmen der zukünftigen begleitenden Begutachtung mit In-situ-Messwerten überprüft und ggf. korrigiert werden.

Eine Verbesserung und Erweiterung der Prognosefähigkeit ist deshalb entscheidend von den Daten der Standortüberwachung abhängig.

- Da die Zuverlässigkeit mit steigendem Prognosezeitraum bis zum Ende der Betriebsphase grundsätzlich abnimmt, empfiehlt das IfG im Rahmen der begleitenden Begutachtung der Schließungsmaßnahmen, die Tragfähigkeit anhand der fortgeschriebenen Standortdaten und geplanten technischen Maßnahmen aktualisiert zu bewerten.

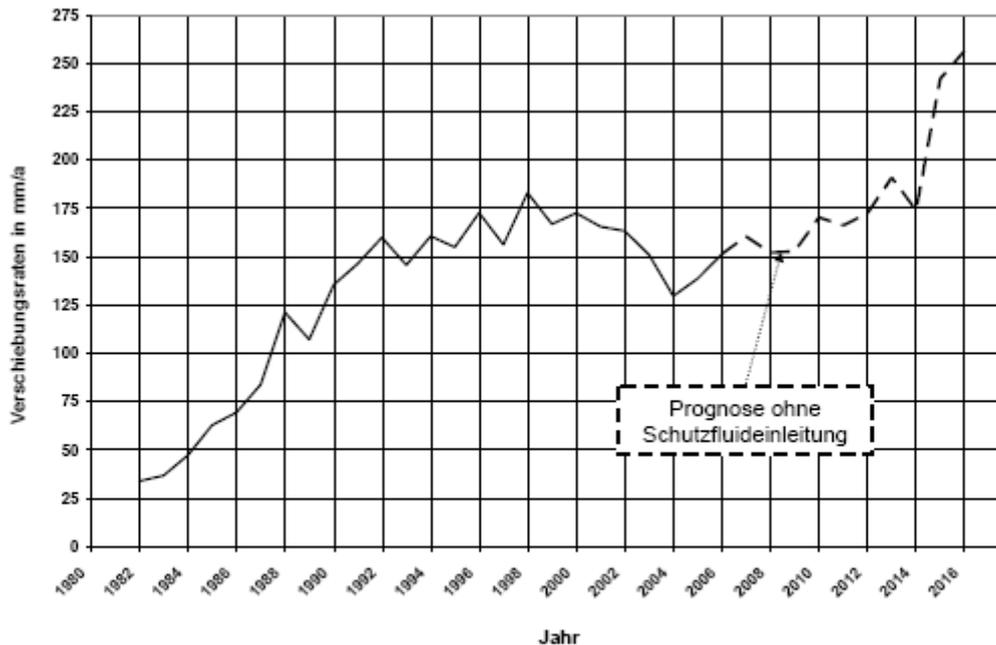


Bild 15: Horizontale Verschiebungsraten des südlichen Deckgebirges in Teufe 553 m ohne Schließungsmaßnahmen (Prognose der weiteren Entwicklung)

IfG weist explizit auf potentielle Fehlinterpretationen von aktuellen Messungen und Prognoserechnungen hin (IfG2007). Auch wenn anhand zukünftiger Modellrechnungen mit geringfügig höheren Versatzdrücken die gegenwärtige Degressivität der Verschiebungsraten der Südflanke und Pfeilerstauchungsraten nachvollziehbar sein wird und eine integrale Systementfestigung im Modell entsprechend später eintritt, wäre aus folgenden Gründen keine andere Empfehlung als eine schnellstmögliche Schließung zu geben:

- Eine Verlängerung der Betriebsphase ist auch bei abnehmenden Verformungsraten grundsätzlich mit weiteren Schädigungen und Bruchprozessen verbunden, die zunehmend schwerer zu prognostizieren sind.
- Während die gebirgsmechanischen Prozesse im Bergwerk noch relativ gut bekannt sind (Auffahrungssituation, In-situ-Messungen, Laborversuche an den Salzgesteinen, Modelle), ist das Deckgebirgsverhalten aufgrund des schlechteren Aufschlussgrades wesentlich schwerer beschreibbar. Die vom IfG erstellten Modelle sind zwar in der Lage, die integrale Mobilität richtig abzubilden, aber die diskreten hydraulischen Parameter sind nicht ableitbar. Hier verbleiben Unwägbarkeiten, die keine sichere Prognose der Zuflussentwicklung gestatten.
- Die Notwendigkeit der zügigen Schließung ergibt sich aus den tatsächlich vorhandenen und mittels der Daten der Standortüberwachung nachweisbaren Schädigungen wesentlich eindringlicher als aus den Modellrechnungen, die diese Prozesse lediglich nachbilden. Solange sich keine wesentlichen Versatzdrücke aufbauen, ist von einer zunehmenden Instabilität auszugehen und deshalb dringend zu empfehlen, die Schließungsmaßnahmen im Bergwerk Asse so zügig wie möglich durchzuführen, dabei aber auch die Grundlagen und Randbedingungen für eine belastbare Sicherheitsanalyse für die Nachbetriebsphase zu schaffen.

Im Zuge der aktualisierten Bewertung der Tragfähigkeit sind die von CDM beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit als Optionen in Variantenrechnungen einzubeziehen. Erst auf Grundlage solcher numerischer Analysen kann eine nach Stand von Wissenschaft und Technik abgesicherte Aussage zu einem eventuell noch existierenden zeitlichen Handlungsspielraum abgegeben werden.

Das Ergebnis der numerischen Analysen kann von IfG frühestens Ende 2008 vorgelegt werden.

1.3 Bewertungskriterien der AGO

Die Ausführungen der CDM zur Konzeptstudie sind insbesondere hinsichtlich der folgenden Kriterien zu prüfen:

1. Vollständigkeit
2. Nachvollziehbarkeit
3. Plausibilität
4. Technische Machbarkeit
5. Nachweisliche Wirksamkeit
6. Notwendigkeit (qualitativ)
7. Senkungen an Tagesoberfläche, Vermeidung von Bergschäden (BBergG)
8. Robustheit (einschl. Auswirkung auf LZS)

1.4 Allgemeine Bewertung durch die AGO

CDM hat im verfügbaren Zeit- und Kostenrahmen eine aus Sicht der AGO umfassende Konzeptstudie zu Optionen der Erhöhung der Versatzsteifigkeit durchgeführt. Insofern wird die Ausarbeitung als weitgehend vollständig betrachtet, wenngleich Variationsrechnungen und Aussagen zu den Unsicherheiten der berechneten Ergebnisse (Deformationsraten, bzw. deren Änderungen) sowie die Behandlung der temporären Bauzustände und eingehende Betrachtungen zu Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit fehlen.

Die Ausarbeitung der CDM stützt sich auf 36 zitierte Quellen und Gespräche mit dem Betreiber und potentiellen ausführenden Firmen für die Realisierung von Einzelmaßnahmen. Ausführungen und Schlussfolgerungen der Konzeptstudie sind insofern nachvollziehbar.

Die weitere Bewertung durch die AGO erfolgt jeweils in Verbindung mit den Kapiteln der CDM-Konzeptstudie im Anschluss an die Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts.

2 Ausgangssituation in der Südwestflanke der Asse II

2.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts

CDM beschreibt in Kap. 5 der Konzeptstudie die Ausgangssituation in der SW-Flanke der Schachanlage Asse II basierend auf und damit praktisch identisch zu den Ausführungen a. a. O. (z.B. IfG2006).

Eine wesentliche Größe sind die Pfeilerstauchungen im Tragsystem. Die Verformungsraten der Pfeiler weisen derzeit ein Maximum am Pfeiler 6/7 auf der 574- und 553-m-Sohle auf, an dem ein Wert von ca. 130 mm/Jahr gemessen wurde. Die von CDM als Anlage 18 aufgeführte Isolinienarstellung der Pfeilerstauchungen für das Jahr 2008 zeigt, dass es in der Südwestflanke 2 Bereiche mit großen Pfeilerstauchungen gibt. Diese liegen zum einen im Bereich der Abbaukammern 4 und 5 sowie zum anderen im Bereich der Kammern 6 und 7 und zwar jeweils im oberen Bereich des Grubengebäudes zwischen der 532-m-Sohle und der 616-m-Sohle. Die größten Stauchungsraten konzentrieren sich

hierbei im Bereich der Kammern 6 und 7. In den Jahren davor lag diese Konzentration, wie in Anhang 19 dargestellt, stärker im Bereich der Kammern 4 und 5.

Zusammenfassend kommt CDM zu folgenden Schlussfolgerungen bezüglich der Ausgangssituation. Die bislang durchgeführten Spannungs- und Verformungsmessungen zusammen mit den darauf aufbauenden, vom Institut für Gebirgsmechanik (IfG) durchgeführten FE-Berechnungen (IfG2006a und IfG2006b) belegen, dass sich das Pfeiler-Schweben-System in der Südwestflanke im Grenzzustand der Tragfähigkeit befindet. Ein Großteil der Schweben hat bereits versagt und die verbliebenen Schwebenringe leisten lediglich durch ihren aussteifenden Einfluss auf die Pfeiler einen Beitrag zum Lastabtrag. Der für die Gesamtlastabtragung maßgebende Zentralpfeiler 4/5 entzieht sich der Belastung, wodurch es zu Spannungsumlagerungen auf die nächstgelegenen Pfeiler und die Baufeldränder bzw. das Deckgebirge kommt. Eine auch nur anteilige Lastabtragung über den eingebrachten Versatz ist aufgrund der Messungen der Drücke im Versatz auszuschließen.

Durch den bisher erfolgten Versatz der Abbaue konnte die Pfeilerkontur stabilisiert und somit die Pfeilerquerdehnung gemindert werden. Einhergehend mit dem betreffenden Materialeinbau und den Lastumlagerungen im Tragsystem des Grubengebäudes kam es zu einer degressiven Entwicklung der Stauchungen betroffener Pfeiler. Die Abnahme der Stauchungsraten verlangsamt sich derzeit wieder, wobei sich die Verformungsraten nach wie vor auf einem hohen Niveau bewegen.

Eine weitergehende Destabilisierung der Südwestflanke kann aufgrund von Lastumlagerungen in das Deckgebirge zu Verformungen speziell entlang tektonischer Störungen führen, wodurch die latente Gefahr einer Zunahme der Laugenzutritte unter Umständen erhöht wird. Eine eindeutige Korrelation zwischen Verformungszustand des Gebirges und dem Laugenzutritt kann an dieser Stelle aufgrund der komplexen Gebirgsverhältnisse und des nicht eindeutig definierbaren Laugenzutritts in das Salzgebirge nicht angegeben werden. Bei nicht mehr beherrschbaren Laugenzutrittsraten und einem erfolgenden Vollaufen des noch verfügbaren Resthohlraums im Grubengebäude besteht die Gefahr einer Schädigung des gesamten Grubengebäudes aufgrund der dann möglicherweise in den Carnallitit-Baufeldern eintretenden Umlöseprozesse.

Zusammenfassend kommt CDM zu dem Schluss, dass der wahrscheinliche Zusammenhang zwischen Deckgebirgsverschiebung aufgrund von Verformungen im Grubengebäude und Zunahme der Laugenzutrittsraten eine baldmöglichst realisierte Stützung der Südwestflanke zur Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten (Verformungsraten) erfordert.

2.2 Bewertung durch die AGO

Die Darstellung der Ausgangssituation in der Südwestflanke der Schachanlage Asse II durch die CDM folgt im Wesentlichen den Aussagen der Unterlage „Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachanlage Asse II“ (IfG2007). Die Historie der Schachanlage Asse II, die geometrischen Gegebenheiten im Grubengebäude sowie die Entwicklung des Spannungs- und Verformungszustands in den Tragelementen und im Versatz werden zutreffend beschrieben. Die Ermittlung des Betrags der mittleren Firstspaltöffnung anhand von dokumentierten Messungen aus den Jahren 2001 bis 2004 wird für eine überschlägige Vordimensionierung als ausreichend erachtet.

Die AGO teilt die Einschätzung von CDM, dass keine quantitative Korrelation zwischen der Verformungsrate in der Südflanke und der Entwicklung des Lösungszutritts angegeben werden kann. Insgesamt kann jedoch der abschließenden Einschätzung gefolgt werden, dass zur weiteren Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten der Südwestflanke die bald möglichste Stützung der Tragelemente durch Versatzertüchtigung zielführend ist.

3 Reduzierung der Verformungsraten der Südwestflanke

3.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts

CDM führt zur Entwicklung des Konzepts in Kap. 6 aus: Das im vorliegenden Bericht dargestellte Konzept habe zum Ziel die Steifigkeit des in die Abbaukammern eingebrachten Versatzes in der Südwestflanke der Schachanlage zu aktivieren und zu erhöhen. Durch die dann einsetzende Mittragwirkung des Versatzes komme es zu einer Stabilisierung im Deformationsverhalten der Pfeiler und zu einer Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten. Damit verbunden sei eine Reduzierung des latenten Risikos von weiteren Salzlösungszutritten, soweit sie durch die fortschreitende Schädigung der Deckgebirgsschichten verursacht werden oder werden können.

Die in der Konzeptstudie betrachteten Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit des Salzgruses in den Abbaukammern der Südwestflanke umfassen folgende 2 Stufen:

Stufe 1: Qualitätsgesicherte Verfüllung des Firstspaltes in den Abbaukammern, zur

- Erzielung eines kraftschlüssigen Verbundes,
- Einspannung der Pfeiler,
- Schnellere Aktivierung der Versatzsteifigkeit.

Stufe 2: Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial durch Volumenzugabe, zur

- frühzeitigen Erhöhung der Versatzsteifigkeit.

Durch die qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung (Stufe 1) würde in Abhängigkeit der Größe der Firstspalten und je nach Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten der früher oder später eintretende kraftschlüssige Verbund zwischen Salzgrus und Pfeiler-Schweben-System um ca. 6 bis 14 Jahre vorgezogen. Durch die mit der Firstspaltverfüllung aktivierbare Versatzsteifigkeit könne bereits 1 bis 2 Jahre nach Beendigung der Verfüllmaßnahme eine nennenswerte Beteiligung des Versatzes am Lastabtrag und somit ein wesentlicher Beitrag zur Stabilisierung der Südwestflanke erwartet werden.

Die Erhöhung der Versatzsteifigkeit durch eine druckhafte Volumenzugabe durch Verdichtungsinjektionen der Stufe 2 führe zu einer weiteren Stabilisierung im Tragverhalten der gesamten Südwestflanke. So könnten durch die Verdichtungsinjektionen in kurzer Zeit Versatzsteifigkeiten von über 0,5 MPa erzielt werden, welche ohne zusätzliche Maßnahmen erst nach ca. 10 bis 15 Jahren und unter erheblichen Verformungen der Südwestflanke auftreten würden.

Die Wirkungsweise der vorgesehenen Verdichtungsinjektionen beruht auf der Verdichtung durch Verdrängung des anstehenden Salzgruses durch den Verpressmörtel, wodurch es zu einer Verringerung der Porosität und somit zu einer Erhöhung der Versatzsteifigkeit kommt. CDM veranschaulicht in Anlage 58 diesen Sachverhalt ausgehend von den bislang betrachteten 4 unterschiedlichen Ausgangsporositäten ($n = 38, 42, 45$ und 48%). Die Betrachtung der Porositäten zwischen $n = 38$ und 48% beruht auf Ergebnissen von unterschiedlichen Untersuchungen an verschiedenen Stellen in den Kammern und deckt somit die Bandbreite der in den Kammern vorhandenen Porositäten des Salzgruses ab. Durch das injizierte Volumen kommt es zu einer Volumenminderung im Versatz und, in dem Maße wie der Porenraum abnimmt, zu einem Anstieg der Versatzsteifigkeit. Die Porenminderung entspricht dabei dem eingebrachten Volumen.

Zur Einschätzung der vorgeschlagenen Maßnahmen hinsichtlich des Tragverhaltens der Südwestflanke wurden numerische Modellierungen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens nach der Methode der Finiten Elemente mit dem Programmpaket TOCHNOG durchgeführt.

Als Modell wurde ein ebener Schnitt auf Höhe der 574-m-Sohle gewählt, der unter Vernachlässigung der Wetter- und Wendelstrecken und der Kammer 1 die Kammern 2 und 9 sowie die angrenzenden Gebirgsbereiche enthält. Die Spannungsrandbedingungen für die querschlägige Beanspruchung aus dem Deckgebirge und der Versatzdruck in den Kammern wurden analytisch ermittelt. Unter Ansatz des Kriechverhaltens entsprechend dem Stoffmodell BGRa für Steinsalz wurden folgende Lastfälle berechnet:

- Fall ohne: keine Maßnahmen
- Fall a: nur Firstspaltverfüllung
- Fall b: Firstspaltverfüllung und Versatzdruck 0,5 MPa in Kammern 6 und 7
- Fall c: Firstspaltverfüllung und Versatzdruck 0,5 MPa in Kammern 5 bis 8
- Fall d: Firstspaltverfüllung und Versatzdruck 0,5 MPa in Kammern 3 bis 8

Neben grafischen Darstellungen von Ergebnisgrößen wird als wesentliches Ergebnis die über 10 Jahre gemittelte plastische Stauchungsrate der Pfeiler für die o. g. Lastfälle tabellarisch angegeben. Dabei zeigt sich, dass die Deformationen im System im Wesentlichen aus der Verformung der Pfeiler und nur untergeordnet aus der Gebirgsfeste resultieren.

Die Auswertung der über 10 Jahre gemittelten plastischen Pfeilerstauchungsraten zeigt, dass diese durch die Maßnahmen der Stufe 1 (Firstspaltverfüllung) deutlich reduziert werden; durch die Maßnahmen der Stufe 2 (Hohlraumreduzierung im Versatz) werden die Pfeilerstauchungsraten zusätzlich in geringerem Umfang erniedrigt. Am Beispiel des starker Deformation ausgesetzten Pfeilers 6/7 werden folgende Stauchungsraten prognostiziert: 131 mm/a ohne technische Maßnahmen (Fall ohne), 108 mm/a (Reduzierung um ca. 18 %) bei wirksamer Firstspaltverfüllung (Fall a) und 93 mm/a (Gesamtreduzierung um ca. 29 %) bei Hohlraumreduzierung in den Kammern 3 bis 8 (Fall d). In den Fällen b und c, bei denen weniger Kammern von den Maßnahmen betroffen sind, werden lediglich geringfügig höhere Pfeilerstauchungsraten ausgewiesen als im Fall d.

Bezogen auf die gemittelten Pfeilerstauchungsraten werden somit ca. zwei Drittel der maximal erreichbaren Reduzierung durch die Firstspaltverfüllung (Stufe 1) und ein weiteres Drittel durch die Hohlraumreduzierung in den Kammern (Stufe 2) erreicht.

Laut CDM sei zu erkennen, dass innerhalb der Gesamtstruktur keine Spannungsumlagerung zu anderen Systembereichen hin stattfindet. Sämtliche Pfeiler erfahren im Fall der Firstspaltverfüllung durch den Innendruck in den Kammern 6 und 7 (zusätzlich zu dem Innendruck aus Eigengewicht des Versatzmaterials) eine Entlastung, was sich in der Abnahme der plastischen Verformungen zeigt (CDM2008, Anlage 37). Dieser Effekt verstärkt sich mit der Zahl der behandelten Abbaukammern.

Gleichzeitig zeigen die Berechnungsergebnisse, dass mit wachsender Anzahl an ertüchtigten Abbaukammern die Wirkung auf das Gesamttragverhalten der untersuchten Struktur nur noch geringfügig zunimmt. Demnach reiche es aus, nur bei einer begrenzten Anzahl an Kammern einer Sohle eine Erhöhung der Versatzsteifigkeit auf $p_v = 0,5 \text{ MPa}$ durchzuführen, um eine nennenswerte Änderung im Deformationsverhalten der Pfeiler zu erzielen.

CDM weist explizit darauf hin, dass eine unmittelbare Aussage zur Zeitdauer der sicheren Statik des Grubengebäudes hieraus jedoch nicht abgeleitet werden könne. Dies bedürfe einer gesonderten statischen Berechnung.

Nach Ansicht der CDM führten die hier vorgeschlagenen Maßnahmen zu keiner Verlängerung der Arbeiten im Zuge des bestehenden Schließungskonzeptes. Das hier vorgestellte Konzept beinhalte, neben den grundsätzlichen Ansätzen und Abschätzungen zur Wirksamkeit, die für eine praktische Durchführung notwendigen Überlegungen und Hinweise.

3.2 Bewertung durch die AGO

Das zweistufige Grundkonzept mit Stufe 1 „Firstspaltverfüllung“ und Stufe 2 „Hohlraumverminderung im Salzgrus“ wird als plausibel erachtet.

Die vereinfachenden zweidimensionalen FE-Berechnungen zur Abschätzung der Wirksamkeit der Maßnahmen werden als zweckmäßig bewertet. Der gewählte Modellausschnitt, die Spannungs- und Verschiebungsrandbedingungen, die berücksichtigten Lastfälle, die verwendeten Stoffansätze und die dokumentierten Materialparameter erscheinen geeignet, eine überschlägige Bewertung der Wirksamkeit der Firstspaltverfüllung und der Verdichtungsinjektionen vorzunehmen.

Aufgrund der maßgeblichen Auswirkung (ca. zwei Drittel im betrachteten 2-dimensionalen Modellfall) auf die Pfeilerstauchungsraten wird durch AGO die Firstspaltverfüllung (Stufe 1) als prioritär anzugehende Maßnahme zur Verbesserung der gebirgsmechanischen Entwicklung des Tragsystems der Südwestflanke angesehen.

Die als wesentlich aufwändiger eingeschätzten Maßnahmen der Stufe 2 sollten erst nach Klärung der offenen Fragen (z. B. Machbarkeit, Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit, Bauzustände) zur Umsetzung kommen. Insbesondere ist plausibel darzulegen, wie mit dem durch diese Maßnahme induzierten Steifigkeitskontrast die beschriebene vergleichmäßigende Wirkung auf das Verformungsbild erzielt werden kann.

Der Empfehlung von CDM, die Wirksamkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen des zweistufigen Konzepts durch eine angepasste, dreidimensionale geomechanische Modellrechnung zu überprüfen und zu quantifizieren, sollte gefolgt werden.

Eine Diskussion eventuell nachteiliger Auswirkungen (wie z.B. durch die Maßnahmen zur Steifigkeitserhöhung ausgewählter Kammern verursachte Spannungsumlagerungen, oder Behinderung von Fluidbewegungen durch den Einbau verhältnismäßig dichter plattenartiger Elemente bei der Firstspaltverfüllung), die sich aus der Umsetzung des vorgeschlagenen Konzepts ergeben könnten, wird von CDM nicht geführt.

Der grundsätzlich positive Effekt des zweistufigen Konzepts manifestiert sich im Wesentlichen in einer mobilisierten Stützwirkung auf die Haupttragelemente des Grubengebäudes, die Pfeiler, die damit wieder verstärkt zur Lastabtragung beitragen können. Die resultierende Reduzierung der Verformungsraten in der Größenordnung von ca. 20 bis 30 Prozent (im 2-dimensionalen Modellfall) wird ebenfalls positiv bewertet. Allerdings muss festgestellt werden, dass die Verformungen weiter voranschreiten jedoch gegen einen geringeren Endwert streben. Dennoch ist nicht prognostizierbar, in welchem Maße sich dies auf die Entwicklung des Lösungszuflusses aus dem Deckgebirge auswirkt.

Aus sicherheitlicher Sicht wäre daher eine möglichst vollständige Injektion aller Kammern wünschenswert, weil dadurch auch der Gesamtbetrag der Verformungen bzw. der Volumenkonvergenz stärker reduziert und das Nebengebirge weniger stark beansprucht wird. Außerdem wird das flutungsfähige Porenvolumen verringert und somit das auspressbare kontaminierte Lösungsvolumen sowie das Auf- und Umlösepotential für Carnallit minimiert.

Nach Auffassung der AGO sind neben den Verschiebungsraten auch die Verschiebungsdifferenzen im Nebengebirge im Bereich der Abbauränder als Gefahr zu betrachten. Im Bereich der Abbauränder kommt es dadurch zu lokalen Spannungskonzentrationen im Nebengebirge, die mit zunehmender Verformung immer weiter ansteigen und schließlich zum Bruch und nachfolgend zum möglichen Eintritt größerer Grundwassermengen aus dem Deckgebirge führen können. Es gilt daher nicht nur die

Verschiebungsraten, sondern auch die Verschiebungs-Endbeträge effektiv zu begrenzen. Firstspaltverfüllungen und Versatzinjectionen bewirken beides, allerdings nur proportional zur Menge des Injektionsgutes.

Insbesondere sollten (zusätzlich zu den in (CDM2008) betrachteten Varianten) vorrangig die den Baufeldgrenzen am nächsten gelegenen Kammern ausgesteift werden, um die dort vorhandenen abrupten Steifigkeitssprünge und die dadurch bewirkten Verschiebungsdifferenzen und Spannungskonzentrationen zu vermindern.

Grundsätzlich sollten die Verfüllmaßnahmen nicht allein unter dem Gesichtspunkt der Gebirgsmechanik, sondern auch im Sinne einer Hohlraumminimierung unter Aspekten der Langzeitsicherheit gesehen werden.

4 Technisches Konzept zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit

4.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts

Die von CDM beschriebenen Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit des Salzgruses in den Abbaukammern der Südwestflanke werden in Kap. 7 der Konzeptstudie im Detail entwickelt und vorgestellt.

In einer ersten Stufe würden die Firstspalte in den Abbaukammern durch eine qualitätsgesicherte Verfüllung geschlossen. Aufbauend darauf erfolgte die Abarbeitung der zweiten Stufe. Durch Verdichtungsinjectionen würde eine Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial in ausgewählten Abbaukammern mit damit einhergehender Steifigkeitserhöhung erzielt.

Technik Firstspaltverfüllung

Die Verfüllung des Firstspaltes erfolgte durch Pumpversatz des Verfüllgutes. Hierzu müssen die Öffnungen der Abbaukammer druckfest (hydrostatischer Maximaldruck bzw. Verfülldruck plus Sicherheitszuschlag) verschlossen werden. Dies kann durch die nachfolgend aufgeführten Verfahren erfolgen:

- Abmauern der Öffnungen,
- Spritzbetonverbau,
- Holzverschalungen oder
- Einbau von Bullflexschläuchen.

Die vorgenannten Verfahren zur Schließung der Öffnungen der Abbaukammern sind auf der Schachanlage im Einsatz und Stand der Technik.

Das Verfüllgut wird über eine Versatzleitung durch eine Bohrung in die Verfüllhöhlräume eingebracht. Durch eine Verfüllung vom Firsthochpunkt einer Kammer aus wäre weitestgehend sichergestellt, dass die gesamte Kammer gefüllt werden kann. Eine durch die Sackung des Salzgruses entstandene gewölbte Kontur innerhalb der Kammer begünstigt dieses Verfahren, da der als Verfüllgut vorgesehene Sorelbeton die Neigung der Versatzgutoberfläche beim Fließen ausnutzen kann. Die Verfüllung erfolgt sinnvollerweise immer über mehrere Verfüllbohrungen, um eine möglichst hohe Firstanbindung zu erreichen. Die Entlüftung der Kammer während des Verfüllvorganges erfolgt entweder parallel über die Verfüllbohrungen oder über separate Entlüftungsbohrungen.

Diese Bohrungen können hierbei durch das Salzgestein entweder aus den im Firstniveau verlaufenden Abbaubegleitstrecken oder aus der im Bereich der jeweiligen Abbaukammer liegenden Wegstrecke erfolgen (CDM2008, Anlage 46). Wie aus Anlage 9 zu (CDM2008) ersichtlich ist, können die Abbaukammern nur begrenzt von den jeweils darüber liegenden Sohlen aus durch Bohrungen erreicht werden, ohne durch weitere Kammern bohren zu müssen. Ohne diese Einschränkung können von der 490-m-Sohle aus die Kammern auf der darunter liegenden 511-m-Sohle verfüllt werden, da hier neben den Wegstrecken auch die Kammern verwendet werden können.

Als Kriterium zur Überprüfung des Erfolges der Verfüllmaßnahme dient der Vergleich von eingebrachter Masse zum zuvor bestimmten Firstspaltvolumen.

Zur Vorermittlung der einzubringenden Massen wird ein mittlerer Firstspalt mit $h_F = 0,35$ m angenommen, der gleichmäßig über die Kammergrundfläche verteilt ist.

Die größten Firstspalte von > 70 cm (in Anlage 22 rot dargestellt) sollten vor der Verfüllmaßnahme mittels Blasversatz mit leicht angefeuchtetem Versatzmaterial soweit verfüllt werden, dass sie nur noch einen geringen Firstspalt aufweisen. Hierdurch wird die Menge an einzubringendem Sorelbeton deutlich verringert.

Da eine Verfüllung von höher liegenden Abbaubegleitstrecken aus nicht für alle Kammern uneingeschränkt möglich ist, wird für eine erste Abschätzung der Zeiten und Massen zwischen den Abbaukammern unterschieden, die über einen uneingeschränkten, direkten Zugang verfügen und denen mit einem eingeschränkten Zugang zu den Kammeröffnungen (CDM2008, Anlage 47). Der freie Zugang ist bei letzteren durch die schon länger zurückliegenden Verfüllungen der Abbaubegleitstrecken in diesen Bereichen ohne Räumung der Wegstrecken nicht mehr gegeben.

Der Großteil der unbeschränkt zugänglichen Kammern liegt im oberen Bereich des Grubengebäudes, welches am stärksten durch Verformungen auf den Gebirgsdruck reagiert. Somit kann durch die Aktivierung der Versatzsteifigkeit in diesem Bereich ein maßgeblicher Beitrag zur Aktivierung des Lastabtrages auch des Versatzes und somit einer Entlastung des in diesem Bereich hoch beanspruchten Pfeiler-Schweben-Systems erreicht werden ohne dass die schon verschlossenen Wegstrecken wieder aufgefahren werden müssen.

Auf Grundlage dieser Ansätze werden bei 52 Abbaukammern die Firstspalten durch eine qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung verschlossen. Das hierbei, basierend auf den Sohlenrissen von CDM ermittelte, einzubringende Volumen bei einer mittleren Firstspalte mit $h_F = 0,35$ m beträgt ca. 40.000 m^3 und verteilt sich auf 8 Sohlen zwischen 511m und 658m.

Der Transport des als Verfüllgut vorgesehenen Sorelbetons bis zu den Abbaukammern erfolgt in zwei Etappen. Übertage wird in einer Baustoffanlage das Vorprodukt ($\text{NaCl} + \text{MgO}$) gemischt und anschließend pneumatisch in das Grubengebäude verbracht. In mobilen Mischern wird das Vorprodukt mit der MgCl_2 -Lösung vermischt. Diese Suspension kann über Förderlängen von 150 m noch gut transportiert werden. Die Förderleistung beträgt in dem Fall $20 \text{ m}^3/\text{h}$ und es kann ein Druck von 20 bar erzeugt werden. Längere Förderwege von bis zu 250 m können bei entsprechend geringeren Leistungen ebenfalls realisiert werden.

Der Zeitbedarf zur Einbringung dieser Massen hängt ab von:

- dem Spaltvolumen,
- der Misch- und Leitungskapazität,
- der Verfüllrate [m^3/h], bei druckhafter Verfüllung ggf. reduziert

Diese Zeiten werden maßgeblich durch die auf der Schachanlage zur Verfügung stehende Infrastruktur und den Gerätschaften beeinflusst. So muss eine ausreichende Förderleistung durch das Leitungsnetz gewährleistet werden. Die zu realisierenden Pumpzeiten werden unter anderem vom Wartungsaufwand der Pumpen beeinflusst.

In Tabelle 7.2 sind von CDM die abgeschätzten Zeiten zur Firstspaltverfüllung in Abhängigkeit von 3 unterschiedlichen Förderraten bei einer Netto-Pumpzeit von 16 Stunden/Tag aufgelistet. Die Netto-Pumpzeit resultiert hierbei aus der derzeit möglichen Arbeitszeit unter Tage von 19 Stunden und enthält einen Ansatz von 3 Stunden je Tag für Wartungsarbeiten. Ergebnisse einer weitergehenden Parameterstudie auch unter Ansatz einer 24-stündigen Arbeitszeit können der Anlage 48 entnommen werden. Die Förderleistung der sich derzeit im Betrieb befindlichen Baustoffanlage beträgt 20 m³/h mit einer täglichen Fördermenge von 250 bis 360 m³/d für den angesetzten 3-Schichtenbetrieb. Die Variante eines 16stündigen Pumpenbetriebs mit einer Förderrate von 15 m³/h stellt somit die auf Basis dieser Daten zu verstehende durchschnittliche Tagesleistung dar.

Für den Fall der 16stündigen reinen Verfüllung (keine Nebenarbeiten) können bei einer Förderrate der Mischanlage von 15 m³/h z. B. die Firstspalten der Abbaukammern auf der 658-m-Sohle innerhalb von 8 Tagen verschlossen werden. Zur Verfüllung aller 52 Kammern werden unter diesen Randbedingungen insgesamt 165 Arbeitstage reiner Verfüllzeit zur Schließung der Firstspalten benötigt.

Entsprechende Verkürzungen bzw. Verlängerungen der reinen Verfüllzeiten ergeben sich durch die Erhöhung bzw. Abminderung der Förderraten bzw. Pumpzeiten. Die von CDM angegebenen Zeiten liegen zwischen 124 Tagen (Minimal – Förderrate 20 m³/h) und 248 Tagen (Maximal – Förderrate 10 m³/h).

Dazu kommt der Zeitbedarf für die baubegleitenden Arbeiten, wie das Niederbringen der Bohrungen, die Verschlussarbeiten sowie die Wartungsarbeiten an den Gerätschaften und das Umsetzen von Mischern und Rohrleitungen.

Insgesamt gesehen schätzt CDM unter den getroffenen Annahmen für die Firstspaltverfüllung der 52 Kammern der Südwestflanke einen Zeitbedarf von ca. 1 Jahr ab.

Diese Verfüllarbeiten könnten parallel zu den Arbeiten im Zuge des derzeit von HMGU vorgeschlagenen Schließungskonzeptes durchgeführt werden, setzen jedoch in diesem Fall zusätzliches Personal und Gerätschaften voraus.

Mittels Eignungsprüfungen ist sicherzustellen, dass der als Verfüllgut vorgesehene Sorelbeton über die entsprechenden rheologischen Eigenschaften verfügt und die Festigkeitseigenschaften an das umgebende Material angepasst sind, um den Einbau starrer Scheiben auszuschließen.

Zur Sicherstellung der angestrebten hochwertigen und vollflächigen Verfüllung der Firstspalten mit Sorelbeton ist die Kenntnis über die Kontur der Hohlräume einschließlich der Firsthochpunkte von entscheidender Bedeutung. Das Aufmass solcher nicht begehbaren Hohlräume ist durch die fortgeschrittene Entwicklung in der Messtechnik und der Entwicklung von ferngesteuerten und selbst steuernden Fahrwagen sowie der Minimierung der erforderlichen Scanner möglich geworden.

Der Nachweis der Machbarkeit einer solchen Messkampagne könnte im Rahmen einer Projektstudie begleitend mit den im Kapitel 8 aufgeführten Vorversuchen stattfinden. Im Zuge dieser Studie könnte dann auch die Leitungsführung (zur Stromversorgung und Datenerfassung) optimiert werden. Sofern

die Machbarkeit aufgrund der z. T. „komplexen Geometrie“ des Versatzes nicht erbracht werden kann, sind die Hohlräume zumindest mit optischen Geräten zu erfassen und zu dokumentieren.

Durch die Auffüllung der Firstspalten und den damit kraftschlüssigen Verbund zwischen Salzgrus und Pfeiler-Schweben-System wird durch die zeitlich auftretenden Verschiebungen der Südwestflanke die Versatzsteifigkeit aktiviert. Die Entwicklung und Erhöhung der Versatzsteifigkeit wird je nach Ausgangsporosität des Salzgruses und der Stauchungsrate unterschiedlich erwartet.

Deutlich zeigen sich in der grafischen Darstellung (CDM2008, Anlage 49) die Einflüsse der Stauchungsrate und der Anfangsporosität auf die Versatzsteifigkeitsentwicklung. Je größer die Stauchungsrate desto schneller steigt der Wert der Versatzsteifigkeit an. Die größten Werte werden dagegen bei kleiner Anfangsporosität erzielt.

Aus Anlage 49 zu (CDM2008) ist deutlich erkennbar, dass schon nach relativ kurzer Zeit der Herstellung des vollständigen kraftschlüssigen Verbundes nennenswerte Versatzsteifigkeiten erreicht werden können. So können sich durch die alleinige Firstspaltverfüllung bei einer Ausgangsporosität von 42% Versatzsteifigkeiten nach rd. 2 Jahren in Abhängigkeit der Verformungsgeschwindigkeit der Pfeiler im Bereich von 0,15 bis 0,20 MPa einstellen. Dies entspricht etwa dem 4fachen Wert des wirkenden seitlichen Drucks aus Eigengewicht des Verfüllmaterials in Höhe von 0,045 MPa.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass schon im Verlauf bzw. kurz nach Abschluss der Verfüllungsmaßnahmen ein positiver Effekt auf die Verformungsgeschwindigkeit der Südwestflanke zu erwarten ist. Mit den Jahren steigt die Versatzsteifigkeit unter der Voraussetzung gleich bleibender Randbedingungen kontinuierlich an und kann nach 5 Jahren Werte um die 0,3 bis 0,4 MPa erreichen.

Technik Verdichtungsinjektionen

Durch die Firstspaltverfüllung erfolgt ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Salzgrus und dem Pfeiler-Schweben-System, wodurch sich bei weitergehender Verschiebung der Kammerwand eine Versatzsteifigkeit ausbildet. Diese nimmt abhängig von der in Stufe 2 vorgesehenen Verdichtung des Salzgruses weiter zu (CDM2008, Anlage 24).

Die numerischen Berechnungen zeigen auf, dass zur Erzielung einer signifikanten Reduzierung der Verformungsrate (nicht Verformungs-Endbetrag) eines gesamten Sohlenbereichs nicht alle Kammern behandelt werden müssen. Vielmehr kommt es gemäß den numerischen Berechnungen darauf an, die am stärksten belasteten Bereiche der Südwestflanke durch Volumenzugaben in den betroffenen Kammern zu ertüchtigen. Diese liegen zwischen der 515-m-Sohle und der 658-m-Sohle im Bereich des Zentralpfeilers und im Bereich des Pfeilers zwischen den Abbaukammern 6 und 7.

In den Anlagen 51 bis 56 sind insgesamt 6 mögliche Varianten für eine Verdichtungsinjektion in ausgewählten Kammern dargestellt. Variante 1 betrachtet hierbei eine „großflächig“ angelegte Verdichtungsinjektion, die insgesamt 20 Kammern mit hohen Verformungsraten in den angrenzenden Pfeilern berücksichtigt. Bei der Variante 6, die eine Minimallösung darstellt, beschränkt sich die Verdichtungsinjektion auf die Stützung des Pfeilerbereichs 6/7. Wie in Anlage 56 dargestellt, werden bei dieser Variante lediglich 8 Kammern mit Verdichtungsinjektionen beaufschlagt.

Im Hinblick auf den zeitlichen Aspekt wird von CDM vorgeschlagen, zuerst mit den Verdichtungsinjektionen der Variante 6 (8 Kammern) zu beginnen und dann in Abhängigkeit von den sich einstellenden Verformungsgeschwindigkeiten in den Pfeilern und dem Schließungskonzept zu

entscheiden, ob weitere Kammern mit einer Verdichtungsinjektion bearbeitet werden sollen oder müssen.

Zur Ermittlung der benötigten Verfüllvolumina wird in einem ersten Schritt das Ausgangsvolumen jeder Kammer zum Zeitpunkt der Injektionsmaßnahme abgeschätzt. Eine Aufstellung der zu injizierenden Volumen in Abhängigkeit von zu erzielender Versatzsteifigkeit und Ausgangsporosität ist in Anlage 60 tabellarisch aufgelistet und in Anlage 61 graphisch dargestellt. In den numerischen Berechnungen (Kapitel 6.2) wurde aufgezeigt, dass mit einer Versatzsteifigkeitserhöhung einzelner Kammer auf $p_v = 0,5$ MPa eine signifikante Änderung des Deformationsverhaltens des Pfeiler-Schweben-Systems erreicht werden kann. Ziel dieser Maßnahme ist es somit, durch Verdichtungsinjektionen eine frühestmöglich wirksame Versatzsteifigkeit von 0,5 MPa zu erzielen.

Bei der in Kapitel 7.4.1 beschriebenen Vorzugsvariante 6 (8 Kammern) sind ausgehend von einer mittleren Porosität des Salzgruses von $n = 42\%$ zum Erreichen einer Versatzsteifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa ca. 5.000 m³ Material in den Versatz in den ausgewählten 8 Kammern zu injizieren, was rd. 15% des Gesamtvolumens und ca. 1/3 des Porenvolumens der Standardkammer entspricht.

In Summe wären mit Verdichtungsinjektionen nach Angaben von CDM in Abhängigkeit von der vorgefundenen Ausgangsporosität (von CDM zwischen 39 und 48% variiert) und der angestrebten Versatzsteifigkeit (0,5 bis 1,5 MPa) bei Variante 6 zwischen 4.500 und 47.000 m³ Verfüllgutvolumen zu injizieren.

Der Zeitbedarf der Injektionsmaßnahme hängt von verschiedenen Parametern ab. Diese ergeben sich aus dem eigentlichen Ziel der Maßnahme, also der angestrebten Versatzsteifigkeit, der Ausgangsporosität des Salzgruses und den technischen Randbedingungen, wie Pumpenzahl, Verpressrate usw.. Auch die Anzahl der Verpresspunkte bzw. die Anzahl an Verpressrohren ist von maßgebender Bedeutung.

Im Einzelnen ist im Vorfeld der Maßnahme die Verpressrate, bei der sich die Plomben planmäßig ausbilden und die mit der Pumpentechnik realisierbar ist, festzulegen. Dazu muss ein Grenzdruck auf Basis geotechnischer Überlegungen, einer Abschätzung der maximalen Leitungsdrücke sowie unter Berücksichtigung der Pumpenauslastung bestimmt werden. Die Bemessung der Verpressmenge erfolgt in Abhängigkeit von den Abständen der Verpresspunkte untereinander und dem den Punkten zugeordneten Verpressbereichsvolumen und der angestrebten Reduzierung des Porenvolumens.

Für die folgenden Betrachtungen wird von 65 Verpressrohren (siehe hierzu auch Anlage 65) je Abbaukammer ausgegangen. Bei einer zu erzielenden Versatzsteifigkeit des Salzgruses von $p_v = 0,5$ MPa und einer Ausgangsporosität von 42% muss gemäß Anlage 58 eine mittlere Reduzierung des Porenanteils von 4,3% erreicht werden.

Die von CDM angegebenen Bearbeitungszeiten für die Verdichtungsinjektionen liegen für die favorisierte Variante 6 bei Ansatz einer 16stündigen täglichen Arbeitszeit und bei 2 parallel arbeitenden Bohr- und Verpresseinheiten bei ca. 160 Arbeitstagen. Berücksichtigt man zusätzlich noch vorbereitende Arbeiten zur Herstellung einer entsprechenden Infrastruktur zur Sicherstellung einer kontinuierlichen Materialbereitstellung, Einbringung der Gerätschaften unter Tage und sonstige baubegleitende Maßnahmen so ist für die Ausführung der Verdichtungsinjektion (Variante 6) von einem Zeitbedarf von ca. 1 Jahr auszugehen.

Das Bohrkonzept ist nach Angaben von CDM noch umfassend mit und von Fachfirmen zu klären. Aus den Befragungen der verschiedenen Spezialbohrfirmen mit einschlägiger Bohrerfahrung im Salinar bleibt festzuhalten, dass keine der angefragten Schachtbau- bzw. Spezialtieffaufirmen über

Erfahrungen mit Bohrungen im inhomogenen Salzgrus (Salzgrus und Salzblöcke) verfügt. Entsprechend ist zu empfehlen die von den Fachfirmen vorgeschlagenen und vorausgewählten Verfahren zunächst fachtechnisch auf Plausibilität und bei Erfolgsaussicht schließlich im Rahmen der Voruntersuchungen (s. unten) vorab zu überprüfen.

Die technische Durchführung der Maßnahmen zur integralen Versatzsteifigkeitserhöhung des Salzgruses in den Abbaukammern besteht zum einen aus den Bohrungen zur Einbringung der Verpressrohre und zum anderen aus der Injektionsmaßnahme selbst.

Die Bohrungen setzen die Schaffung geeigneter Bohrstandorte durch Auffahrung von Hohlraum voraus. Die Bohransatzpunkte können - zusammengefasst in Gruppen - ausgehend von den Abbaubegleitstrecken und/oder der Wendelstrecke in gesondert aufzufahrenden Bohrkavernen liegen.

Als Injektionsmörtel dem Grunde nach geeignet und ausreichend erprobt kann der auf der Schachanlage zum Bau der Strömungsbarrieren verwendete Sorelbeton angesehen werden.

4.2 Bewertung durch die AGO

Firstspaltverfüllung

Die technische Machbarkeit der Firstspaltverfüllung ist vermutlich sichergestellt, da im Wesentlichen Bauverfahren und Materialien eingesetzt werden, die dem Stand der Technik genügen und/oder im Rahmen der Maßnahmen des derzeitigen Schließungskonzepts bereits vorgesehen sind. Es ist nicht nachvollziehbar welche Anforderungen an die Firstbündigkeit der Verfüllung gestellt werden. CDM quantifiziert den Verfüllgrad nicht, sondern benutzt den Begriff der „qualitätsgesicherten“ Verfüllung.

Nicht plausibel erscheint der AGO wieso Firstspalte > 70 cm vorab mit Salzgrus (Blasversatz) teilverfüllt werden sollen. Auswirkungen während der Betriebsphase (z. B. auf die Fassung der zutretenden Lösungen, Temperatureffekte, Feuchtigkeitseintrag, Spannungsumlagerungen) sollten ebenfalls betrachtet werden.

Unbeantwortet bleibt die Frage, wie sich die Firstspaltverfüllung bei Realisierung des bestehenden Stilllegungskonzepts (Schutzfluideinleitung und Befeuchtung von Versatz mit erwarteter Versatzsackung in der Größenordnung 10%) verhält.

Die Auswirkungen der Firstspaltverfüllung unter Langzeitsicherheitsaspekten (Kanalisation durch plattenartige, gering durchlässige Sorelbetonplatten, Bildung von Gaspolstern) werden nicht detailliert erörtert.

Die relativ schnelle Wirksamkeit der Firstspaltverfüllung hinsichtlich der Reduzierung der Verformungsraten wird als positiv bewertet.

Die Maßnahmen zur Realisierung einer Qualitätssicherung bei der Firstspaltverfüllung werden als wesentliche Voraussetzung für ihre ausreichende und insbesondere zeitnahe Wirksamkeit angesehen. Nachteilig erscheint, dass die erforderlichen Methoden und/oder Geräte zur Volumenbestimmung des Firstspalts nicht ausreichend erprobt sind und erst im Rahmen der Voruntersuchung getestet werden sollen. Die Erprobung der für die Firstspaltverfüllung notwendigen Geräte und Verfahren sollte unabhängig von dem untertägigen Erprobungsprogramm für die Verdichtungsinjektionen erfolgen.

Verdichtungsinjektion

Bei Verdichtungsinjektionen führt CDM bereits offene Fragen hinsichtlich Bohr- und Injektionstechnik an und setzt erfolgreich abgeschlossene Voruntersuchungen vor der Realisierung voraus. Insofern bleibt zu den Verdichtungsinjektionen ein Fragezeichen zur „Technischen Machbarkeit“ bestehen, auch wenn die Probleme lösbar erscheinen.

Eine Bewertung von Bauzuständen unter Aspekten wie Aufheben des bisherigen (geringen) Stützdrucks durch die Injektionsmaßnahme, Schwächung von lastabtragenden Elementen durch neu aufzufahrende Grubenräume (Bohrkavernen) und Injektionsbohrlöcher oder statische Belastung von (Rest)Schweben durch zusätzliche Auflast und Injektionsdruck wird nicht gegeben.

Die vorgeschlagene Anfangskonfiguration der Verdichtungsinjektionen bewirkt gemäß den überschlägigen FE-Berechnungen zur Vordimensionierung „nur“ eine weitere Reduzierung der mittleren Pfeilerstauchungsrate um ca. 10%. Der Nutzen dieser Maßnahme ist unter Berücksichtigung der Zeit für die Realisierung zu bewerten. CDM führt hierzu selbst aus: *„Schon deshalb ist es dringend angebracht, mit den bereits im Kapitel 6.2 empfohlenen zusätzlichen Untersuchungen mit der FEM auf Basis umfassender Stoffmodelle und großräumiger dreidimensionaler Modelle (wie sie z. B. beim Institut für Gebirgsmechanik, Leipzig vorliegen) den Bedarf auf Kammerertüchtigungen noch einmal genauer nachzurechnen und ggf. einzugrenzen.“* (CDM2008, S. 54). Dieser Einschätzung der CDM schließt sich die AGO an. Zusätzlich sollten weitere Fälle betrachtet werden, insbesondere sollten Injektionsmaßnahmen in den Kammern entlang der Baufeldränder hinsichtlich eines Abbaus von Scherspannungen im angrenzenden Deckgebirge untersucht werden.

Weitere zu diskutierende Fragen zur Verdichtungsinjektion sind: Feuchteintrag in den Versatzkörper und thermische Spannungen. Die beim Abbinden des Betons gemessenen Temperaturen bewegen sich nach Angaben von CDM in einem Bereich von 80 bis 87°C, teilweise sind aber auch deutlich höhere Werte bis ca. 100°C gemessen worden.

Gesamtbewertung der stabilisierenden Maßnahmen

Die Notwendigkeit stabilisierender Maßnahmen erscheint unbestritten. Der in die Abbaukammern der SW-Flanke eingebrachte Versatz ist nicht form- und kraftschlüssig eingebracht. Der noch erforderliche Zeitraum bis zur Entwicklung eines signifikanten Versatzdruckes ist relativ lang. Durch die von CDM vorgeschlagenen Maßnahmen könnte dieser Zeitraum wesentlich verkürzt werden (um 6-14 Jahre). Vorteile wären:

- Bei Realisierung des derzeitigen Schließungskonzeptes wäre das System in einem geomechanisch stabileren Zustand.
- Das gilt auch für alternative Schließungskonzepte.
- Die Maßnahmen sind relativ schnell (im Zeitraum weniger Monate bis Jahre) und mit überschaubarem Zeit- und Kostenaufwand realisierbar.

Die beiden von CDM vorgeschlagenen Maßnahmen Firstspaltverfüllung und Verdichtungsinjektionen können getrennt beurteilt und getrennt umgesetzt werden. Die Firstspaltverfüllung wird von der AGO als sinnvolle Maßnahme erachtet. Das gleiche gilt vorbehaltlich der noch zu klärenden Fragen auch für die Verdichtungsinjektionen.

5 Voruntersuchungen

5.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts

Beim Einsatz von Injektionstechniken für Volumenersatz- und Verdichtungszwecke wird in der Regel eine Probeinjektion ausgeführt (DIN EN 12715). Bei der vorliegenden Aufgabe ist dies zur Untersuchung und Bestätigung der erwarteten Wechselwirkung zwischen dem Verpressmörtel und dem Salzgrus unabdingbar.

Darüber hinaus ist die Bohrtechnik für den Salzgrus zu entwickeln und es sind verfahrenstechnische Details abzuklären.

Das vorab durchzuführende Untersuchungsprogramm gliedert sich in die nachfolgend beschriebenen 3 Abschnitte:

- Abschnitt 1 Verifizierung Materialausgangswerte, Wechselwirkung Injektionsgut – Salzgrus
- Abschnitt 2 Überprüfung der Bohrtechnik und Gerätschaften
- Abschnitt 3 Überprüfung der Misch- und Verpressabläufe

Der **Abschnitt 1** besteht aus einem Laborprogramm und einer Untersuchung im Maßstab 1:1 zur Verifizierung der der Planung zugrunde liegenden Annahmen und der zuvor gewonnenen Erkenntnisse.

Aufbauend auf die für die injektionstechnischen Belange durchzuführenden Laborversuche am Verpressmörtel, wie z. B. die Bestimmung der Viskosität und des Setzfließmaßes, soll hier die Wechselwirkung mit dem Salzgrus untersucht werden. Hierzu werden u.a. geeignete Labor-Einpressversuche vorgesehen. Ziel der Arbeiten ist die Eignungsprüfung und ggf. Anpassung der Mörtelrezeptur. Mit dieser Grundrezeptur und in Kenntnis der betreffenden Materialkennwerte erfolgt dann die vorläufige Festlegung von Verpressraten und Drücken für Abschnitt 3.

Im Rahmen von Abschnitt 1 werden die Wechselwirkungen zwischen Verfüllgut und Salzgrus untersucht. Mit geeigneten Laboruntersuchungen werden die für die Wechselwirkung mit dem Salzgrus und die injektionstechnischen Belange maßgeblichen Parameter des vorgesehenen Mörtels überprüft und ggf. angepasst.

Die Untersuchungen umfassen neben der Bestimmung des Festigkeit- und Steifigkeitsverhalten die Ermittlung der rheologischen Eigenschaften, wie z. B. das Setzfließmaß, die Viskosität, die Temperaturentwicklung, das Wasserbindevermögen und die Konsistenz. Auf Grundlage der Parameter werden sowohl die Förder- und Verpressleistung wie auch die Verdichtungswirkung der eingebauten Mörtelmassen bestimmt.

Weiterhin sind Einpressversuche zur Injizierbarkeit des Salzgruses vorgesehen. Der Sorelbeton wird hierbei unter Druck in eine allseitig geschlossene Zelle eingepresst und das Druckverhalten messtechnisch erfasst und hinsichtlich der mechanischen Wechselwirkung bewertet.

Diese Untersuchungen setzen, auch mit Blick auf den engen Terminplan, eine angemessene Zusammenarbeit mit der auf der Schachtanlage befindlichen Prüfstelle für den Sorelbeton voraus.

Im weiteren Verlauf des Abschnitts 1 werden Untersuchungen im Maßstab 1:1 durchgeführt. Diese Untersuchungen werden zur Sicherstellung der gleichen Randbedingungen wie bei der geplanten Hauptaufgabe (z. B. Luftfeuchte, Temperatur, Druck- und Lagerungsverhältnisse im Salzgrus, usw.) notwendigerweise untertage durchgeführt. Geeignete Versuchsorte hierfür könnten die Abbaukammern auf der 532-m-Sohle sein. Die im nördlichen Bereich der Flanke liegenden Kammern

7a bis 9b sind nur teilweise mit Salzgrus gefüllt und von im Firstbereich liegenden Abbauwegen erreichbar. So können die Versuche dort von der Verfülloberfläche aus durchgeführt werden.

Im **Abschnitt 2** werden durch zu beauftragende Fachfirmen Bohrtechniken zur Einbringung der Injektionslanzen in den Salzgrus entwickelt bzw. überprüft. Kern dieses Versuchsabschnittes sind entsprechende Bohrungen in eine Abbaukammer. Hier soll unter in-situ Bedingungen das erfolgreiche Niederbringen der Bohrungen einschließlich Einbau der Verpressrohre demonstriert und die Auswahl der Verfahren und der einzusetzenden Hauptgeräte überprüft werden. Ziel ist die zweifelsfreie Identifikation eines anwendungssicheren und ausschreibungsfähigen Bohrverfahrens.

Im Rahmen des Versuchsabschnittes 2 wird ein Verfahren zur Einbringung der Verpressrohre durch die Kammerwände in den Salzgrus hinein entwickelt. Die Untersuchungen finden untertage in einer Kammer mit repräsentativen Randbedingungen, wie z. B. vorhandenes Blocksalz und einer hohen Wahrscheinlichkeit von zu durchbohrenden Schwebenresten statt. Nach erster Prüfung erfüllt z. B. die Abbaukammer 7/616 diese Anforderungen. Sie ist gut zugänglich und weist einen Schwebendurchbruch mit dem entsprechenden Haufwerk auf.

Bei durchgeführten Ortsbesichtigungen ist diese Kammer inspiziert und dort auch Blocksalz entnommen worden. Zudem wird bei dieser Kammer, als einer der ersten nach derzeitiger Bauablaufplanung, der Firstspalt verfüllt. Dies ist die Ausgangsvoraussetzung für die in Abschnitt 3 vorgesehenen Untersuchungen, da nur dann ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Salzgrus und Abbaukammer besteht.

Für den Abschnitt 2 sollen die Spezialbohrfirmen durch eine entsprechende funktionale Ausschreibung dazu veranlasst werden, ein eigenes Konzept für die Bohrungen im Salzgrus zu entwickeln und vorzustellen. Sollten nach eingehender Prüfung und Befragung gleichwertige aber unterschiedliche Bohrkonzepte vorgebracht, könnte dieser Versuch ggf. auch von 2 Firmen durchgeführt werden.

Abschnitt 3 dient zur Überprüfung und Festlegung der zur Verpressung erforderlichen Infrastruktur, der Ermittlung der Verpressleistungen und vor allem der Feststellung und Festlegung der Kontroll- und Überwachungsabläufe sowie der Dokumentation in Hinblick auf die Qualitätssicherung. Hierfür werden durch die in Abschnitt 2 niedergebrachten Bohrungen Verdichtungsinjektionen im Salzgrus ausgeführt und bewertet.

In diesem Versuchsabschnitt wird die Einbringung des Sorelbetons über die Verpressrohre in den Salzgrus hinein erprobt. Dabei werden die Ergebnisse von Abschnitt 1 überprüft und ggf. Anpassungen vorgenommen. Des Weiteren werden die Misch- und Verpressabläufe überprüft und ggf. optimiert. Zu den zu untersuchenden und hinsichtlich der Funktion zu beobachtenden Punkten zählen unter anderem:

- die pneumatische Förderung des Vorprodukts zum mobilen Mischer
- das Mischverfahren selbst
- die Mischgutförderung und die Festlegung der Leitungsquerschnitte und längen
- Handling der Mischgutüberschüsse
- Festlegung von Abbruchkriterien für die Verpressung
- Druck-Mengen Messung
- Reinigung der Leitungen, Molchen, etc.

Derzeit wird davon ausgegangen, dass wesentliche Leistungen aus diesem Bereich von der Belegschaft der Schachanlage erbracht werden können.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass mit dem vorgestellten, zeitlich eng gefassten Untersuchungsprogramm, die für die Injektionsmaßnahme zu klärenden Fragestellungen beantwortet werden können. Der Entwurf eines Ablaufdiagramms für den Versuch mit den zugehörigen Besprechungsterminen und der Ausschreibungsphase ist in Anlage 68 von (CDM2008) dargestellt.

5.2 Bewertung durch die AGO

Seitens der AGO wird für eine klare konzeptionelle und zeitliche Trennung von Voruntersuchungen für Phase 1 und für Phase 2 plädiert. Die Untersuchungen der für die qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung erforderlichen Hohlraumvermessung sollten unabhängig von denen für die Verdichtungsinjektion realisiert werden.

Das dreigliederte Voruntersuchungsprogramm für die Verdichtungsinjektion wird als zielführend eingeschätzt. Mit Abschnitt 1 sind die wesentlichen für die Dimensionierung und Auslegung der Verdichtungsinjektionen bestimmende verfahrenstechnische Parameter zu bestimmen. Wesentliche Bedeutung für die technische Realisierbarkeit der Verdichtungsinjektion hat die erfolgreiche Entwicklung und Erprobung der Bohrtechnik in Abschnitt 2, die gewachsenes Steinsalz sowie den Salzgrusversatz einschließlich etwaiger eingeschlossener massiger Salzbrocken abdecken muss. Abschnitt 3 sollte zu einer erfolgreichen Überprüfung der Abläufe zum Anmischen und zum Verpressen des Sorelbetons führen.

6 Kosten und Zeitaufwand

6.1 Wiedergabe des dargestellten Sachverhalts

Das Konzept zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit gliedert sich in 3 Bereiche, welche im Folgenden kostenmäßig zu erfassen sind:

- Qualitätsgesicherte kraftschlüssige Verfüllung der Firstspalte
- Voruntersuchungen zur Durchführbarkeit der Injektionsmaßnahme
- Volumenreduzierung im Versatz durch Verdichtungsinjektionen in ausgewählten Kammern

Die von CDM vorgenommenen Kostenschätzungen können im Rahmen weiterer Gespräche mit dem Betreiber der Schachanlage sowie nach weiterer Präzisierung der Maßnahme fortgeschrieben werden.

Firstspaltverfüllung: Bei Vergabe der Firstspaltverfüllung an eine Fremdfirma werden unter Berücksichtigung eines 3-Schichtbetriebs über die gesamte Bauzeit, als grober Kostenrahmen ca. 10 Mio. € für die qualitätsgesicherte Verfüllung der Firstspalte angesetzt. Enthalten sind hierin ca. 6 Mio. € an Materialkosten für den Sorelbeton. Neben den Kosten für die Verfüllung der Hohlräume und dem Verschluss der Abbaukammern, sind auch Aufwendungen für das Aufmaß der Firstspalten und die hierbei einzusetzende Messtechnik enthalten. Ebenso enthalten sind die Kosten für die Begleitung durch einen externen Fachgutachter zur Qualitätssicherung der Gesamtmaßnahme.

Voruntersuchungen zur Verdichtungsinjektion: Zur Überprüfung der Durchführbarkeit der Hohlraumreduzierung durch Verdichtungsinjektionen sind sowohl Laborversuche als auch Voruntersuchungen im Großmaßstab unter Tage erforderlich. Dementsprechend wird empfohlen den Kostenrahmen für die Fremdfirma bzw. die Fremdfirmen auf ca. 2,0 Mio. € zu veranschlagen. Hierin enthalten ist ein Aufwand für Geräteinvestitionen von ca. 800 T€.

Verdichtungsinjektion: Die Schätzung des Gesamtaufwandes für die vorgeschlagenen Maßnahmen zur Ertüchtigung ausgewählter Kammern beinhaltet eine Reihe von Annahmen und Voraussetzungen, die erst im Rahmen einer Ausschreibung beziehungsweise im Rahmen der Voruntersuchungen weiter detailliert werden können.

Diese ergeben sich, weil,

- vergleichbare Arbeiten unter Tage bisher nicht im Rahmen von Nachunternehmerverträgen und in einem derartigen Leistungsumfang ausgeführt wurden,
- derzeit die einzusetzenden Bohrgeräte und Pumpen noch nicht bekannt sind und damit auch der Investitions- und Energieaufwand nicht abgeschätzt oder eingegrenzt werden kann,
- darüber hinaus nicht bekannt ist, welche Kosten insgesamt der Verpressmörtel (Materialien, Anmischen, Fördern bis zu den Pumpeneinheiten) verursachen wird.

Um zu einer bestmöglichen Kostenschätzung zu kommen, werden Annahmen getroffen, die zusammen mit dem Betreiber dem Grunde nach und hinsichtlich der Kosten weiterentwickelt werden sollten.

Weiterhin wird bei der Kostenschätzung unterstellt, dass für die eigentlichen Bohr- und Injektionsarbeiten ein Werkvertrag mit einem entsprechenden Fachunternehmen abgeschlossen und dieses beauftragt wird, die Bohrungen und Verpressarbeiten mit eigenem Personal und im Mehr-Schicht-Betrieb auszuführen. Somit entstehen auf Basis einer Volumenzugabe von ca. 4 % des zu behandelnden Kammervolumens Kosten für Leistungen der Fremdfirma bzw. Fremdfirmen von ca. 8,0 Mio. € bei 8 zu ertüchtigenden Kammern. Alle Angaben zu den Kosten verstehen sich jeweils zuzüglich Eigenleistungen des Personals der Schachanlage Asse.

6.2 Bewertung durch die AGO

Die Firstspaltverfüllung ist zwar teuer aber effizient und beinhaltet weniger Unwägbarkeiten als die Verdichtungsinjektion. Sie ist in nicht qualifizierter Form ohnehin bei Verfolgung des derzeitigen Schließungskonzeptes bei Verfüllung der Abbaubegleitstrecken enthalten.

Die Verdichtungsinjektionen sind wegen der von CDM beschriebenen Unwägbarkeiten mit einem Erfolgsrisiko behaftet. Die von CDM vorgelegte Abschätzung zu Kosten- und Zeitaufwand werden als weniger belastbar eingeschätzt als die Angaben zur Firstspaltverfüllung.

7 Zusammenfassende Bewertung

Die AGO bewertet die vorgeschlagenen Aktivitäten zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit und damit zur Reduktion der Verformungsraten im Tragsystem der SW-Flanke der Schachanlage Asse wie folgt.

Die bisher vorliegenden geomechanischen Prognosen des IfG Leipzig weisen einen etwa sechsjährigen Handlungsspielraum aus. Die AGO plädiert deshalb für die unverzügliche Aufnahme konkreter Planungen zur Realisierung einer qualifizierten Firstspaltverfüllung nach dem von CDM entwickelten Grundkonzept. Die AGO teilt die Meinung, dass der durch die Firstspaltverfüllung erreichbare kraftschlüssige Verbund zwischen Versatz und Kammerwandungen zu einer deutlichen Reduzierung der Verformungsraten führen wird.

Nachteilige Auswirkungen der Firstspaltverfüllung auf ein zu realisierendes Stilllegungskonzept und den Nachweis der Langzeitsicherheit werden von der AGO nicht gesehen.

Hinsichtlich der von CDM vorgeschlagenen Verdichtungsinjektionen zur frühzeitigen Erhöhung der Versatzsteifigkeit ergibt sich aufgrund der noch zu klärenden offenen Fragen die Notwendigkeit von Vorversuchen und weiteren Modellrechnungen. Falls die offenen Fragen positiv beantwortet werden, empfiehlt die AGO die Durchführung der Verdichtungsinjektionen.

Zusätzlich zu der in (CDM2008) betrachteten Kammerauswahl für die Verdichtungsinjektion sollte untersucht werden, ob die den Baufeldgrenzen am nächsten gelegenen Kammern vorrangig ausgesteift werden sollten, um die dort vorhandenen abrupten Steifigkeitssprünge und die dadurch bewirkten Verschiebungsdifferenzen und Spannungskonzentrationen zu vermindern.

Die AGO merkt abschließend an, dass das Risiko eines weiter steigenden Lösungszutritts trotz der von CDM vorgeschlagenen Maßnahmen bestehen bleibt. Die AGO schließt sich der Feststellungen von CDM an: „Eine eindeutige Korrelation zwischen Verformungszustand des Gebirges und dem Laugenzutritt kann ... aufgrund der komplexen Gebirgsverhältnisse und des nicht eindeutig definierbaren Laugenzutritts in das Salzgebirge nicht angegeben werden.“ (CDM2008, S. 24).

Quellen

CDM2008: Konzeptstudie zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachtanlage Asse II (CDM Consult GmbH Bochum, Glabisch, Jordan, Kisse, Kroll, Raabe, Trapp, 2008)

GRS2006: Gesamtbewertung der Langzeitsicherheit für den Standort Asse (Konsequenzenanalyse) (GRS & Colenco – GRS-A-3350/Colenco-Bericht 3762/01, Buhmann, Förster, Resele, 2006)

IfG2006a: Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachtanlage Asse in der Betriebsphase (IfG GmbH Leipzig, Kamlot, Brückner, Günther, 2006)

IfG2006b: Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse (IfG GmbH Leipzig, Schroers, Kamlot, Günther, 2006)

IfG2007: Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachtanlage Asse II – Kurzbericht (IfG GmbH Leipzig, Minkley, Kamlot, 2007) – vgl. auch IfG2006b