

Konzeptstudie
zur
**Erhöhung der Versatzsteifigkeit der
mit Salzgrus verfüllten Kammern der
Südwestflanke der Schachtanlage
Asse II**

Projekt-Nr.: 61574

Bericht 01

Erstellt im Auftrag von:
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Referat 713

53170 Bonn

Prof. Dr.-Ing. U. Glabisch, Dr.-Ing. P. Jordan,
Dr.-Ing. A. Kisse, Dipl.-Geol. T. Kroll,
Dr.-Ing. E.-W. Raabe, Dipl.-Geol. T. Trapp

Bochum, 2008-09-12

INHALTSVERZEICHNIS

| | Seite |
|----------|--|
| 1 | ERGEBNISDARSTELLUNG..... 10 |
| 2 | VORBEMERKUNG 11 |
| 3 | UNTERLAGEN 11 |
| 4 | AUFGABENSTELLUNG 14 |
| 5 | AUSGANGSSITUATION IN DER SÜDWESTFLANKE DER ASSE II..... 15 |
| 5.1 | Überblick 15 |
| 5.2 | Grubengebäude 16 |
| 5.3 | Spannungs- und Verformungszustand 18 |
| 5.3.1 | Spannungszustand..... 19 |
| 5.3.2 | Messung der Versatzsteifigkeiten..... 20 |
| 5.3.3 | Pfeilerstauchungen und Lagemessungen..... 21 |
| 5.3.4 | Firstspaltvermessung 23 |
| 5.4 | Zusammenfassung der Ausgangssituation in der Südwestflanke 24 |
| 6 | REDUZIERUNG DER VERFORMUNGSRATEN DER SÜDWESTFLANKE 25 |
| 6.1 | Allgemeines Konzept..... 25 |
| 6.2 | Einschätzung der Maßnahme hinsichtlich des Tragverhaltens der Südwestflanke 29 |
| 6.2.1 | System, Belastungen und Randbedingungen..... 29 |
| 6.2.2 | Kriechverhalten des Steinsalzes..... 32 |
| 6.2.3 | Ergebnisse 33 |
| 6.2.4 | Schlussfolgerungen..... 35 |
| 6.3 | Maßnahmen zur Firstspaltverfüllung..... 35 |
| 6.4 | Maßnahmen zur Hohlraumverminderung im Salzgrus 36 |
| 6.4.1 | Statisch-Dynamische Verfahren zur Kornumlagerung 36 |
| 6.4.2 | Injektionstechniken..... 37 |
| 6.4.3 | Verdichtung mittels Befeuchtung 39 |
| 6.4.4 | Auswahl geeigneter Verfahren 39 |
| 7 | TECHNISCHES KONZEPT ZUR ERHÖHUNG DER VERSATZSTEIFIGKEIT 41 |
| 7.1 | Geplante Maßnahmen..... 41 |
| 7.2 | Stufe 1: Qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung 41 |
| 7.2.1 | Beschreibung der Maßnahme 41 |
| 7.2.2 | Massenermittlung und Zeitplan..... 42 |
| 7.2.3 | Einschätzung hinsichtlich der Versatzsteifigkeitsentwicklung der Südwestflanke..... 45 |
| 7.2.4 | Anmerkungen zur Umsetzung der Maßnahme 46 |
| 7.3 | Stufe 2: Aktivierung der Versatzsteifigkeit durch Verdichtungsinjektionen 48 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 7.3.1 | Beschreibung der Maßnahme | 48 |
| 7.3.2 | Massenermittlung und Zeitplan..... | 48 |
| 7.3.3 | Anmerkungen zum Bohrkonzert | 51 |
| 7.3.4 | Anmerkungen zum Bohrraster..... | 52 |
| 7.3.5 | Anmerkungen zur Umsetzung der Maßnahme | 53 |
| 7.4 | Verfüllgut | 54 |
| 8 | VORUNTERSUCHUNGEN | 57 |
| 8.1 | Abschnitt 1 - Wechselwirkung Injektionsgut – Salzgrus | 58 |
| 8.2 | Abschnitt 2 - Überprüfung der Bohrtechnik und Gerätschaften..... | 60 |
| 8.3 | Abschnitt 3 - Überprüfung der Misch- und Verpressabläufe..... | 61 |
| 8.4 | Zusammenfassung..... | 61 |
| 9 | KOSTENABSCHÄTZUNG..... | 63 |
| 9.1 | Firstspaltverfüllung | 63 |
| 9.2 | Voruntersuchungen | 64 |
| 9.3 | Verdichtungsinjektionen | 65 |
| 9.4 | Kostenzusammenstellung | 68 |
| 10 | BEWERTUNG DES ENTWICKELTEN KONZEPTES..... | 69 |
| 10.1 | Einschätzung und Beurteilung des Konzeptes hinsichtlich der Stabilisierung der Südwestflanke..... | 69 |
| 10.2 | Einordnung in das geplante Schließungskonzept, Langzeitsicherheit..... | 70 |
| 10.3 | Anmerkungen zum Genehmigungsverfahren | 72 |
| 10.4 | Anmerkungen zum Zeitplan..... | 72 |
| 11 | ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN | 74 |
| 11.1 | Zusammenfassung..... | 74 |
| 11.2 | Empfehlungen | 77 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | Seite |
|--------------|--|
| Tabelle 5.1 | Auflistung der Verfüllmaßnahmen in der Südwestflanke 17 |
| Tabelle 5.2 | Auf Basis von Spannungsmessungen ermittelte max. und min. Spannungen in den Tragelementen [U16] 20 |
| Tabelle 5.3 | Bandbreiten der Konvergenzen für die verschiedenen Instrumentierungsbereiche [U14] 23 |
| Tabelle 6.1 | Benötigte Zeiträume zur Schließung der Firstspalte von $h_F = 0,35$ m ohne Ansatz von technischen Maßnahmen bei Ansatz einer über die Jahre konstanten Stauchungsrate 27 |
| Tabelle 6.2 | Pfeilerstauchungen ausgewählter Bereiche [U6] 29 |
| Tabelle 6.3 | Auflistung der über 10 Jahre gemittelten plastischen Stauchungsrate in Abhängigkeit der in den Kammern wirkenden Versatzsteifigkeiten 34 |
| Tabelle 7.1 | Auflistung des zu verfüllenden Firstspaltvolumens 43 |
| Tabelle 7.2 | Sohlenbezogene Abschätzung der Netto-Verfüllzeit in [d] für die Firstspalten bei Ansatz einer freien Firstspalte mit $h_F = 35$ cm in Abhängigkeit von der Förderrate und einer Pumpzeit von 16 Stunden 44 |
| Tabelle 7.3 | Angesetzter Zeitbedarf für einzelne Positionen bei der Verdichtungsinjektion 50 |
| Tabelle 7.4 | Grundrezeptur Sorelbeton A1 [U25] 55 |
| Tabelle 9.1 | Auflistung der abgeschätzten Kosten für die geplanten Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit in der Südwestflanke der Asse unter Ansatz eines mittleren Firstspaltes mit $h_F = 0,35$ m und der favorisierten Variante 6 mit 8 durch Verdichtungsinjektionen zu ertüchtigenden Kammern 68 |
| Tabelle 10.1 | Zeitraum bis zur Erzielung der Versatzsteifigkeit in Abhängigkeit von der Stauchungsrate in Jahren 70 |
| Tabelle 11.1 | Prognose der Auswirkungen der einzelnen Szenarien auf die Stabilisierung der Südwestflanke 76 |

ANLAGENVERZEICHNIS

- Anlage 1 Vertikaler Querschnitt der Asse II in streichender Richtung mit den Baufeldern an der Südwestflanke, im Sattelkern und an der Nordflanke [U12]
- Anlage 2 Baufelder der Schachtanlage Asse [U1]
- Anlage 3 Pfeiler-Schweben-System der Südwestflanke [U16]
- Anlage 4 Vereinfachter Steigerriss und Längsschnitt mit Darstellung der Schwebendurchbrüche [U12]
- Anlage 5 Darstellung der Verfüllmaßnahme, Zeit und Verfülltechnik
- Anlage 6 Versatzsetzung unter Eigengewicht, Abbau 8/574 in der Zeit vom 13.7.99 bis zum 12.7.00
- Anlage 7 Darstellung des digitalen Grubenbildes der Südwestflanke der Schachtanlage Asse
- Anlage 8 Darstellung eines Horizontalschnittes durch das Grubengebäude in der Südwestflanke mit Blick auf die 595-m-Sohle
- Anlage 9 Schnitt durch den Pfeiler 4/5 mit Blick auf den östlichen Bereich des Grubengebäudes in der Südwestflanke
- Anlage 10 Anordnung der Tragelemente in der Südwestflanke [U16]
- Anlage 11 Exemplarische Darstellung einer Messkurve der Versatzsteifigkeit im Abbau 7/595 [U18]
- Anlage 12 Darstellung der mittleren Versatzsteifigkeit für die vertikale Messrichtung [U18]; Messung von 12.2007
- Anlage 13 Darstellung der mittleren Versatzsteifigkeit für die horizontal streichende Messrichtung [U18]; Messung von 12.2007
- Anlage 14 Darstellung der mittleren Versatzsteifigkeit für die horizontal querschlägige Messrichtung [U18]; Messung von 12.2007
- Anlage 15 Gemessene Pfeilerstauchungsraten [mm/a] seit 1981 bis 2004 [U1]
- Anlage 16 Pfeilerstauchungsraten [mm/a] der Jahre 2000 bis 2008 ausgewählter Messpunkte [U6]

- Anlage 17 Veränderung der Pfeilerstauchungsraten [mm/a] ausgewählter Messpunkte bezogen auf das jeweilige Vorjahr
- Anlage 18 Isoliniendarstellung der Pfeilerstauchungsraten [mm/a] für das Jahr 2008
- Anlage 19 Isoliniendarstellung der Pfeilerstauchungsraten [mm/a] für das Jahr 2005
- Anlage 20 Prinzipskizze Konvergenzmessungen in den Wegstrecken der Südwestflanke [U14]
- Anlage 21 Darstellung der Ergebnisse der Lagemessungen im Querschlag der 553-m-Sohle [U5]
- Anlage 22 Darstellung der im Jahr 2004 gemessenen Firstspalte [U19]
- Anlage 23 Gemessene Firstspalte in Abhängigkeit von der Zeit für die Kammern der 574-m-Sohle [U19]
- Anlage 24 Prinzipielle Darstellung der Wirkungsweise der Versatzsteifigkeit in der Kammer
- Anlage 25 Versatzsteifigkeit p_v [MPa] in Abhängigkeit von der Porosität n [%] [U1]
- Anlage 26 Entwicklung der Versatzsteifigkeit in Abhängigkeit von Verschiebung der Südwestflanke ohne Zusatzmaßnahmen wie Firstspaltverfüllung und Verdichtungsinjektionen
- Anlage 27 Festigkeitskurven und Volumenverformungsverhalten von Steinsalzprüfkörpern im triaxialen Kompressionsversuch bei unterschiedlichen Seitendrücken [U1]
- Anlage 28 Sohlenriss der 574-m-Sohle [U11]
- Anlage 29 System, Randbedingungen und Belastungen des Ausgangssystems für die numerischen Berechnungen
- Anlage 30 Kammerrandnormale Lasten auf die Kammerinnenränder
- Anlage 31 Bei den numerischen Berechnungen angesetzte Entwicklung der Versatzsteifigkeit p_v [MPa] in Abhängigkeit der Jahre und der durchgeführten technischen Maßnahme zur Versatzsteifigkeitserhöhung
- Anlage 32 Darstellung der untersuchten Fälle der überschlägigen numerischen Berechnungen
- Anlage 33 Differenz plastischer Verschiebungen $\Delta\delta_y$ im Pfeiler 6/7

- Anlage 34 Entwicklung der plastischen Stauchungen im Pfeiler 6/7 über einen Zeitraum von 20 Jahren in Abhängigkeit der bei den numerischen Berechnungen angesetzten 5 Fallunterscheidungen
- Anlage 35 Plastische Dehnungen in querschlägiger Richtung, keine technischen Maßnahmen (Fall ohne)
- Anlage 36 Plastische Dehnungen in querschlägiger Richtung, Firstspaltverfüllung (Fall a)
- Anlage 37 Plastische Dehnungen in querschlägiger Richtung, Firstspaltverfüllung und Versatzsteifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den Abbaukammern 3 bis 8 (Fall b)
- Anlage 38 Plastische Dehnungen in querschlägiger Richtung, Firstspaltverfüllung und Versatzsteifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den Abbaukammern 5 bis 8 (Fall c)
- Anlage 39 Plastische Dehnungen in querschlägiger Richtung, Firstspaltverfüllung und Versatzsteifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den Abbaukammern 6 und 7 (Fall d)
- Anlage 40 Auf das 10. Berechnungsjahr bezogene Stauchungen für die untersuchten 5 Fälle in Abhängigkeit von den Jahren nach Beginn der technischen Maßnahme
- Anlage 41 Injektionsprinzipien und –verfahren
- Anlage 42 Prinzipielle Darstellung der Aufbrechinjektion (nach Prospekt Keller)
- Anlage 43 Prinzipielle Darstellung der Verdichtungsinjektion (nach Prospekt Keller)
- Anlage 44 Porositätsentwicklung des Salzgruses unter Laugenzugabe [U23]
- Anlage 45 Anwendungsgrenzen von Injektionsverfahren und Körnungslinien des Salzgruses
- Anlage 46 Mögliche Ansatzpunkte für Verfüll- und Entlüftungsbohrungen
- Anlage 47 Auswahl der Abbaukammern für die geplante qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung
- Anlage 48 Reine Verfüllzeiten [d] zur Schließung des Firstspaltes von 0,35 m in Abhängigkeit der Förderrate [m^3/h] und Pumpenzeit [h]
- Anlage 49 Entwicklung der Versatzsteifigkeit [MPa] über die Jahre in Abhängigkeit von der Stauchungsrate [m/a] und Anfangsporosität n [%], grafische Darstellung
- Anlage 50 Tabellarische Darstellung der Entwicklung der Versatzsteifigkeit [MPa] über die Jahre nach der Verfüllmaßnahme in Abhängigkeit von der Stauchungsrate [mm/a] und Anfangsporosität [%]

- Anlage 51 Darstellung der mit Verdichtungsinjektionen zu behandelnden Kammern Variantendarstellung, Variante 1
- Anlage 52 Darstellung der mit Verdichtungsinjektionen zu behandelnden Kammern Variantendarstellung, Variante 2
- Anlage 53 Darstellung der mit Verdichtungsinjektionen zu behandelnden Kammern Variantendarstellung, Variante 3
- Anlage 54 Darstellung der mit Verdichtungsinjektionen zu behandelnden Kammern Variantendarstellung, Variante 4
- Anlage 55 Darstellung der mit Verdichtungsinjektionen zu behandelnden Kammern Variantendarstellung, Variante 5
- Anlage 56 Darstellung der mit Verdichtungsinjektionen zu behandelnden Kammern Variantendarstellung, Variante 6
- Anlage 57 Auflistung der mit Verdichtungsinjektionen zu verstärkenden Kammern
- Anlage 58 Entwicklung der Versatzsteifigkeit p_v [MPa] in Abhängigkeit von der volumetrischen Dehnung ε_v [-] [U1]
- Anlage 59 Ermittlung des zu behandelnden Versatzvolumens [m³] für die Verdichtungsinjektionen
- Anlage 60 Zu injizierende Verfüllgutvolumen [m³] in Abhängigkeit von der Ausgangsporosität [%] und der zu erzielenden Versatzsteifigkeit [MPa] in den Abbaukammern, tabellarische Darstellung
- Anlage 61 Zu injizierende Verfüllgutvolumen [m³] in Abhängigkeit von der Ausgangsporosität [%] und der zu erzielenden Versatzsteifigkeit [MPa] in den Abbaukammern, grafische Darstellung
- Anlage 62 Auflistung der benötigten Bauzeiten [d] für die Verdichtungsmaßnahme für die Varianten 1 und 6 in Abhängigkeit von der Ausgangsporosität [%] des Versatzes und der Anzahl an Geräteeinheiten [Stck.]
- Anlage 63 Prinzipskizze der Verpressrohranordnung über die Höhe der Abbaukammer
- Anlage 64 Prinzipskizze einer aufgefächerten Anordnung der Verpressrohre in einer Abbaukammer
- Anlage 65 Prinzipskizze gleichmäßig über die Abbaukammerbreite verteilter Verpressrohre in einer Injizierungslage

- Anlage 66 Körnungslinie des Vorprodukts des Sorelbetons A1 [U25]
- Anlage 67 Prinzipielle Anordnung der Verpresspunkte für die in-situ Versuche in der Abbaukammer 9b der Sohle 532-m-Sohle des Abschnitts 1 der Vorversuche
- Anlage 68 Prinzipieller zeitlicher Ablaufplan der Voruntersuchungen
- Anlage 69 Prognose der horizontalen Verschiebungsraten des südlichen Deckgebirges in Teufe 553 m [U1]

1 ERGEBNISDARSTELLUNG

Das im vorliegenden Bericht dargestellte Konzept hat zum Ziel die Steifigkeit des in die Abbaukammern eingebrachten Versatzes in der Südwestflanke der Schachtanlage zu aktivieren und zu erhöhen. Durch die dann einsetzende Mittragwirkung des Versatzes kommt es zu einer Stabilisierung im Deformationsverhalten der Pfeiler und zu einer Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten. Damit verbunden ist eine Reduzierung des latenten Risikos von weiteren Salzlösungszutritten, soweit sie durch die fortschreitende Schädigung der Deckgebirgsschichten verursacht werden oder werden können.

Die vorgesehenen Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit des Salzgruses in den Abbaukammern der Südwestflanke umfassen 2 Stufen und stellen sich wie folgt dar:

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

- Erzielung eines kraftschlüssigen Verbundes
- Einspannung der Pfeiler
- Aktivierung der Versatzsteifigkeit

Stufe 2: Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial durch Volumenzugabe, zur

- frühzeitigen Erhöhung der Versatzsteifigkeit

Durch die qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung (Stufe 1) wird 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 kann 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 die in Stufe 2 dargestellte druckhafte Volumenzugabe durch Verdichtungsinjektionen führt zu einer weiteren Stabilisierung im Tragverhalten der gesamten Südwestflanke. So können 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.

Eine unmittelbare Aussage zur Zeitdauer der sicheren Statik des Grubengebäudes kann hieraus jedoch nicht abgeleitet werden. Dies bedarf einer gesonderten statischen Berechnung.

Eine Abstimmung mit den Betreibern der Asse vorausgesetzt, führen die hier vorgeschlagenen Maßnahmen zu keiner Verlängerung der Arbeiten im Zuge des Schließungskonzeptes. Das hier vorgestellte Konzept beinhaltet, neben den grundsätzlichen Ansätzen und Abschätzungen zur Wirksamkeit, die für eine praktische Durchführung notwendigen Überlegungen und Hinweise.

Es ist deutlich hervorzuheben, dass die Maßnahmen der Stufe 1 und 2 keine Alternativen zum bisherigen Schließungskonzept darstellen, sondern dazu dienen, die Südwestflanke „schneller“ zu stabilisieren, mit dem Ziel, die Pfeilerstauchungsraten zu vermindern und um so die latente Gefahr eines erhöhten Laugenzutritts zu reduzieren.

2 VORBEMERKUNG

Die hier vorgeschlagenen Maßnahmen bewegen sich innerhalb des geplanten Schließungskonzeptes [U29] und sind der Einleitung eines pneumatischen Stützdruckes und einer vorgesehenen Schutzfluideinleitung mit Magnesiumchloridlösung vorgeschaltet. Die Prüfung von Unterlagen oder Planungen für das laufende Planfeststellungsverfahren zur Schließung der Schachanlage Asse ist nicht Gegenstand der Bearbeitung.

Der verwendete Begriff Versatzsteifigkeit umfasst sowohl die mechanisch wirksame Steifigkeit des Versatzes als auch die statische Reaktion des verspannten Materials auf den wirkenden Gebirgsdruck mit den entsprechenden Verformungen.

3 UNTERLAGEN

- [U1] Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase (IfG GmbH Leipzig, Minkley & Kamlot, 2006)
- [U2] Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse (IfG GmbH Leipzig, Minkley & Kamlot, 2006)
- [U3] Kurze Beschreibung des Standorts „Asse“ und der gebirgsmechanischen Situation sowie des Stilllegungskonzeptes, GSG vom 2008-08-14
- [U4] BGR: Projekt Asse – Geowissenschaftliche Begleitung der Verfüllung des Bergwerkes Asse II bis zum Ende der Betriebsphase, Begutachtung 2006
- [U5] Elfter Bericht über Inklinometermessungen. Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Schachanlage Asse, Markscheiderei
- [U6] 116. Zwischenbericht zu den Deformationsmessungen, Schachanlage Asse, Markscheiderei, Feb. 2008
- [U7] Tagesnivellement 2007. Schachanlage Asse, Markscheiderei, Feb. 2008
- [U8] Gebirgsbeobachtung 2007. Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Schachanlage Asse, Markscheiderei, Okt. 2007
- [U9] Darstellung der Zeitenfolge der Schwebendurchbrüche. Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Schachanlage Asse, Markscheiderei
- [U10] Schachtbilder der Schächte 2 und 4. Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Schachanlage Asse, Markscheiderei
- [U11] Grundrisse der 490-m-Sohle bis zur 975-m-Sohle. Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Schachanlage Asse, Markscheiderei

- [U12] Längsschnitte und Steigerrisse durch das Grubengebäude – Schnitte 2 und 3. Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Schachtanlage Asse, Markscheiderei
- [U13] 3D-Modellierung des Grubengebäudes. ERCOSPLAN
- [U14] Konvergenzmessungen in Grubenbauen der Schachtanlage Asse. GSF, interner Bericht, Remlingen, 2007
- [U15] Ergebnisse der Spannungsmessungen in Tragelementen des Grubengebäudes der Schachtanlage Asse. GSF, interner Bericht, Remlingen, 2007
- [U16] Darstellung und Bewertung des Spannungs- und Verformungszustandes im Tragsystem der Südwestflanke der Schachtanlage Asse nach Abschluss der Versatzmaßnahme auf der Grundlage gebirgsmechanischer In-situ-Messungen. GSF, interner Bericht, Remlingen, 2006
- [U17] Ergebnisse der mikroseismischen Überwachung auf der Schachtanlage Asse- Jahresbericht 2007 (interner Bericht, Remlingen 2008)
- [U18] Versatzdruckmessungen im Steinsalzbaufeld an der Asse-Südwestflanke. GSF, interner Bericht, Remlingen, 2008
- [U19] Dokumentation zur Verfüllung der Abbaue an der Südwestflanke der Schachtanlage Asse. GSF, interner Bericht, Remlingen, 2007
- [U20] Messprogramm zur Geotechnischen Überwachung der Schachtanlage Asse bis zum Ende der Betriebsphase. GSF, interner Bericht, Remlingen, 2008
- [U21] Kompaktikonsverhalten und mechanische Eigenschaften des mit Schutzfluid gefluteten und komprimierten Ronnenbergversatzes. IfG, interner Bericht, Leipzig, 2004
- [U22] Bericht zu Laboruntersuchungen an Rückstellproben aus Sorelbeton . IfG, interner Bericht, Leipzig, 2007
- [U23] Kurzbericht zum Verhalten von Ronnenbergversatz bei Laugenzufluss – Porositäts-, Setzungs- und Dichteentwicklung. GSF, interner Bericht, Jahr unbekannt
- [U24] Untersuchung zur Bewertung der gebirgsmechanischen Wirksamkeit von Versatzmaterial der Halde Ronnenberg unter Laugeneinfluß, Teilbericht Laboruntersuchungen. IfG, Leipzig, 1999
- [U25] Datenblätter zum Sorelbeton. Prüflabor für Bau- und Feststoffe der Schachtanlage Asse, Stand 09/2007
- [U26] Untersuchungsbericht – Forschungsbergwerk Asse, Drucksondierungen DS1/98 bis DS 4/98. Fugro Consult GmbH, 10.1998
- [U27] Untersuchung der gebirgsmechanischen Wirksamkeit von Versatzmaterials der Halde Ronnenberg in den Steinsalzabbauen der Südwestflanke des Assesattels. IfG, Leipzig, 04.1999

- [U28] Herbert, H.-J.; Kull, H.: Selbstverheilender Salzversatz (SVV) – Ein arteigener Baustoff für Abdichtungen im Salzbergbau. 5. Altbergbau-Kolloquium, TU Clausthal 2005
- [U29] Herleitung und Beschreibung des Konzepts zur Schließung der Schachanlage Asse. GSF, 02.10.2006
- [U30] Gesprächsprotokolle und email-Korrespondenz bzgl. der Resthohlraumverfüllung mit Sorelbeton
- [U31] Grundbautaschenbuch Teil 2. Hrsg.: U. Smolczyk, Ernst & Sohn Verlag, 2001, S. 11
- [U32] Prospekt volksbot, Fraunhofer Institut (AIS), Sankt Augustin
- [U33] Worst R.; Surmann, H.; Christaller, T.: Erkundung unzugänglicher Bereiche mit mobilen Robotern. 5. Altbergbau-Kolloquium, TU Clausthal 2005
- [U34] Bauablaufplan zur Verfüllung der Resthohlräume in der Südwestflanke der Schachanlage Asse. Helmholtzzentrum München, August 2008
- [U35] Aufmaß der Sohlendurchbrüche. GSF, interne Datenblätter
- [U36] Gemeinsame Mitteilung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt und Klimaschutz. Nr. 185/08, Berlin, 04.09.2008

4 AUFGABENSTELLUNG

Im Rahmen der Konzeptstudie „Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Kammern der Südwestflanke der Schachanlage Asse II“ werden Maßnahmen zur Aktivierung und Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus verfüllten Abbaukammern der Südwestflanke entwickelt. Die technische Realisierbarkeit und kurzfristig aktivierbare geomechanische Wirksamkeit sind abzuschätzen und der erforderliche Zeit- und Kostenrahmen für eine solche Ertüchtigungsmaßnahme zu benennen. Darüber hinaus sind mögliche Auswirkungen auf den bereits geführten Nachweis der Langzeitsicherheit abzuschätzen.

Die Bearbeitung des Vorhabens wird in folgende Arbeitsschritte aufgeteilt:

- 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 werden folgende Punkte behandelt:

- 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 für die Durchführung der Maßnahmen und der Kosten;
- Einschätzung der Auswirkungen auf das Tragverhalten des Deckgebirges der Südwestflanke und die Führung des Langzeitsicherheitsnachweises;
- Ggf. Angaben hinsichtlich eines einzuleitenden Genehmigungsverfahrens.

5 AUSGANGSSITUATION IN DER SÜDWESTFLANKE DER ASSE II

5.1 Überblick

Anfang des 20. Jahrhunderts wurden auf dem Asse-Heeseberg-Höhenzug insgesamt 3 Schachtanlagen (Asse I, Asse II und Asse III) errichtet, von denen heute nur noch die Schachtanlage Asse II befahrbar ist. In dieser Schachtanlage fanden von 1906 bis 1963 Stein- und Kalisalzabbau statt. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzformationen wurden von 1967 bis 1978 schwach- und mittelradioaktive Abfälle eingelagert. Die endgültige Schließung der Schachtanlage wurde 1997 beschlossen und wird seitdem vorbereitet.

Anlage 1 zeigt den Vertikalschnitt in Nord-Süd Richtung durch das Deckgebirge und das Salinar mit dem Grubengebäude der Schachtanlage Asse. Beim Salzaufstieg hat sich die Nordflanke relativ gleichmäßig ausgebildet. Demgegenüber entstand in der Südwestflanke ein schmaler Nebensattel, welcher sich noch auf den oberen Sohlen im Grubengebäude nachweisen lässt. Die darüber liegenden Gesteinsschichten aus Buntsandstein und Muschelkalk weisen tektonische Störungen auf, die das Deckgebirge in Blöcke zerteilen.

Deutlich zu erkennen ist die Dominanz des Abbaufeldes an der Südwestflanke gegenüber dem restlichen Grubengebäude. Diese Abbaue liegen im Leine-Steinsalz (jüngeres Steinsalz) und wurden teilweise bis nahe an die Salzsattelflanke herangeführt. Unterlagert wird das Steinsalz vom Kaliflöz-Staßfurt. Der Sattelkern besteht aus Staßfurt-Steinsalz.

In der Zeit der Salzgewinnung wurden 3 Baufelder aufgefahren (Anlage 2). Im Bereich der Nordflanke wurden Hohlräume zur Carnallitgewinnung aufgefahren, wobei bereits während der Gewinnung bis zu 90% der Hohlräume mit Fabrikrückständen wieder versetzt worden sind [U3]. Zur Steinsalzgewinnung wurden im Sattelkern 15 Abbaue und in der Südwestflanke insgesamt 131 Abbaue über 13 Sohlen aufgefahren:

- Carnallitbaufeld an der Nordflanke
Ausbruchvolumen ca. 1.000.000 m³
im Zeitraum von 1909 bis 1925, wobei bereits während der Gewinnung die Hohlräume größtenteils wieder versetzt wurden
- Steinsalzbaufeld an der Südwestflanke (Leine-Steinsalz oder jüngeres Steinsalz)
Ausbruchvolumen ca. 3.400.000 m³
im Zeitraum von 1916 bis 1964
- Steinsalzbaufeld im Sattelkern (Staßfurt-Steinsalz oder Älteres Steinsalz)
Ausbruchvolumen ca. 440.000 m³
im Zeitraum von 1927 bis 1963

Aus Anlage 2 ist ersichtlich, dass das Baufeld im Leine-Steinsalz an der Südwestflanke aufgrund seiner Größe und Lage für die gebirgsmechanischen Reaktionen des Gesamtsystems der

Schachtanlage Asse II bestimmend ist. Bereits in der Abbauphase (1916 – 1964) kam es zu Verformungen im Grubengebäude, welche sich in unversetzten Bereichen unvermindert fortsetzten. Infolge der Verformbarkeit und begrenzten Tragfähigkeit wurde bei einem Großteil der Tragelemente der Südwestflanke das Tragfähigkeitsmaximum inzwischen überschritten mit der Folge von großräumigen Umlagerungen in der Lastabtragung und Entfestigungen. Dieser anhaltende Entfestigungsprozess der Tragelemente (z. B. Pfeilern) erforderte die vollständige Verfüllung sämtlicher noch offenen Abbaue. Von August 1995 bis April 2004 erfolgte die pneumatische Verfüllung der aus der Zeit der Steinsalzgewinnung stammenden Abbaue in der Südwestflanke mit Eigenversatz und ca. 2,2 Mio. Tonnen Salzhautwerk von der Halde Ronnenberg.

5.2 Grubengebäude

Im Rahmen der Konzeptstudie wird ausschließlich das für das gebirgsmechanische Modell bestimmende Steinsalzabbaufeld der Südwestflanke betrachtet. Dieses Feld wurde in der Abbauphase beginnend auf der 750-m-Sohle bis zur 490-m-Sohle aufwärts mit 13 Sohlen und mit bis zu 9 Abbauen aufgefahren.

Insgesamt weist die Südwestflanke ein rasterartiges Kammer-Pfeiler-Schweben-System mit folgenden durchschnittlichen geometrischen Randbedingungen auf (Anlage 3):

- Kammerbreite (N-S-Richtung): 40 m
- Kammerlänge (O-W-Richtung): 60 m
- Kammerhöhe: 15 m
- Schwebenmächtigkeit: 6 m
- Pfeilerbreite: 12 m

Die Pfeiler und Schweben zwischen den Abbaukammern stellen die Tragelemente des Steinsalzbaufeldes dar. Das Haupttragelement ist der 20 m breite Zentralpfeiler zwischen der Abbaureihe 4 und 5 (Anlage 4).

Insgesamt weist das Baufeld in streichender Richtung eine Abmessung von ca. 650 m und in vertikaler Richtung von 275 m auf. Dies entspricht einer Baufeldfläche von ca. 180.000 m².

In den Jahren 1989 bis 1998 kam es zu ca. 30 Schwebendurchbrüchen in der Südwestflanke. Die Durchbrüche reichen hierbei von wenigen m² bis zu einem Drittel der Kammergrundflächen. Die Lage und zeitliche Abfolge der Durchbrüche ist in Anlage 4 dargestellt. Die Groß- bzw. Doppelkammern auf der 679-m-Sohle entstanden durch Hereinholung der Schweben in den Jahren 1956 bis 1958.

Ab dem Jahr 1980 wurde mit der Verfüllung der Abbaue in der Südwestflanke begonnen. Zunächst wurde der Versatzstoff aus dem anfallendem Steinsalzhaufwerk aus Auffahrungen von

Versuchsfeldern und von Betriebsräumen, im Zuge der Baumaßnahme des Tiefenaufschlusses im Teufenbereich von 800 m bis 950 m, gewonnen. Dieses als „Eigenversatz“ bezeichnete Material wurde mittels Blas- und Versturztechnik eingebracht. Versatzbereiche waren die Kammern der 700-m- bis zur 658-m-Sohle und die Nebenabbaue auf der 532-m-Sohle.

Von 1995 bis 2004 wurde Versatzmaterial der Halde Ronnenberg in die Abbaue der Südwestflanke eingebaut. Der Versatz erfolgte beginnend auf der 700-m-Sohle, von wo aus sohlenweise nach oben verfüllt wurde (Anlage 5). Der Transport nach Untertage erfolgte pneumatisch. Zur Staubbindung wurden dem Versatzstrom kurz vor Austritt aus dem Blasrohr geringe Mengen (ca. 500 m³ pro Kammer) Zutrittslösung zugegeben. Hierbei handelte es sich um die durch das Deckgebirge zutretende Salzlauge, welche zur Zeit in der Abbaukammer 3 auf der 658-m-Sohle gefasst wird.

Bis zur 616-m-Sohle wurde der Versatz einphasig (in einem Zuge) in den Abbau geblasen. Ab der 595-m-Sohle erfolgte ein zweiphasiger Einbau, um zwischenzeitige Setzungen des Versatzkörpers vor der weiteren Verfüllung abklingen zu lassen (Anlage 6). Dazu wurden alle Abbaue einer Sohle bis zum Niveau der Zugangsstecken verblasen. Anschließend erfolgte, beginnend mit der zuerst gefüllten Abbaukammer der Sohle, die zweite Phase mit Verfüllung des durch die Sackung des eingebauten Materials erfolgten Hohlraumes. Daraus ergab sich eine mittlere Setzungszeit zwischen den beiden Phasen von etwa 10 Monaten. Zwischen den Versatzphasen wurde die Oberfläche mit einer Raupe einplaniert. In Bereichen zusammenhängender Schwebendruckbrüche in einer Abbaureihe konnte eine solche Verdichtungsarbeit nicht durchgeführt werden.

Parallel dazu erfolgte die Einbringung von anfallendem Haufwerk aus Auffahrungen von Begleitstrecken als Sturzversatz, hier hauptsächlich im Bereich der Abbauzugänge.

Die Versatzmaßnahmen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 5.1 Auflistung der Verfüllmaßnahmen in der Südwestflanke

| Sohle | Verfüllmaßnahme |
|-------------|---|
| 700 m | Eigenversatz, Blas- und Versturztechnik Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz |
| 679 | Eigenversatz, Blas- und Versturztechnik Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz, einphasig ohne Laugenzugabe |
| 658 | Eigenversatz, Blas- und Versturztechnik Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz, einphasig mit Laugenzugabe |
| 637 | Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz, einphasig mit Laugenzugabe |
| 616 bis 532 | Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz, zweiphasig mit Laugenzugabe |
| 511 | Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz, zweiphasig mit Laugenzugabe und einphasig ohne Laugenzugabe, einige Kammern nur teilverfüllt |
| 490 | Versatz Halde Ronnenberg, Blasversatz, einphasig mit bzw. ohne Laugenzugabe einige Kammern nur teilverfüllt |

Mit Hilfe des Programms autocad 3d wurde auf Basis der erhaltenen digitalen Sohlenrisse [U11] ein vereinfachtes dreidimensionales Grubenbild aufgebaut. Dieses Modell dient der besseren Orientierung innerhalb des Grubengebäudes, siehe dazu die beispielhaften Darstellungen in den Anlagen 7 bis 9. Die Abbaukammern sind dort in rot, die Abbauewege in grün sowie die Wendel- und Wetterstrecken in blau dargestellt. In dieses Modell sind die nur als Skizzen vorhandenen Schwebendurchbrüche (hellblau eingefärbt) [U36] mit aufgenommen worden. Das 3D-Modell der Asse [U13] enthält diese Darstellung nicht.

Für die Verfüllung der Kammern mit Versatz von der Halde Ronnenberg wurden die Abbauewege neu aufgefahren und liegen im Firstbereich der Kammern. Anlage 9 stellt einen Vertikalschnitt durch den Pfeiler zwischen den Abbaukammern 4 und 5 dar und verdeutlicht, dass die Kammern nicht in einer Flucht senkrecht über einander stehen, sondern der Krümmung des Salzstockes an der Südwestflanke folgend versetzt aufgefahren wurden.

5.3 Spannungs- und Verformungszustand

Das Messprogramm zur Überwachung des Spannungs-Verformungsverhaltens des Grubengebäudes in der Südwestflanke beinhaltet folgende Messaktivitäten [U16]:

- Markscheiderische Messungen
 - Tagesnivellement
 - Lagemessungen im Grubengebäude
 - Konvergenzmessungen in den Strecken
 - Extensiometermessungen in den Pfeilern
 - Inklinometermessungen in den Pfeilern
- Geotechnische Messungen
 - Spannungsmessungen in den Pfeilern
 - Lastmessungen im Versatzkörper
- Geophysikalische Messungen
 - Mikroseismik

Auf den mit diesem Messprogramm erhaltenen Beobachtungen baut die Erfassung und Prognose der Gebirgsreaktionen in der Betriebsphase auf.

Mit dieser Beobachtungsmethode kann das Last-Verformungsverhalten des Grubengebäudes recht genau erfasst und können Rechenmodelle überprüft und ggf. angepasst werden. Sie eignen sich auch zur Beurteilung der Wirkung von technischen Maßnahmen wie sie hier in Rede stehen.

5.3.1 Spannungszustand

Der Lasteintrag auf die Südwestflanke erfolgt bankrecht aus Richtung SSW, d. h. querschlägig zum Streichen des Asse-Sattels (Anlage 2). Ursächlich ist die minimale Hauptspannung des primären Spannungszustandes im Deckgebirge, mit einem Gradienten von 15 MPa/km. Entsprechend der teufenmäßigen Erstreckung des Grubengebäudes an der Südwestflanke wirken somit äußere Belastungen von 7 bis 11 MPa auf das Tragsystem ein. Bei einem mittleren Lastfaktor für das Tragsystem (Pfeiler und Schweben) von ca. 2,5 ergeben sich daraus zu ertragende theoretische Belastungen von ca. 14 bis 28 MPa [U16].

Der Lastfaktor von 2,5 bezieht sich auf ein Tragsystem aus Pfeilern und Schweben wie in Anlage 10 angegeben. Die Berechnung des Lastfaktors lautet dann [U2]:

Systembreite: $b = \text{Kammerlänge} + \text{Pfeilerbreite} = 60 + 12 = 72 \text{ m}$

Systemhöhe: $h = \text{Kammerhöhe} + \text{Schwebendicke} = 15 + 6 = 21 \text{ m}$

Systemfläche: $A_s = b \cdot h = 72 \cdot 21 = 1.512 \text{ m}^2$

Tragfläche: $A_T = \text{Pfeilerfläche} + \text{Schwebenfläche} = 12 \cdot 15 + 360 = 612 \text{ m}^2$

→ **Lastfaktor** = Systemfläche / Tragfläche = 1512 / 612 = 2,47 ≈ **2,5**

Die Pfeilerbelastungen in dem aufgefahrenen Pfeiler-Schweben-System sind höher als die Langzeittragfähigkeiten [U1]. Das Tragsystem hat mit Kriechverformungen, plastischen Deformationen sowie lokalen Bruchprozessen auf die eingetragene Gebirgsspannung reagiert und ist dadurch insgesamt nachgiebiger geworden. Dieser Entfestigungsprozess dauert immer noch an, sodass von einem gebirgsmechanisch nachgiebigen Tragsystem im Grenzzustandsbereich zu sprechen ist.

Um den wirkenden Spannungszustand in den Tragelementen des Grubengebäudes ermitteln zu können, wurden insgesamt 42 Spannungsmonitorstationen (SMS) in die Pfeiler kraftschlüssig eingebaut [U15]. Die gemessenen maximalen Spannungswerte in Pfeilermitte korrespondieren zwar mit der rechnerischen Größe des Lasteintrages, sind aber betragsmäßig von Spannungsumlagerungen aufgrund von Teilbrüchen im Querschnitt beeinflusst. Die maximalen Hauptspannungen sind durchgehend Druckspannungen. Der Maximalwert liegt bei ca. $\sigma_{\text{max.}} = 12 \text{ MPa}$. Der bislang für den Lastabtrag bestimmende Zentralpfeiler 4/5 zeigt seine Überbeanspruchung durch die Abnahme der dort gemessenen Hauptspannung. Er hat die Grenze seiner Belastbarkeit erreicht und entzieht sich einer weiteren Lastaufnahme durch Verformung [U16].

Die gemessenen minimalen Spannungswerte liegen nahezu durchgängig in einem Bereich von $\sigma_{\text{min.}} = 0$ bis 2,7 MPa, mit einem Hauptanteil im Bereich von $\sigma_{\text{min.}} = 0$ bis 0,5 MPa. Mit den eingebauten Messgebern können keine Zugspannungen gemessen werden. Soweit solche vorhanden sind, bleiben sie unbeobachtet. Die aus den in-situ gemessenen Werten des Spannungszustandes im Tragsystem berechneten Hauptspannungen sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Die minimalen

Hauptspannungen wurden bis auf wenige Ausnahmen für beide dargestellten Jahre als Zugspannungen in einem Bereich von $\sigma_{\min.} = 0$ bis -3 MPa ermittelt.

Tabelle 5.2 Auf Basis von Spannungsmessungen ermittelte max. und min. Spannungen in den Tragelementen [U16]

| Station Tiefe/Pfeiler/Bereich | Höhe [NN] | $\sigma_{\max.}$ [MPa] 2001 | $\sigma_{\max.}$ [MPa] 2005 | $\sigma_{\min.}$ [MPa] 2001 | $\sigma_{\min.}$ [MPa] 2005 |
|----------------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 553 45 S | -355,6 | | 6,30 | | -0,83 |
| 588 78 S | -394,7 | 11,11 | 11,56 | 2,40 | 2,53 |
| 577 78 S | -383,7 | 11,68 | 12,09 | 0,13 | -0,18 |
| 566 78 S | -372,7 | 8,23 | 8,58 | -3,46 | -2,38 |
| 525 89 S | -330,6 | 1,84 | 2,70 | -0,17 | -0,73 |
| 577 12 S | -383,9 | 8,99 | 8,82 | -2,67 | -0,64 |
| 588 12 S | -394,6 | 7,57 | 8,00 | -0,71 | -1,28 |
| 651 12 S | -458,2 | 4,19 | 5,14 | -0,72 | -0,87 |
| 661 12 S | -468,0 | 5,53 | 5,96 | 0,32 | -3,04 |
| 609 23 S | -413,2 | 12,08 | 13,63 | -2,35 | -3,05 |
| 651 78 S | -457,8 | 5,99 | 7,29 | 2,01 | 2,23 |
| 597 67 S | -402,3 | 0,90 | 1,86 | -0,26 | -0,70 |
| 664 34 S | -470,5 | 4,34 | 6,24 | -0,37 | -0,93 |
| 666 56 S | -467,9 | 7,72 | 9,96 | 1,16 | 2,58 |

Die Tragwirkung des weitgehend überbeanspruchten Pfeiler-Schweben-Systems beruht derzeit hauptsächlich auf der Existenz noch allseitig eingespannter Pfeilerkerne, welche die Gebirgslasten auf sich ziehen und trotz ihres geringen Flächenanteils höhere Belastungen einspannungsbedingt abtragen können. Auch der eingebrachte Versatz trägt zu einer, wenn auch geringen, Konturstabilisierung der Tragelemente, insbesondere der Pfeiler, bei; neben der aussteifenden Wirkung der Schweben bzw. Schwebenreste sorgt er für eine Behinderung von Pfeilerquerdehnungen [U2]. Trotz der Konturstabilisierung der im Versatz eingebetteten Pfeiler schreitet der Entfestigungsprozess jedoch fort. Sollten die Pfeiler- und Schwebenkerne infolge Entfestigung und lokaler Risse weiter an Tragfähigkeit verlieren, erfolgt ein weiterer Lastabtrag auf benachbarte Pfeiler und schließlich auf die Baufeldränder [U1].

5.3.2 Messung der Versatzsteifigkeiten

Seit Juni 1997 wird in 6 Abbauen der 616- m-Sohle sowie in 2 Abbauen der 637-m-Sohle und je einem Abbau der 595- und 658-m-Sohle der Lastaufbau im Versatz mittels Druckkissen beobachtet (Anlagen 11 bis 14).

Die betreffenden Spannungsmonitorstationen messen Spannungen in den folgenden drei Raumrichtungen:

- Vertikal
- Horizontal in Streichrichtung
- Horizontal quer zum Streichen

Die gemessenen Drücke im Versatz weisen sehr hohe Schwankungsbreiten und Sprünge auf, was auf Bewegungen innerhalb des Versatzes schließen lässt, bedingt durch die hohe Porosität (Anlage 14) [U18]. Singuläre Spitzenwerte der Messwerte sind nur an einzelnen Messpunkten beobachtet worden. Hieraus lassen sich nur bedingt Lastzunahmen ableiten, die durch einzelne Versatzbrücken erzeugt werden könnten. Der diskontinuierliche Messwertverlauf lässt vermuten, dass solche Materialbrücken im Versatz durch Bewegungen des Versatzkörpers immer wieder zerbrechen.

Zu dem uneinheitlichen Verlauf der einzelnen Messwerte kommen noch große Schwankungen bei den Spitzenwerten innerhalb einer Kammer hinzu. So variieren die maximal gemessenen Spannungswerte in querschlägiger Messrichtung in der Kammer 7/616 in einem Bereich von 0,05 bis 0,99 MPa (Anlage 11).

Aufgrund dieser Schwankungen der Spitzenwerte kann derzeit an keinem der Beobachtungspunkte von einem signifikanten Druckaufbau im Versatzmaterial ausgegangen werden. Somit leistet das Versatzmaterial derzeit keinen direkten Beitrag zur Lastabtragung im Grubengebäude. Die indirekte Wirkung besteht in dem Stützdruck auf die Pfeiler, der querdehnungsbehindernd wirkt. Dieser resultiert einzig aus dem Eigengewicht des Versatzes. Der seitlich wirkende, mittlere Horizontaldruck aus Eigenlast des Versatzes ergibt sich zu [U1]

$$\sigma_{\text{horizontal}} = \frac{1}{2} \cdot \lambda \cdot h \cdot \gamma = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 15 \cdot 12,5 = 0,045 \text{ MPa}$$

mit der Kammerhöhe h (entspricht bei Vollversatz der Kammerhöhe), dem Seitendruckbeiwert λ und einer Versatzwichte γ . In dieser Größenordnung liegen auch die gemessenen Spannungswerte in horizontal streichender Richtung (Anlage 13).

Die Spannungsmessungen belegen somit, dass Druckanstiege im Versatz, welche auf den Aufbau einer aktiven, integralen Versatzsteifigkeit infolge Materialkompaktion schließen lassen, derzeit nicht erkennbar sind.

5.3.3 Pfeilerstauchungen und Lagemessungen

Das Pfeiler-Schweben-System reagiert auf die hohen einwirkenden Belastungen durch Verformungen in den Traggliedern. Im Salz treten diese als plastische Verformungen und Kriechverfor-

mungen auf. In der Folge müssen die Belastungen bzw. Zusatzbelastungen umgelagert und an anderen Stellen aufgenommen und abgetragen werden.

Messtechnisch erfasst werden die Verformungen seit 1981 u. a. durch Extensometermessungen in den Pfeilern der Südwestflanke [U6].

Der eingebrachte Versatz trägt, durch sein Eigengewicht, zu der bereits erwähnten, begrenzten Konturstabilisierung der Tragelemente bei, wodurch es mit einer Verzögerung von einigen Jahren zu einer Verlangsamung der Pfeilerstauchungen gekommen sein kann (Anlage 15).

In Anlage 16 sind die Pfeilerstauchungen der Jahre 2000 bis zum Frühjahr 2008 in mm pro Jahr dargestellt. Die Verformungsraten liegen größtenteils zwischen 45 bis 130 mm/a bei einem Mittelwert von ca. 85 mm/a. Die maximalen Stauchungsraten werden derzeit am Pfeiler zwischen den Kammern 6 und 7 auf der 574- und 553-m-Sohle mit einem Wert von ca. 130 mm/a gemessen. Deutlich ist der abnehmende Trend in der Stauchungsgeschwindigkeit zu erkennen. Werden die Pfeilerstauchungsraten bezogen auf das jeweils vorhergehende Jahr aufgetragen, so ist eine starke Abnahme im Jahr 2004 bezogen auf die Raten des Jahres 2003 zu erkennen (Anlage 17). Dieser Trend hält in den nächsten Jahren an, jedoch mit abgeschwächter Rate. Für 2008 ist eine deutlich geringere Abnahme der Pfeilerstauchungsraten zu beobachten, die Stauchungsraten nähern sich scheinbar zur Zeit einem konstanten Wert an. Als maßgeblichen Grund für die Reduzierung der Stauchungsraten werden die Spannungsumlagerungen auf die Baufeldränder angegeben [U16].

Die in Anlage 18 aufgeführte Isoliniendarstellung der Pfeilerstauchungen für das Jahr 2008 zeigt auf, 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. Dies bestätigt die Annahme einer Lastübergabe von den überlasteten Pfeilern auf die benachbarten Pfeiler und schließlich auf die Baufeldränder [U1].

Konvergenzmessungen werden im Grubengebäude bislang ausschließlich in Strecken, wie z. B. der Wendelstrecke und den Abbaubegleitstrecken in der Südwestflanke durchgeführt. Die Messungen erfolgen generell mittels Messband an Festpunkten als Horizontal- und Vertikalkonvergenz. Die prinzipielle Anordnung einer Messstelle ist in Anlage 20 im Querschnitt dargestellt. Die gemessenen Werte für die einzelnen Strecken sind in der Tabelle 5.3 aufgelistet. Es wird deutlich, dass die gemessenen Konvergenzen wesentlich durch die Lage der Messstellen im Grubengebäude geprägt sind.

Im Bereich der Abbaustrecken kommt es im Vergleich zur Wendelstrecke zu größeren Verformungsraten. Eine ggf. zu erwartende Abhängigkeit der Längskonvergenzraten von der Teufe bestätigen die Messergebnisse nicht [U14].

Tabelle 5.3 Bandbreiten der Längenkonvergenzen für die verschiedenen Instrumentierungsbereiche [U14]

| | Konvergenz [$^{\circ}/_{00}/a$] | Mittelwert [$^{\circ}/_{00}/a$] |
|-------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Südwestflanke – Wendelstrecke | 0,0 – 0,2 | 0,08 |
| Südwestflanke – Abbaubegleitstecken | 0,3 – 3,5 | 1,11 |
| Südwestflanke sonstige Stecken | 0,3 – 1,8 | - |

Durchgeführte Lagemessungen [U5] zeigen, dass die Verformungen im nördlichen Bereich des Grubengebäudes deutlich geringer sind als die der Südwestflanke bzw. dass es zu keinen nennenswerten Verformungen im nördlichen Bereich des Grubengebäudes kommt. Beispielhaft ist dies in Anlage 21 für den Querschlag auf der 553-m-Sohle dargestellt. Insgesamt ist auf Grundlage der Konvergenz- und Lagemessungen zu erkennen, dass die Abbaukammern der Südwestflanke auf den nördlichen Bereich „auflaufen“, also der größte Anteil der Verformungsarbeit im Bereich der Abbaukammer stattfindet und die Verschiebungen sich nicht auf die im nördlichen Bereich liegenden Baufelder auswirken.

5.3.4 Firstspaltvermessung

In den Jahren 2001 bis 2004 wurden in einigen Abbaukammern, verteilt über den oberen Bereich des Grubengebäudes, die Firstspalten aufgenommen. Die Messungen aus dem Jahr 2004 sind in der Anlage 22 entsprechend ihrer Anordnung in der Abbaukammer dargestellt. Die größten Spalten wurden in den Abbauen 5/595 und 7/616 mit einer maximalen Spalthöhe von $h_F = 1,72$ m gemessen. Im Mittel und ohne Berücksichtigung der beiden Spitzenwerte beträgt die Spaltöffnung ca. 0,35 m.

In Anlage 6 sind die über 1 Jahr gemessenen Sackungen des frisch eingeblasenen Versatzes in der Abbaukammer 8/574 dargestellt. Die Setzungen nehmen nach den ersten drei Monaten deutlich ab gehen in eine Kriechphase mit deutlich geringeren Setzungsraten über.

Die gemessenen Werte der Firstspalten haben sich in der Messperiode von 2003 bis 2004 zu meist nicht wesentlich geändert, wie es der Anlage 21 zu entnehmen ist. Aufgetragen sind in dem Diagramm die gemessenen Firstspalten in Abhängigkeit vom Messdatum für die 574-m-Sohle, welche beginnend vom Jahr 1999 bis 2001 verfüllt wurde. Der Verlauf zeigt sowohl leichte He bungen des Versatzes als auch einen gleichbleibenden Verlauf der Firstspalte während der Messperiode.

5.4 Zusammenfassung der Ausgangssituation in der Südwestflanke

Die durchgeführten Spannungs- und Verformungsmessungen zusammen mit den darauf aufbauenden, vom Institut für Gebirgsmechanik (IfG) durchgeführten FE-Berechnungen [U1] belegen, dass sich das Pfeiler-Schweben-System in der Südwestflanke im Grenzzustand der Tragfähigkeit befindet. Ein Großteil der Schweben hat bereits versagt, zumeist durch die hohe Belastung aufgrund des ungünstigen Abbauverhältnisses. Die verbliebenen Schwebenringe leisten lediglich durch ihren geringen 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 sich 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 besteht gemäß [U29] die Gefahr einer Schädigung des gesamten Grubengebäudes aufgrund der dann möglicherweise in den Carnallit-Baufeldern eintretenden Umlöseprozesse.

Der wahrscheinliche Zusammenhang zwischen Deckgebirgsverschiebung aufgrund von Verformungen im Grubengebäude und Zunahme der Laugenzutrittsraten erfordert eine baldmöglichst realisierte Stützung der Südwestflanke zur Reduzierung der Stauchungsraten.

6 REDUZIERUNG DER VERFORMUNGSRATEN DER SÜDWESTFLANKE

6.1 Allgemeines Konzept

Das derzeitige Tragsystem der Abbaukammern der Südwestflanke besteht aus einem Pfeiler - Schweben – System im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Eine nennenswerte Lastabtragung durch den Versatz in den Abbaukammern ist, wie in Kapitel 5 dargestellt, derzeit nicht vorhanden. Die fehlende kraftschlüssige Anbindung des als Versatzmaterial eingebauten Salzgruses verhindert bisher den Aufbau eines Druckes im Versatzmaterial und damit dessen maßgeblichen Beitrag zur Lastabtragung zwischen den Pfeilern. Darüber hinaus wären für die Weckung maßgeblicher und für die Gesamtstabilität notwendiger Versatzsteifigkeiten größere und langanhaltende Verformungen erforderlich.

Ziel des im folgenden vorgestellten Konzeptes ist die zeitnah installierte Aktivierung einer signifikanten Mittragwirkung des Versatzes, erreicht durch den kraftschlüssigen Verbund zwischen Versatzmaterial und Kammerdecke (Schließung des Firstspaltes) sowie durch Erhöhung der Versatzsteifigkeit (mit gezielter Hohlraumreduzierung im Versatz). Die geplanten Maßnahmen lassen sich in 2 Stufen einteilen:

Stufe 1: Qualitätsgesicherte Verfüllung des Firstspaltes in den Abbaukammern,

- zur Erzielung eines kraftschlüssigen Verbundes,
- zur seitlichen Einspannung der Pfeiler sowie
- zur Aktivierung der Versatzsteifigkeit

Stufe 2: Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial, durch druckhafte Volumenzugabe

- zur frühzeitigen Erhöhung der Versatzsteifigkeit

Mit diesem Konzept sollen vor Beaufschlagung des Grubengebäudes mit Druckluft die Pfeilerstauchungsraten reduziert und die latente Gefahr eines erhöhten Laugenzutritts vermindert werden.

Die Versatzsteifigkeit in den Abbaukammern wird durch eine Verdichtung des Salzgruses aktiviert und wirkt als Innendruck den Verschiebungen der Abbaukammer und der Pfeiler durch den Gebirgsdruck entgegen (Anlage 23). Bedingung hierfür ist ein kraftschlüssiger Verbund des Versatzes mit dem Pfeiler-Schweben-System, da sich das Versatzmaterials ansonsten einer Verdichtung durch eine Verschiebung in Richtung der Kammerfirste entziehen würde.

Nach Abschluss der Versatzeinbringung liegt, wie in Kapitel 5.3.4 erläutert wurde, im Regelfall kein kraftschlüssiger Verbund zwischen Salzgrus und der Decke der Abbaukammer vor. Der vorhandene Hohlraum muss geschlossen werden, bevor eine wesentliche Mittragwirkung des Versatzes infrage kommt. Ohne technische Maßnahmen kann der Verschluss dieses Hohlräume nur

durch die Stauchung der Abbaukammer, also durch weitere „natürliche“ Verschiebungen und Entfestigungen der Südwestflanke, erfolgen.

Für die zeitliche Abschätzung der benötigten Verschiebung wird angenommen, dass sich die Pfeiler konisch verformen und die Abbaukammer über die volle Länge gestaucht wird (Anlage 24). Mit dieser Annahme kann die Volumenstauchung wie folgt ermittelt werden:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L \cdot H \cdot (B_K + 0,5 \cdot B_{Pf})}{L \cdot H \cdot B_K} = \frac{\Delta L}{L} \left(1 + \frac{B_{Pf}}{2 \cdot B_K} \right) \quad (6.1)$$

mit:

- ΔL = Stauchung
- ΔV = Hohlraumvolumen
- B_K = Abbaukammerbreite 60 m für die Standardkammer
- B_{Pf} = Pfeilerbreite 12 m für die Standardkammer
- H = Höhe Abbaukammer 15 m für die Standardkammer
- L = Tiefe Abbaukammer 40 m für die Standardkammer
- V = Volumen der Abbaukammer 36.000 m³ für die Standardkammer

Zur Schließung des Firstspaltes mit $h_F = 0,35$ m (Mittelwert) wird bei Annahme der Standardkammer nach Gleichung 6.1 und bei angenommener Volumenkonstanz des Versatzes eine Stauchung in querschlägiger Richtung von $\Delta L = 0,85$ m benötigt. Dies entspricht einer Volumenänderung von 2,3% (850 m³) bezogen auf das Gesamtvolumen der Abbaukammer. Unter Annahme einer gleichbleibenden Stauchungsrate von 100 mm/a ist diese Volumenänderung ausgehend von 2008 im Jahre 2017 voraussichtlich abgeschlossen.

$$\frac{\Delta L}{\dot{\epsilon}_v} = \frac{0,85}{0,10} \approx 8,5 \text{ Jahre} \quad (6.2)$$

Deutlich wird hier, dass sich ohne eine gezielte Maßnahme ein kraftschlüssiger Verbund nur sehr langsam einstellt; je nach Stauchungsrate müssen hierfür bis zu 14 Jahre oder länger eingeplant werden. Wahrscheinlich dauert dieser Vorgang jedoch noch länger, da der Salzgrus sich durch die Stauchung selbst auch verdichtet und nicht zu 100% volumenkonstant umgelagert wird und den Firstspalt dabei füllt. Auch ist zu erwarten, dass die Stauchungsrate über die Zeit nicht konstant bleibt sondern abnehmen wird. Auf jeden Fall liegt zum Zeitpunkt der „natürlichen“ Firstspaltschließung der geplante Zeitpunkt der Verfüllung der Schachanlage Asse (Jahr 2014) schon zurück (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1 Benötigte Zeiträume zur Schließung der Firstspalte von $h_F = 0,35$ m ohne Ansatz von technischen Maßnahmen bei Ansatz einer über die Jahre konstanten Stauchungsrate

| Stauchungsrate [mm/a] | Jahre bis zur Schließung der Firstspalte | Kraftschluss ausgehend von 2008 im Jahr |
|-----------------------|--|---|
| 60 | 14 | 2022 |
| 80 | 11 | 2019 |
| 100 | 8,5 | 2017 |
| 130 | 6,5 | 2015 |

Nach erfolgtem Kraftschluss in der Kammerfirste wird durch die weitere Verschiebung der Kammerlängswand der Versatz belastet, mit der Folge einer Reduzierung des Porenvolumens und eines Anstiegs der Versatzsteifigkeit.

Dieser Anstieg kann in Abhängigkeit von der Porosität des Salzgruses kann in einer Zustandsgleichung beschrieben werden [U21]:

$$p_v(n, \dot{\epsilon}_v) = p_x \cdot \left(\frac{\dot{\epsilon}_v}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{0,125} \cdot \left(\frac{n_0 - n}{n - n_r} \right)^{0,5} \quad (6.3)$$

mit

- n = Porosität des Salzgruses
- n_0 = Ausgangsporosität des Salzgruses
- n_r = Restporosität des Salzgruses
- p_x = bezogener Druck
- $\dot{\epsilon}_v$ = Verformungsrate des Salzgruses im Versuch
- $\dot{\epsilon}_0$ = Verformungsrate des Salzgruses in-situ

Die Verformungsraten des Salzgruses betragen im Versuch $\dot{\epsilon}_v = 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ sec}^{-1}$ und in-situ $\dot{\epsilon}_0 = 1,5 \cdot 10^{-14} \text{ sec}^{-1}$. Die Restporosität des Versatzes wird mit $n_r = 2,5 \%$ angegeben und der bezogene Druck wird zu $p_x = 1 \text{ MPa}$ angesetzt.

Für 4 unterschiedliche Ausgangsporositäten ($n = 39, 42, 45$ und 48%) ist die Entwicklung der Versatzsteifigkeit in Abhängigkeit von der Porosität in Anlage 25 dargestellt. Abgelesen werden kann hier der Anstieg der Versatzsteifigkeit p_v bei kraftschlüssigem Verbund des Versatzes mit dem Pfeiler-Schweben-System in Abhängigkeit von der aktuellen Porosität des Versatzes. Durch Reduktion der Porosität des Salzgruses steigt die Versatzsteifigkeit an, damit können größere Beanspruchungen bei gleichen Verformungen bzw. gleiche Beanspruchungen mit geringeren Verformungen aufgenommen werden. Im vorliegenden Falle bedeutet das eine signifikante Verringerung der Verformungsraten der Pfeiler.

Der prinzipielle Ablauf dieser Wechselwirkung zwischen der Verschiebung (Stauchung) der Südwestflanke und der damit induzierten Entwicklung der Versatzsteifigkeit (und in der Folge der Mittragwirkung) ist in Anlage 26 grafisch wiedergegeben. Dargestellt ist hier der Fall für eine Ausbaukammer auf der 553-m-Sohle mit einer Ausgangsporosität des Versatzes vom im Mittel $n_0 = 42\%$. Seit Beginn der Messung der Pfeilerstauchungen hat dieser Bereich eine Verschiebung von ca. 2,6 m erfahren. Zur Schließung des angesetzten Firstspalte mit einer Höhe von $h_F = 0,35$ m wird eine weitere Verschiebung der Kammerwand von $\Delta L = 0,85$ m benötigt. Der kraftschlüssige Verbund stellt sich bei einer angesetzten Stauchungsrate von 100 mm/a dann im Jahre 2017 ein.

Zur Aktivierung einer Versatzsteifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa ist nach Gleichung 6.3 eine weitere Verschiebung der Wand um $\Delta L = 0,65$ m notwendig. Für diese Stauchung wird bei gleichbleibender Stauchungsrate eine Zeitdauer von ca. 6,5 Jahren benötigt. Die gewünschte Steifigkeit würde demnach im Jahre 2024 eintreten, sofern sich die Randbedingungen nicht verändern. Für eine Verdoppelung der Versatzsteifigkeit auf $p_v = 1,0$ MPa werden unter diesen Bedingungen 23 Jahre und eine Verschiebung von $\Delta L = 2,30$ m benötigt.

Die Aktivierung und Erhöhung der Versatzsteifigkeit führt zu einer größeren Beteiligung des Versatzes am Lastabtrag und dementsprechend zu einer Entlastung des Pfeiler-Schweben-Systems. Zugleich werden durch den durch die Mittragwirkung des Versatzes steigenden Innendruck in den Kammern die Pfeiler stärker gebettet und so die Querdehnung behindert (Anlage 13). Aufgrund dieser triaxialen Einspannung kommt es zu einer höheren Tragfähigkeit der Pfeiler, wie aus den Versuchsergebnissen in Anlage 27 abzuleiten ist [U27].

Dargestellt sind dort die Festigkeits- und Dilatanzkurven von triaxialen Kompressionsversuchen an Steinsalz bei unterschiedlichen Seitendrücken. Nach Überschreitung der Grenztragfähigkeit stellt sich in Abhängigkeit vom eingestellten Manteldruck ($\sigma_3 < 3$ MPa) eine Restfestigkeit ein. Die hierbei ausgebildeten Restfestigkeitsplateaus sind über einen großen Verformungsbereich von bis zu $\varepsilon = 20\%$ nahezu konstant [U1].

Von entscheidender Bedeutung für das Last-Verformungsverhalten der Tragelemente ist deren seitliche Stützung. Je größer der Seitendruck, desto größer ist auch die Grenztragfähigkeit und auch die Restfestigkeit (Tragfähigkeit nach dem Bruch).

Die seit Beginn der Messungen dokumentierten Pfeilerstauchungen liegen im Bereich von 3 bis 10% (Tabelle 6.2). Somit ist davon auszugehen, dass je nach Einspanngrad einige Pfeiler ihre Grenztragfähigkeit noch nicht erreicht haben und andere Pfeiler sich im Nachbruchbereich befinden. Durch eine Erhöhung des Innendrucks, also des Drucks im umgebendem Versatzmaterial, kann die Tragfähigkeit auch dieser im Nachbruchbereich liegenden Pfeiler deutlich erhöht werden. Wie die Ergebnisse der triaxialen Druckversuche zeigen, wird durch einen Anstieg der seitlichen Stützung von z. B. $\sigma_3 = 0,2$ MPa auf 0,5 MPa die Restscherfestigkeit um ca. 100% von ca. 5 MPa auf ca. 10 MPa erhöht.

Tabelle 6.2 Pfeilerstauchungen ausgewählter Bereiche [U6]

| Pfeiler | Beginn der Messung | Stauchung [m] | Stauchung [%] |
|---------|--------------------|---------------|---------------|
| 532_2/3 | 1990 | 1,18 | 2,95 |
| 553_4/5 | 1981 | 2,60 | 6,50 |
| 574_6/7 | 1982 | 3,02 | 7,55 |
| 595_7/8 | 1982 | 3,28 | 8,20 |
| 616_5/6 | 1988 | 3,94 | 9,85 |

Die vorstehenden Betrachtungen zeigen, dass „natürliche“, rein stauchungsinduzierte Druckausbildungen und Steifigkeitserhöhungen im Versatzmaterial, die für die Gesamtstabilität des Grubengebäudes notwendig sind, lange Zeiträume in Anspruch nehmen, bei weiter ablaufender Entfestigung des Pfeiler-Schweben-Systems und mit entsprechenden Folgen an den Grenzen zum Deckgebirge.

6.2 Einschätzung der Maßnahme hinsichtlich des Tragverhaltens der Südwestflanke

Anhand überschlägiger Spannungs- Verformungsanalysen wird im folgenden die Wirkung der hier nun vorgeschlagenen Maßnahmen zur zeitnahen Initiierung der Mittragwirkung des Versatzes und zu dessen Steifigkeitserhöhung unter Berücksichtigung eines elastisch- viskoplastischen Materialverhaltens untersucht. Darauf aufbauend werden mit den numerischen Untersuchungen die Änderungen von Verformungs- und Dehnungsraten durch versatzsteifigkeitserhöhende Maßnahmen prognostiziert bzw. abgeschätzt.

Für das elastisch- viskoplastische Materialverhalten von Steinsalz existiert keine geschlossene analytische Lösung. Als flexibles numerisches Lösungsverfahren hat sich die Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgesetzt. Die Berechnungen mit der FEM erfolgten mit dem Programmpaket TOCHNOG. Das Finite-Elemente Netz wurde mit dem Programm GID erzeugt.

6.2.1 System, Belastungen und Randbedingungen

Die nachfolgend beschriebenen Berechnungen wurden für die 574-m-Sohle durchgeführt (Anlage 28). Im Pfeiler zwischen den Kammern 6 und 7 wurden in der Vergangenheit große Deformations- bzw. Stauchungsraten, bis ca. 130 mm pro Jahr, gemessen. Das für die Berechnungen diskretisierte System ergibt sich aus dem Horizontalschnitt gemäß Sohlenriss auf Höhe dieser Sohle. Anlage 29 zeigt das gewählte System und die in den Berechnungen angesetzten Randbedingungen. Unter Vernachlässigung der Wetter- und Wendelstrecken bildet das Finite-Elemente-Netz die Kammern 2 bis 9 in ihrer streichenden Lage zum Deckgebirge ab. Die Kammer 1 wird aufgrund ihrer geringen Abmessungen in den Berechnungen vernachlässigt.

Der Berechnungsausschnitt hat eine Breite (streichend) von 650 m und eine Tiefe in querschlägiger Richtung von 330 m und wird im dargestellten Finite-Elemente-Netz mit 1.981 Knoten und 3.587 Dreieckselementen diskretisiert. Die Systemränder in querschlägiger Richtung werden horizontal, der hintere Rand in streichender Richtung wird in Belastungsrichtung gehalten.

Der Gradient der Horizontalspannungen auf die Schachanlage wird mit ca. 15 MPa pro km Tiefe angegeben [U16]. Auf Höhe der 574 m Sohle resultiert daraus eine querschlägige Belastung des gesamten Systems zu

$$p = 15 \text{ MPa/km} \cdot 0,574 \text{ km} = 8,61 \text{ MPa} . \quad (6.4)$$

Diese Belastung wird auf dem gesamten streichenden Systemrand gemäß Anlage 29 angesetzt.

Sämtliche Kammern auf der 574 m Sohle wurden in den Jahren 1999 bis 2001 mit Salzgrus versetzt. Um den seitlichen Druck aus dem Eigengewicht des Versatzmaterials auf alle Kammerränder - und somit auch auf die Pfeiler - in der numerischen Berechnung zu simulieren, wurden diese horizontalen Drücke in Anlehnung an die Coulomb'sche Erddrucktheorie bestimmt und mit einem Mittelwert über die Kammerhöhe auf alle Innenränder der Kammern als Krastrandbedingung angesetzt. Folgende Kennwerte wurden berücksichtigt:

| | |
|------------------------------|--------------------------------|
| Wichte der Versatzmaterials: | $\gamma = 12,5 \text{ kN/m}^3$ |
| Kammernhöhe: | $h = 15,0 \text{ m}$ |
| Seitendruckbeiwert: | $k = 0,3$ |

Der hier angesetzte Erddruckbeiwert ist deutlich niedriger als der Erdruhedruckbeiwert von $k = 0,5$, welcher in den Berechnungen vom IfG angesetzt wurde [U1]. Gewählt wurde dieser niedrigere Wert, um den unteren Wertebereich der gemessenen Versatzdrücke in horizontal streichender und querschlägiger Messrichtung (Anlagen 13 und 14) abbilden zu können.

Damit ergibt sich die mittlere Ordinate des in der numerischen Berechnung angesetzten seitlichen Drucks aus Eigengewicht des Verfüllmaterials auf die Kammernränder zu

$$e_{n,kav} = \frac{1}{2} (12,5 \text{ kN/m}^3 \cdot 15 \text{ m} \cdot 0,3) = 28,13 \text{ kN/m}^2 = 0,028 \text{ MN/m}^2 , \quad (6.5)$$

der senkrecht auf die Kammerränder angesetzt wird. Die Anlage 30 zeigt den Ansatz dieser Lasten exemplarisch für einen Systemausschnitt.

In den nachfolgend beschriebenen Berechnungen wird numerisch simuliert, dass nach einer 10-jährigen Kriechphase des Salzgebirges, nur unter Ansatz des horizontalen Innendrucks aus Eigengewicht, ein kraftschlüssiger Verbund durch eine Firstspaltverfüllung hergestellt und die Steifigkeit des Versatzmaterials in ausgewählten Kammern erhöht wird. Die Berechnungen werden fortgeführt mit dem Fall, dass nach erfolgter Hohlraumreduzierung des Salzgruses durch technische Maßnahmen das in den Kammern befindliche Versatzmaterial zur weitergehenden Stützung

der Pfeiler und zur Lastabtragung herangezogen wird. Anhaltende Kriechvorgänge des Salzgebirges in Richtung der Kammerräume hinein begünstigen dabei durch die weitere Reduktion des Porenvolumens die Steifigkeitsentwicklung des darin befindlichen Versatzmaterials. Diese Effekte auf das Deformationsverhalten werden für weitere 10 Jahre berechnet.

Der mit dem kraftschlüssigen Verbund einsetzende Anstieg der Versatzsteifigkeit wird in den Berechnungen durch die Gleichung 6.3 unter Annahme einer Ausgangsporosität von 42 % und einer Stauchungsrate von 100 mm/a berücksichtigt. Unter diesen Randbedingungen stellt sich ohne zusätzliche Einwirkungen von außen in den Abbaukammern der 574-m-Sohle in 8,5 Jahren der Verschluss der Firstspalte ein. Die angesetzten Drücke, mit denen der Zustand in den Kammern nach Ertüchtigung und somit die Entwicklung der Versatzsteifigkeit simuliert wird, und die als Lasten senkrecht auf die Kammerränder angesetzt werden, sind in Abhängigkeit von der Zeit, in Anlage 31 dargestellt.

Um den Einfluss einer Versatzsteifigkeitserhöhung auf das Deformationsverhalten der Pfeiler der 574-m-Sohle zu untersuchen, werden folgende Zustände simuliert (Anlage 32):

- Fall ohne: nur Eigengewicht des Salzgruses (keine Maßnahmen)
- Fall a: Aktivierung der Versatzsteifigkeit nach Firstspaltverfüllung (durch Stauchung)
- Fall b: Aktivierung der Versatzsteifigkeit nach Firstspaltverfüllung und Steifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den Abbaukammern 6 und 7
- Fall c: Aktivierung der Versatzsteifigkeit nach Firstspaltverfüllung und Steifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den Abbaukammern 5 bis 8
- Fall d: Aktivierung der Versatzsteifigkeit nach Firstspaltverfüllung und Steifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den Abbaukammern 3 bis 8

Der „Fall ohne“ stellt hierbei die derzeitige Situation im Grubengebäude dar. Durch das Eigengewicht des eingebrachten Versatz wirkt ein Druck von 0,028 MPa auf die betreffenden Kammerwände. Durch die Firstspaltverfüllung wird die Versatzsteifigkeit aktiviert („Fall a“). Im „Fall b“ werden die beiden Abbaukammern 6 und 7 so ertüchtigt, dass eine Versatzsteifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa auf die Kammerränder wirkt. Simuliert wird dies durch einen zu Beginn des zweiten Berechnungsabschnittes (nach 10 Jahren) wirkenden Drucks von 0,5 MPa auf die Kammerränder. Im „Fall c“ wird der ertüchtigte Bereich auf die Abbaukammern 5 bis 8 erweitert und im „Fall d“ auf die Abbaukammern 3 bis 8.

6.2.2 Kriechverhalten des Steinsalzes

Das Kriechverhalten des Steinsalzes wird in den Berechnungen mit dem Programmpaket TOCHNOG mit dem Kriechgesetz

$$\dot{\epsilon}_{\text{inel}} = \eta \cdot f^p \quad (6.6)$$

beschrieben. Es hat die gleiche Form wie das bekannte Kriechgesetz für sekundäres Kriechen im Stoffmodell BGRa für Steinsalz [U1]

$$\dot{\epsilon}_{\text{inel}} = A \cdot e^{\frac{-Q}{RT}} \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma^*} \right)^n \quad (6.7)$$

Als Fließregel und Fließfunktion wird die Bedingung nach von-Mises für die Formulierung eines assoziierten Stoffmodells verwendet.

Die Größe des Parameters η , in TOCHNOG „fluidity constant“ genannt, kann direkt aus den bekannten Parametern des Ansatzes BGRa für die auf der 574-m-Sohle herrschende Temperatur von 33 °C (= 306,15 K) bestimmt werden:

| | |
|-------------------------|---|
| Aktivierungsenergie | Q = 54 kJ/mol |
| Allgemeine Gaskonstante | R = 8,314 * 10 ⁻³ kJ/(mol * K) |
| Absolute Temperatur | T = 306,15 K |
| Spannungsexponent | n = 5 |
| Fließfaktor | A = 0,18 d ⁻¹ |

Diese Parameter wurden in der Vergangenheit für das Referenzkriechgesetz für intaktes Steinsalz verwendet. Es ist jedoch bekannt, dass einige der Pfeiler der SchachanlageASSE sich schon im Nachbruchbereich befinden und sich somit nicht entsprechend dem genannten Stoffmodell verhalten.

Für die durchgeführten überschlägigen Spannungs-Verformungs-Analysen wurde die Größe des Parameters η anhand der dokumentierten Deformationsraten des Pfeilers 6/7 auf der 574-m-Sohle so kalibriert, dass unter Ansatz einer mittleren horizontalen Belastung der Kammerränder durch das Eigengewicht des Versatzmaterials die gemessene Stauchungsrate von ca. 130 mm/Jahr mittelfristig in der gleichen Größenordnung berechnet wird. Hierfür wird die Differenz der berechneten plastischen Verschiebungen $\Delta\delta_y$ in querschlägiger Richtung gemäß Anlage 33 an den Enden des Pfeilers 6/7 herangezogen. Für das noch intakte Steinsalzgebirge wird eine um den Faktor 5 geringere Viskosität als für die schon geschädigten Pfeiler angesetzt.

6.2.3 Ergebnisse

In Abhängigkeit von den unterschiedlichen Innendrücker in den Abbaukammern sind in Anlage 34 die berechneten Stauchungsraten im Pfeiler 6/7 für den Berechnungszeitraum von 20 Jahren dargestellt. In den ersten 10 Jahren wurde bei allen Berechnungen ein Innendruck entsprechend dem Eigengewicht nach Gleichung 6.5 angesetzt. Anschließend greifen die entsprechenden Maßnahmen und die in Anlage 31 dargestellte Entwicklung der Versatzsteifigkeit über die Zeit.

Durch die frühzeitige Schließung der Firstspalten und die damit verbundene um Jahre vorgezogene Aktivierung der Versatzsteifigkeit im „Fall a“ gegenüber dem Fall ohne Maßnahmen (= Ausgangssituation) wird die gemittelte Stauchungsrate des Pfeilers 6/7 von ca. 131 mm/a auf ca. 108 mm/a verringert. Dies entspricht einer Reduzierung der Stauchungsrate um ca. 18 % allein durch die frühzeitige Herstellung eines kraftschlüssigen Verbundes.

Wird nun durch entsprechende Maßnahmen zusätzlich das Porenvolumen des Salzgruses reduziert und damit die Steifigkeit erhöht, verringert sich die Stauchungsrate weiter. Für den Fall einer Steifigkeit von $p_v = 0,5$ MPa in den benachbarten Kammern 6 und 7 („Fall b“) reduziert sich die Stauchungsrate im Pfeiler 6/7 auf ca. 99 mm/a. Dies entspricht einer Reduzierung der Stauchungsrate um ca. 24 %. Bei der Ermittlung der Stauchungsraten wird jeweils die mittlere Rate über den Berechnungszeitraum von 10 bis 20 Jahren betrachtet:

$$\text{gemittelte Stauchungsrate } \varepsilon = \frac{\Delta \delta_{\text{Fall}}}{\Delta t} \quad (6.8)$$

In der Tabelle 6.3 sind die gemittelten Stauchungsraten für alle 7 Pfeiler und den berücksichtigten Fällen dargestellt. Es zeigt sich hier, dass die Stauchungsrate mit wachsender Anzahl an Kammern mit einer Versatzsteifigkeit von 0,5 MPa zwar weiter abnimmt, aber nicht mehr so stark wie im „Fall b“. So sind zwischen den beiden Fällen c und d kaum Unterschiede in den Stauchungsraten festzustellen.

In den Anlagen 35 bis 39 sind die berechneten Verformungen in querschlägiger Richtung (= Lastrichtung) zum Zeitpunkt $t = 20$ Jahre für das verformte System in Isoflächendarstellung abgebildet. Deutlich zu erkennen ist die Verringerung der Dehnungen in den Pfeilern mit zunehmender Anzahl an behandelten Kammern.

Zudem ist aus den grafischen Ergebnisdarstellungen gut zu erkennen, dass sich aufgrund der querschlägigen Belastung der Hauptanteil der Verschiebungen aus den Deformationen in den Pfeilern einstellt. Das lastabgewandte „intakte“ Salzgebirge reagiert auf die seitliche Belastung aus dem Deckgebirge nur mit sehr geringen Verformungen (hier: blaue Bereiche in der Isoflächendarstellung).

Tabelle 6.3 Auflistung der über 10 Jahre gemittelten plastischen Stauchungsrate in Abhängigkeit der in den Kammern wirkenden Versatzsteifigkeiten

| | Gemittelte Stauchungsrate über 10 Jahre in [mm/a] | | | | | | |
|---|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Pfeiler 2/3 | Pfeiler 3/4 | Pfeiler 4/5 | Pfeiler 5/6 | Pfeiler 6/7 | Pfeiler 7/8 | Pfeiler 8/9 |
| Fall ohne Firstspalt wächst „natürlich zu“ | 29 | 70 | 102 | 128 | 131 | 98 | 51 |
| Fall a nur Firstspaltverfüllung | 24 | 58 | 85 | 106 | 108 | 80 | 42 |
| Fall b wie a) + Steifigkeitsaktivierung in Kammern 6 und 7 | 24 | 56 | 81 | 100 | 99 | 74 | 39 |
| Fall c wie a) + Steifigkeitsaktivierung in Kammern 5 bis 8 | 23 | 54 | 78 | 95 | 95 | 70 | 37 |
| Fall d wie a) + Steifigkeitsaktivierung in Kammern 3 bis 8 | 21 | 51 | 74 | 92 | 93 | 69 | 37 |

Deutlich ist zu erkennen, dass innerhalb der Gesamtstruktur keine Spannungsumlagerung zu anderen Systembereichen hin stattfindet. Sämtliche Pfeiler erfahren im Fall b 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 Dehnungen zeigt (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 reicht 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.

Zusammenfassend ist dieser Sachverhalt in Anlage 40 am Beispiel der Pfeilerstauchungen dargestellt. Aufgeführt sind die Änderungen der Pfeilerstauchungen ab Beginn der unterschiedlichen technischen Maßnahmen zu Erhöhung der Versatzsteifigkeit in Abhängigkeit zur Zeit. Eine deutliche Reduzierung der Pfeilerstauchungen gegenüber dem jetzigen Zustand kann durch die Aktivierung eines kraftschlüssigen Verbundes erzielt werden („Fall a“). Eine weitere Senkung gelingt durch die lokale Ertüchtigung verschiedener Abbaukammern. Die größte Abnahme gelingt erwartungsgemäß für den Fall mit den meisten ertüchtigten Versatzkammern („Fall d“). Gleichzeitig verdeutlichen die geringen Unterschiede zwischen den Fällen b und c, dass ein solcher Effekt, die starke Reduzierung der Pfeilerstauchungen, auch mit einer geringeren Anzahl an ertüchtigten Kammern zu erzielen ist.

6.2.4 Schlussfolgerungen

Mit den durchgeführten numerischen Berechnungen am System auf Höhe der 574-m-Sohle und den in dieser Tiefenlage wirkenden Belastungen konnten die folgenden Tendenzen aufgezeigt werden:

- Der Hauptanteil der berechneten Verschiebungen des belasteten Systemrands resultiert aus den plastischen Deformationen der Pfeiler. Das lastabgewandte Salzgebirge erfährt nur sehr geringe Dehnungen.
- Ein Stützdruck aus versatzsteifigkeitserhöhenden Maßnahmen in einer begrenzten Kammeranzahl führt voraussichtlich nicht zu einer Spannungsumlagerung mit Spannungs- und Dehnungsspitzen in anderen Bereichen des untersuchten Systems, sondern zu einer Entlastung sämtlicher Pfeiler.
- Die Firstspaltverfüllung liefert nach kurzer Zeit einen nennenswerten Beitrag zum Lastabtrag, welcher z. B. zu einer Reduzierung der Stauchungsraten für den Pfeiler 6/7 gegenüber dem Ausgangszustand von ca. 18% führt.
- Ein Stützdruck aus versatzsteifigkeitserhöhenden Maßnahmen in den Kammern 6 und 7 reduziert die Deformationsrate im dazwischen liegenden Pfeiler 6/7. Bei einem Stützdruck von $p_v = 0,5$ MPa wird eine um 24 % verringerte Stauchungsrate des Pfeilers 6/7 gegenüber dem Ausgangszustand rechnerisch ermittelt.
- Eine Behandlung weiterer Kammern mit einem Stützdruck von 0,5 MPa führt zu einer weiteren Senkung der Pfeilerstauchungsraten.
- Die Ertüchtigung von 4 Kammern mit einem Stützdruck von 0,5 MPa hat einen ähnlich großen Effekt auf die Pfeilerstauchungen wie die Beaufschlagung von 6 Kammern.

Bei der Bewertung der Berechnungsergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass diese Tendenzen aufzeigen. Absolute Werte der gezeigten Spannungs- und Verformungsgrößen unterliegen in starkem Maße dem gewählten Stoffmodell und den darin verwendeten Parametern.

Genauere Berechnungen bedürfen umfassenderer Stoffmodelle, evtl. unter Berücksichtigung des Nachbruchverhaltens und die Erfassung der räumlichen Verteilung von Spannungs- und Dehnungszuständen. Weitergehende Untersuchungen an komplexeren Modellen könnten die hier erzielten Ergebnisse quantifizieren und die Erweiterung auf die Gesamtstruktur der Schachanlage ermöglichen.

6.3 Maßnahmen zur Firstspaltverfüllung

Um einen kraftschlüssigen Verbund zwischen dem Salzgrus und dem Pfeiler-Schweben-System der Südwestflanke zu aktivieren, ist primär eine vollständige und vollflächige Verfüllung der bestehenden Firstspalten nötig. Als geeignete Maßnahme ist gegenüber Blas- und Stapelversatz für die Verfüllung solcher Geometrien der Pumpversatz vorzusehen. Beim Pumpversatz wird das

Verfüllgut hydraulisch, ggf. mit geringer Druckbeaufschlagung, in die Abbaukammer eingebracht. Für diese Maßnahme müssen die Abbaukammern druckfest verschlossen sein, was z. B. durch ein Abmauern der Öffnungen sichergestellt werden kann.

6.4 Maßnahmen zur Hohlraumverminderung im Salzgrus

Für Maßnahmen zur Verminderung des Hohlraumes im Salzgrus sind Verdichtungen und/oder Verfüllungen des Korngefüges von feinkörnigen und kriechfähigen Materialien mit Korngrößen entsprechend denen von Schluff bis Sand zu betrachten. Folgende Verfahren können unterschieden werden:

- Statisch-Dynamische Verfahren zur Kornumlagerung,
- Injektionstechniken mit und ohne Bodenverdrängung
- Verdichtung mittels Befeuchtung

6.4.1 Statisch-Dynamische Verfahren zur Kornumlagerung

Beim Kornumlagerungsverfahren wird die Verringerung des Hohlraumanteils durch eine Umlagerung der Einzelkörner in eine dichtere Packung erreicht. Die Verfahren werden im Regelfall dort eingesetzt, wo die Kornstruktur und Ausgangslagerungsdichte die Überführung in eine dichtere Lagerung mit technisch vertretbarem Energieaufwand erlauben. Dabei werden je nach Verfahrenstechnik statische oder dynamische Beanspruchungen bzw. Kombinationen eingesetzt. Im Ergebnis nimmt die behandelte Kubatur einen geringeren Raum ein als im Ausgangszustand. Bei erforderlicher äußerer Formstabilität muss der durch die Verdichtung frei gewordene Raum zusätzlich aufgefüllt werden.

Mit rein statischen Auflasten wird im Regelfall nur bei konsolidationsfähigen (Verdichtung unter Auspressen von Porenwasser) und/oder kriechfähigen Böden eine signifikante und bleibende Verformung und Verdichtung erzielt. Die betreffenden Verfahren arbeiten mit Schwerkraft und setzen dabei die Zugänglichkeit der Oberfläche mit Gerät an der zu verdichtenden Kubatur voraus.

Bei gleichzeitiger Wirkung einer auch geringen statischen Auflast (z. B. das Eigengewicht) kann durch Einbringen von dynamischen Beanspruchungen (Scherbeanspruchungen) eine erhebliche Verdichtungswirkung mit entsprechender Hohlraumreduzierung (durch Kornumlagerungen in eine dichtere Packung) erreicht werden. Im Regelfall werden dazu Schwingungen/ Vibrationen/ Schlagenergie in den betreffenden Bereich eingetragen.

Eine Gruppe von Maßnahmen zur Einbringung von Scherdehnungen und zur Erzeugung einer Hohlraumverminderung unter Auflast sind die bekannten Tiefbautechniken, bei denen Rüttel- oder Vibrationselemente systematisch (in einem festzulegenden Raster) in den zu behandelnden

Bereich eingeführt und dort zur Wirkung gebracht werden. Im Regelfall erfolgt die Einbringung senkrecht nach unten (dies ist geschuldet den bei Führung in anderen Richtungen erforderlichen komplizierten Kupplungen zwischen den Grundgeräten und den Rüttel-/Vibrationselementen).

Mögliche Geräte sind:

- Rüttelplatten u. ä.
- Tiefenrütteltechnik
- Vibrationsbohlen

Besonders große Wirkungen werden erzielt, wenn zusätzliche statische Auflasten mit Rüttel- und/oder Vibrationstechniken kombiniert werden. Jedoch erscheint der Einsatz solcher Maßnahmen für die vorgesehene Aufgabe im Grubengebäude nicht zielführend, dynamische Einwirkungen risikobehaftet und bautechnisch unter den Randbedingungen kaum zu realisieren sind.

6.4.2 Injektionstechniken

Die Einbringung von Injektionsgut in einen Baugrund kann entweder mit oder ohne Verdrängung des umgebenden Materials erreicht werden. Nach DIN EN 12715 wird dabei in die in Anlage 41 dargestellten Injektionsverfahren unterschieden.

Bei Verfahren zur Hohlraumverfüllung wird die Verringerung von Porenräumen in feinkörnigen Materialien *ohne* Umlagerung der vorhandenen Kornmatrix für Verfestigungs- und Abdichtungsaufgaben verstanden. Dabei werden in die Porenräume geeignete aushärtende (nach kurzer Frist mindestens lagestabile) Stoffkombinationen injiziert. Mit der Injektion wird dabei die Lage der Einzelkörper in der Kornmatrix fixiert, sodass bei dieser Form der Hohlraumreduzierung keine äußeren Formänderungen für die behandelte Kubatur auftreten.

Der Injektion von Porenräumen vorangestellt wird in der Baupraxis im Regelfall eine Verfüllung von gegebenenfalls vorhandenen lokalen Hohlräumen, die die Systematik einer stetigen Poreninjektion und deren Erfolg stören würden. Die Hohlraumverfüllung wird im allgemeinen mit geringen Überdrücken gegenüber dem lokalen Verfüllwiderstand bis zur Sättigung ausgeführt und unterliegt nur geringen Einschränkungen hinsichtlich der Einbringgeschwindigkeit. Im vorliegenden Fall entspricht dies der Verfüllung der offenen Firstbereiche in den Abbaukammern durch Pumpversatz.

Die verwendeten Verfüllstoffe sind im Regelfall die gleichen wie bei der Poreninjektion, wobei durch die Hohlraumgröße preiswerte (nicht fein gemahlene) Bindemittel und Zuschlagstoffe verwendet werden können.

Mit einer Poreninjektion wird der im Regelfall gleichmäßig verteilte Porenraum im zu behandelnden Bereich systematisch vollständig oder bis zu einer noch injizierbaren Porengröße unter Ver-

wendung geeigneter Injektionsmittel ohne Lageänderungen der Kornmatrix gefüllt. Für das Gelingen einer weitestgehend homogenen Injektion sind verschiedene Parameter und Merkmale der zu behandelnden Kornmatrix, der Injektionsmittel und der Verfahrenstechnik zu berücksichtigen und aufeinander abzustimmen. Je nach statistischer Verteilung der Porengrößen kann dabei ein erheblicher Anteil des Porenraumes dauerhaft gefüllt werden.

Als Injektionsmittel werden im Tiefbau im Regelfall kostengünstige Suspensionen, bestehend aus Zement/Wasser/Steinmehl/Flugasche, mit einstellbaren, signifikanten Endfestigkeiten, verwendet. Je nach den zu erreichenden Porengrößen müssen fein gemahlene Zemente und Zuschläge verwendet werden, die die Injektionsmittel erheblich verteuern können. Dauerbeständige und lagestabile Injektionsmittel auf der Basis von Kunstharz sind für systematische Behandlungen größerer Kubaturen im Regelfall zu kostenintensiv.

In diesem Kontext ist zudem die Möglichkeit der Porenverfüllung durch Salzausfällungen zu nennen. Eine Möglichkeit ist der sogenannte „selbstverheilende Salzversatz“ (SVV), welcher auf Basis von Magnesiumsulfat für Verschluss- und Abdichtungsbauwerke von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Braunschweig entwickelt wurde. Der Versatz besteht aus einem reaktiven Gemenge von Salzmineralen, welche bei Laugenkontakt ihr Volumen vergrößern und den ursprünglichen Porenraum deutlich reduzieren [U28]. Das gesamte Verfahren befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase. So wurden im Grubengebäude der Asse im Jahr 2005 erste Großbohrlochversuche mit einem Durchmesser von 1 m durchgeführt.

Unter dem Begriff Umlagerungsverfahren mit Volumenergänzung wird hier die Verdichtung mit injektionstechnischen Mitteln nach dem Prinzip der verdichtenden Materialverdrängung verstanden. Unterschieden wird hierbei zwischen Aufbrechinjektionen (Fracturing), welche eine Verdichtung der Umgebung durch mehrfache Volumenzugabe und unstetig verlaufende Fracturing-Vorgänge in der Umgebung des Injektionspunktes erreichen und den Verdichtungsinjektionen (Compaction-Grouting), welche dies durch annähernd rotationssymmetrische Verdrängung des vorhandenen Materials am Injektionspunkt erzielen. Bei beiden Techniken besteht kein Anspruch, die Porenräume selbst mit dem Injektionsmittel zu füllen.

Bei den Aufbrechinjektionen wird die Kornmatrix durch die gezielte, örtlich begrenzte Einpressung von definierten Materialmengen, wiederholt und systematisch, aufgerissen und in den entstandenen Fracs mit dem dafür bestimmten Injektionsmittel dauerhaft verfüllt. Die dabei eingebauten druckfesten Frac-Kubaturen entstehen zu Lasten des Porenraumes der dazwischenliegenden ursprünglichen Kornmatrix und sorgen auf diese Weise für eine Verdichtung und eine Hohlraumreduzierung (Anlage 42).

Bei Verdichtungsinjektionen wird durch Materialeinbringung in den zu verbessernden Bereich eine Verdichtung in der Umgebung des Injektionspunktes erzwungen, sodass die Steifigkeit des Primärmaterials integral erhöht wird. Bei einer solchen Verdichtungsinjektion wird über ein eingebrachtes Bohrrohr oder Bohrgestänge Injektionsmörtel unter Druck eingepresst. Der Mörtel dringt aufgrund seiner Zusammensetzung und Fließigenschaften hierbei nicht in die Porenräume des vorhandenen Materials ein, sondern verdrängt dieses und bildet eine kugelförmige Kontur aus

(siehe Anlage 43). Nach Abteufen der Bohrung (in der Regel drehend oder drehschlagend) auf Endteufe wird über das Bohrohr nach Montage eines Verpressstutzens Injektionsmörtel verpumpt.

Durch mehrfaches stufenweises Zurückziehen des Rohres mit jeweils erneutem Einpressen von Verfüllgut wird so von unten nach oben bzw. von vorn nach hinten bei horizontalen Verpressinjektionen eine kettenartige Anordnung von Mörtelplomben erzielt, die eine integrale Verdichtung und Steifigkeitserhöhung des Primärmaterials erzeugen.

6.4.3 Verdichtung mittels Befeuchtung

Laut dem Bericht des IfG [U1] ist mit einer Versatzsackung und der Ausbildung eines Firstspaltes im Zuge der Schutzfluideinleitung zu rechnen. Versuche des GSF-Forschungszentrums für Umwelt und Gesundheit GmbH (GSF) [U23] bestätigen diesen Sachverhalt.

Dargestellt sind in Anlage 44 die Porositätsentwicklungen im Salzgrus in Abhängigkeit von der Flutung mit Salzlauge. Im Rahmen der Versuche des GSF wurden 4 mit Salzgrus gefüllte Behälter nach einer Konsolidierungszeit von oben mit Lauge über mehrere Tage geflutet. Infolge der Laugenzugabe kam es zu einer deutlichen Verdichtung des Salzgruses, sodass die Porositäten von im Mittel ca. 45% auf ca. 34% abnahmen.

Dieser Versuch belegt, dass durch eine Flutung des Salzgruses eine deutliche Verdichtung bzw. Sackung des Versatzmaterials hervorgerufen werden kann. Die Umsetzung dieser Maßnahme mit Erfassung des gesamten Salzgruses in einer Kammer würde deren komplette Flutung erfordern. Eine solche Flutung ist aufgrund der Schwebendurchbrüche und Risse in den Pfeilern nicht möglich, da eine Steuerung des Fluidstroms nicht gewährleistet werden kann.

Eine oberflächennahe Berieselung des Salzgruses durch entsprechende Sprinkler, die nicht zu einem unkontrollierten Fluidstrom innerhalb des Grubengebäudes führen würde ergibt aufgrund der deutlich kleineren Fluidmenge jedoch nicht die erforderliche Tiefenwirkung. Die oberen Schichten des Versatzes sind geprägt durch eine harte Kruste, welche bei der Trocknung des mit Laugenzugabe eingebrachten Versatzes im Zuge der Bewetterung der Schachanlage entstanden ist. Diese kann mit geringen Fluidmengen nicht in dem Maße aufgelöst werden, dass hier nennenswerte Setzungen eintreten und somit ein signifikanter Verdichtungseffekt zu erwarten ist.

6.4.4 Auswahl geeigneter Verfahren

Für die Verdichtung des Salzgruses kommen nach Abschluss einer qualitativ hochwertigen Firstspaltverfüllung vor allem Verfahren mit Materialverdrängung in Betracht. Die zuvor aufgeführten statisch-dynamischen Kornumlagerungsverfahren können aufgrund von baubetrieblichen und

sicherheitsdienlichen Erwägungen nicht berücksichtigt werden. Sie benötigen in der Regel ein Widerlager, welches aufgrund des Zustands des Pfeiler-Schweben-Systems nicht in vollem Umfang vorliegt. Darüber hinaus erscheint es nicht sinnvoll, das schon im Grenzzustand der Tragfähigkeit befindliche Tragsystem dynamischen Beanspruchungen auszusetzen.

Anlage 45 zeigt sowohl die ermittelten Körnungslinien des Salzgruses als auch den als wirtschaftlich betrachteten Anwendungsbereich der Poreinjektion. Gemäß der Darstellung ist diese Injektionsart als für diesen Zweck unwirtschaftlich anzusehen. Im Vergleich mit der Verdichtungsinjektion bestehen für diese wirtschaftliche Vorteile, die sich aus einer deutlich größeren, bearbeitbaren Materialbandbreite ergeben. Darüber hinaus sind für Poreinjektionen Feinstbindemittel nötig, die ein Vielfaches des bei Verdichtungsinjektionen verwendeten Mörtels kosten.

Sowohl mit Aufbrechinjektionen als auch mit Verdichtungsinjektionen ist es möglich, den Hohlraumgehalt des Salzgruses zu reduzieren. Allerdings werden bei der Aufbrechinjektion zur Einbringung des Injektionsmaterials in die Struktur des Baugrundes deutlich höhere Drücke benötigt. Zudem ist eine Steuerung der Fracs und damit die gezielte Verdichtung des Gruses aufgrund der vorhandenen Spalten und Risse im Bereich der Kammer- und Pfeilerwände nicht ohne weiteres zu gewährleisten. Demgegenüber ist es mit der Verdichtungsinjektion über systematisch verteilte Verpresspunkte eine integrale Steifigkeitserhöhung in den Abbaukammern weit besser abzuschern. Dies wird durch die mit einem relativ steifen Mörtel erzeugten lagestabilen Plomben sichergestellt, welche das umgebende Material verdichten.

Als Verfahren für die druckhafte Volumenzugabe wird deshalb die Verdichtungsinjektion (Compaction Grouting) vorgesehen.

7 TECHNISCHES KONZEPT ZUR ERHÖHUNG DER VERSATZSTEIFIGKEIT

7.1 Geplante Maßnahmen

Im folgenden Kapitel werden die in Kapitel 6 dargestellten Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit des Salzgruses in den Abbaukammern der Südwestflanke im Detail entwickelt und vorgestellt..

In der ersten Stufe werden die Firstspalte in den Abbaukammern durch eine qualitätsgesicherte Verfüllung geschlossen. Aufbauend darauf erfolgt die Abarbeitung der zweiten Stufe. Durch Verdichtungsinjektionen wird eine Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial in ausgewählten Abbaukammern mit damit einhergehender Steifigkeitserhöhung erzielt.

Neben der Massenermittlung der benötigten Verfüllmengen und dem Zeitplan für die Arbeiten werden Anmerkungen und Anregungen zu den zu planenden Bohrungen und der Güte und Qualitätssicherung der Verfüllarbeiten gemacht. Als Verfüllgut wird der auf der Schachanlage Asse schon im Einsatz befindliche Sorelbeton mit entsprechend angepassten Festigkeitseigenschaften und rheologischen Eigenschaften empfohlen.

7.2 Stufe 1: Qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung

7.2.1 Beschreibung der Maßnahme

Die Verfüllung des Firstspaltes erfolgt 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 Ver-

füllgut 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 (Anlage 46). Wie aus Anlage 9 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.

Die Planung und endgültige Festlegung der einzelnen Ansatzpunkte der Bohrungen für die Versatzleitungen und Entlüftungen sollte in enger Absprache mit der Betriebsleitung der Schachtanlage erfolgen.

Als Kriterium zur Überprüfung des Erfolges der Verfüllmaßnahme dient der Vergleich von eingebrachter Masse zum zuvor bestimmten Firstspaltvolumen. Nur so kann die hohe Qualität der Maßnahme kontrolliert werden. Durch eine visuelle Überprüfung durch nach Beendigung der Verfüllung niedergebrachten Inspektionsbohrungen kann der Erfolg der Gesamtmaßnahme nicht abgeschätzt werden, da lokale Störungen das Ergebnis solcher Erkundigungen stark beeinflussen und so das Ergebnis verfälschen können. Eine Bohrung stellt nur eine Stichprobe dar und erlaubt allein keine Beurteilung des Erfolges.

7.2.2 Massenermittlung und Zeitplan

Zur Vorermittlung der einzubringenden Massen wird ein mittlerer Firstspalt mit $h_F = 0,35$ m angenommen, der gleichmäßig über die Kammergrundfläche verteilt ist. In den Abbaukammern der 725-m-Sohle fand die Verfüllung mit Altversatz Ende der 80iger bis Anfang der 90iger Jahre statt. Diese Bereiche gelten als ausreichend verdichtet, so dass hier eine Verfüllung im Zuge der allgemeinen Verfüllung der Wegstrecken des Grubengebäudes [U34] im Rahmen des Schließungskonzeptes [U29] als ausreichend angesehen wird. Allerdings werden beim Schließungskonzept die Firstspalte unplanmäßig verfüllt, was im vorliegenden Konzept planmäßig vorgesehen ist.

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 (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. Im folgenden werden nur die Kammern betrachtet, welche direkt von den Abbaubegleitstrecken aus erreicht werden können; d. h. die Kammeröffnungen sind noch ohne Räumung der Abbaubegleitstrecken

zugänglich. Die Kammeröffnungen können somit druckfest verschlossen werden und die Bohrungen entsprechend der Anlage 46 niedergebracht werden.

Eine endgültige Festlegung, ob darüber hinausgehend in weiteren Abbaukammern oberhalb der 725-m-Sohle die Firstspalte durch Bohrungen erreicht werden kann, sollte möglichst in weiterer Absprache mit der Betriebsleitung der Schachanlage im Vorfeld der Umsetzung der Maßnahme erfolgen.

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 [U11] ermittelte, einzubringende Volumen bei einer mittleren Firstspalte mit $h_F = 0,35$ m beträgt ca. 40.000 m³ und verteilt sich wie folgt über die Sohlen:

Tabelle 7.1 Auflistung des zu verfüllenden Firstspaltvolumens

| | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Sohle | 658 | 637 | 616 | 595 | 574 | 553 | 532 | 511 |
| Verfüllvolumen m ³ | 1.869 | 1.923 | 1.923 | 6.994 | 6.552 | 6.365 | 6.892 | 6.091 |

Der Transport des als Verfüllgut vorgesehenen Sorelbetons bis zu den Abbaukammern erfolgt in zwei Etappen. Übertage wird in einer Baustoffanlage das Vorprodukt (NaCl + MgO) gemischt und anschließend pneumatisch in das Grubengebäude verbracht. In mobilen Mischern wird das Vorprodukt mit der MgCl₂-Lösung vermischt. Diese Suspension kann über Förderlänge von 150 m noch gut transportiert werden. Die Förderleistung beträgt in dem Fall 20 m³/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 [U30].

Der Zeitbedarf zur Einbringung dieser Massen hängt ab von:

- dem Spaltvolumen,
- der Misch- und Leitungskapazität,
- der Verfüllrate [m³/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 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 [U30]. 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. Diese Änderungen können der Tabelle in Anlage 48 entnommen werden.

Tabelle 7.2 Sohlenbezogene Abschätzung der Netto-Verfüllzeit in [d] für die Firstspalten bei Ansatz einer freien Firstspalte mit $h_F = 35$ cm in Abhängigkeit von der Förderrate und einer Pumpzeit von 16 Stunden

| Förderrate [m ³ /h] | | Reine Verfüllzeit [d] zur Schließung des Firstspaltes von 0,35 m | | |
|--------------------------------|-----|--|-----|-----|
| | | 10 | 15 | 20 |
| Sohle | 658 | 12 | 8 | 6 |
| | 637 | 12 | 8 | 6 |
| | 616 | 18 | 12 | 9 |
| | 595 | 44 | 29 | 22 |
| | 574 | 41 | 27 | 20 |
| | 553 | 40 | 27 | 20 |
| | 532 | 43 | 29 | 22 |
| | 511 | 38 | 25 | 19 |
| Summe | | 248 | 165 | 124 |

Hinzuzurechnen sind die baubegleitenden Arbeiten, wie das Niederbringen der Bohrungen, die Verschlussarbeiten sowie die Wartungsarbeiten an den Gerätschaften und das Umsetzen von Mischern und Rohrleitungen. Vorgesehen ist hierbei, dass die jeweiligen Kammerabschlussarbeiten und die Niederbringung der Bohrungen für die Versatzleitungen und Entlüftungen im Vorlauf der eigentlichen Verfüllung durchgeführt werden können und somit lediglich einen geringen Ein-

fluss auf die Zeitdauer der Gesamtmaßnahme haben. Für die baubegleitenden Arbeiten wird ein zusätzlicher Zeitbedarf von ca. 25 – 30 % abgeschätzt. Insgesamt gesehen ergibt sich somit für die Firstspaltverfüllung der 52 Kammern der Südwestflanke ein mittlerer Zeitbedarf von ca. 1 Jahr.

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

7.2.3 Einschätzung hinsichtlich der Versatzsteifigkeitsentwicklung der Südwestflanke

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. In Anlage 49 sind die entsprechenden Verläufe der Versatzsteifigkeitsentwicklung in Abhängigkeit von den Jahren nach der Verfüllung und der Ausgangsporosität sowie der Stauchungsrate aufgetragen. Die einzelnen Werte sind in der Anlage 50 tabellarisch erfasst.

Grundlage für diese Berechnungen ist die im Kapitel 6.1 aufgeführte Standardkammer. Berücksichtigung findet hierbei ein zusätzlicher Zeitbedarf von 1 Jahr, der das vollständige und vollflächige Anliegen der Firstspaltverfüllung an den Hohlraumversatz sowie an das Pfeiler-Schweben-System berücksichtigen soll, so dass sich die Versatzsteifigkeit integral über die gesamte Kammerbreite von rd. 60 m einstellen kann. Grundsätzlich hängt die zu erzielende Versatzsteifigkeit von der Veränderung des Lastabtragverhaltens des Pfeiler-Schweben-Systems ab. Eine Reduzierung der Deformationen der Pfeiler stellt sich dann ein, wenn der Versatz mit am Lastabtrag beteiligt wird, dies geschieht durch Spannungsumlagerungen weg vom Rand der Baufeldes wieder hin zum Pfeiler-Schweben-System und hier zu den mit Versatz verfüllten Abbaukammern. Das bedeutet, dass das Grubengebäude eine gewisse Zeit benötigt, um durch Spannungsumlagerungen den Versatz mit zum Lastabtrag zu aktivieren.

Deutlich zeigen sich in der grafischen Darstellung (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 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 nach Ansatz aus [U1].

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 gleichbleibender Randbedingungen kontinuierlich an und kann nach 5 Jahren Werte um die 0,3 bis 0,4 MPa erreichen.

Durch die Aktivierung der Versatzsteifigkeit wird, wie im Kapitel 6.1 ausgeführt, auch die seitliche Stützung der Pfeiler vergrößert. Aufgrund der verbesserten Pfeilereinspannung können diese somit mehr zum Lastabtrag beitragen. Dieser Zusammenhang gilt auch im Entfestigungsbereich, wie in Anlage 27 dargestellt ist.

Somit erfolgt durch den kraftschlüssigen Verbund neben der Aktivierung der Versatzsteifigkeit auch eine verbesserte Einspannung der Pfeiler und hierdurch insgesamt ein nennenswerter Beitrag zur Stabilisierung der Südwestflanke und damit verbunden zur Reduzierung der Pfeilerstauungsraten.

7.2.4 Anmerkungen zur Umsetzung der Maßnahme

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 einzubringenden Sorelbeton deutlich verringert.

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.

Die hier dargestellte Maßnahme bietet zudem die Möglichkeit der Nachverpressung zur Sicherstellung des weitestgehenden vollflächigen Anschlusses des Sorelbetons an die Kammerfirste. Damit können möglicherweise auftretende Sackungen des Versatzes ausgeglichen werden.

Der zeitliche Aufwand für die vorgestellte Verfüllung der Firstspalte ist maßgeblich abhängig von der reinen Verfüllzeit und dementsprechend von der Förderrate des Verfüllgutes und der Pumpzeit, also der Zeit, in welcher das Verfüllgut in die Hohlräume eingebracht werden kann. Um einen reibungslosen Verlauf der Maßnahme sicherzustellen, ist zu empfehlen eine geeignete Zeit- und Ablaufplanung in Abstimmung mit der Betriebsführung der Asse zu erarbeiten. Dies gilt in gleichem Maße für die vorlaufenden Arbeiten der Kammerverschlüsse und Bohrarbeiten wie für die eigentliche Verfüllmaßnahme.

Die im Salzgestein niederzubringenden Bohrungen sind nach Aussage der Verantwortlichen der Asse [U32] ohne Schwierigkeiten mit dem Asse eigenem Personal und Gerät durchzuführen. Das gleiche gilt für die Arbeiten der reinen Verfüllung und Verschlussarbeiten.

Zur Sicherstellung der angestrebten hochwertigen und vollflächigen Verfüllung der Firstspalten 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 selbststeuernden Fahrwagen sowie der Minimierung der erforderlichen Scanner möglich geworden. Erfolgreiche Beispiele zur untertägigen Aufnahme von Hohlräumen in Bergwerken können z. B. [U33] entnommen werden.

Die Scanner für solche Aufnahmen (z. B. Hokuyo Automatic) weisen Gerätehöhen von $H = 80$ mm und kleiner auf. Mit solchen Scannern kann ein Bereich mit einem Durchmesser von bis zu 32 m mit einer Genauigkeit von ± 30 mm vermessen werden. Darüber hinaus bietet z. B. das I-AIS, Stankt Augustin eine ganze Reihe von fahrbaren Robotern an, die mit der benötigten Lasertechnik bestückt werden können. Diese unter dem Namen volksbot [U32] kommerziell vertriebenen Messwagen sind speziell für unebenes Gelände konzipiert worden, wie z. B. für den Einsatz bei Rettungsmaßnahmen in durch Erdbeben zerstörten Gebieten. Nähere Einzelheiten können dem Internet unter <http://www.iais.fraunhofer.de/> entnommen werden.

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.

Die hier aufgezeigte Aktivierung der Versatzsteifigkeit sowie die Erhöhung der Einspannung der Pfeiler und die dadurch erreichte signifikante Mittragwirkung des Versatzes kann nur durch eine hohe Qualität der Verfüllung der Firstspalten erreicht werden. Hierfür ist eine möglichst vollflächige Verfüllung und Firstanbindung sicherzustellen. Die Gewährleistung der geforderten Qualität der Hohlraumverfüllung sollte und kann nur durch eine fachtechnische Steuerung, Überwachung und Dokumentation in Form einer fachgutachterlichen Begleitung erbracht werden.

7.3 Stufe 2: Aktivierung der Versatzsteifigkeit durch Verdichtungsinjektionen

7.3.1 Beschreibung der Maßnahme

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 (Anlage 24).

Die im Kapitel 6.2 aufgeführten numerischen Berechnungen zeigen auf, dass zur Erzielung einer signifikanten Beeinflussung 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. Hier treten sowohl die größten Pfeilerstauchungsraten als auch hohe Spannungswerte auf (siehe Kapitel 4).

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.

Die Varianten 2 bis 5 liegen bezogen auf die mit Verdichtungsinjektion zu bearbeitenden Kammern innerhalb der Bandbreite der Varianten 1 und 6 (Anlage 57).

Im Hinblick auf den zeitlichen Aspekt wird 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.

7.3.2 Massenermittlung und Zeitplan

Die Wirkungsweise der vorgesehenen Maßnahmen beruht auf der Verdichtung des anstehenden Salzgruses durch den Verpressmörtel, wodurch es zu einer Verringerung der Porosität und somit zu einer Erhöhung der Versatzsteifigkeit kommt. In Anlage 58 ist dieser Sachverhalt ausgehend von den bislang betrachteten 4 unterschiedlichen Ausgangsporositäten ($n = 38, 42, 45$ und 48%) dargestellt. Die Betrachtung der Porositäten zwischen $n = 38$ und 48% beruht auf Ergebnissen von unterschiedlichen Untersuchungen an verschiedenen Stellen in den Kammern und deckt so-

mit 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 Ermittlung der benötigten Verfüllvolumen wird in einem ersten Schritt das Ausgangsvolumen jeder Kammer zum Zeitpunkt der Injektionsmaßnahme abgeschätzt. Hierfür wird ausgehend vom zu Beginn der Auffüllung marktscheiderisch bestimmten Kammervolumen die Konvergenz seit dieser Zeit und die vor der Injektionsmaßnahme durchzuführende Firstspaltverfüllung berücksichtigt. Die Konvergenz wirkt hierbei einachsig in querschlägiger Richtung zur Kammer und über die gesamte Kammerlängswand gleichverteilt. In Anlage 59 sind für alle 20 Kammern die so ermittelten Anfangsvolumen angegeben. Eine Querdehnung der Pfeiler sowie eine Wölbung der Kammersohlen oder –firste werden hierbei nicht berücksichtigt.

Ausgehend von dieser Berechnung und dem der Darstellung in Anlage 58 zugrunde liegenden analytischen Ansatz (Gleichung 6.3) kann das zur Erzielung der gewünschten integralen Steifigkeitserhöhung benötigte Zugabevolumen auf das zu behandelnde Volumen gemäß Anlage 59 bestimmt werden. 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 $p_v = 0,5 \text{ MPa}$ 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 $0,5 \text{ MPa}$ 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 $p_v = 0,5 \text{ MPa}$ ca. 5.000 m^3 Material zu injizieren, was rd. 15% des Gesamtvolumens und ca. $1/3$ des Porenvolumens der Standardkammer entspricht.

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 Pumpenanzahl, Verpressrate usw.. Auch die Anzahl der Verpresspunkte bzw. die Anzahl an Verpressrohre ist von maßgebender Bedeutung.

Entscheidend für die notwendige Anzahl der einzelnen Verpresspunkte und die somit benötigte Zeit für die Verpressarbeiten ist die Ausbildung ausreichend großer Mörtelplomben. Damit stehen die folgenden Zeitangaben unter dem Vorbehalt der Ergebnisse der in Kapitel 8 konzipierten Vorversuche. Angesetzt wird für die weiteren Abschätzungen, dass mit den Verdichtungsinjektionen und mit dem zur Verfügung stehenden Sorelbeton bei Ausgangsporositäten von 39 bis 42% Mörtelplomben bis zu einem Durchmesser von ca. 70 cm und bei Ausgangsporositäten von 45 bis 48% Mörtelplomben bis zu einem Durchmesser von ca. 80 cm erzeugt werden können.

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 Salgruses von $p_v = 0,5 \text{ MPa}$ und einer Ausgangsporosität von 42% muss gemäß Anlage 58 eine mittlere Reduzierung des Porenanteils von 4,3% erreicht werden. Die nachfolgend angegebenen Bearbeitungszeiten für die Verdichtungsinjektionen basieren auf den in Tabelle 7.3 aufgeführten Parametern. Angaben für die 3 weiteren betrachteten Ausgangsporositäten (39, 45 und 48%) sind in Anlage 62 tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 7.3 Angesetzter Zeitbedarf für einzelne Positionen bei der Verdichtungsinjektion

| Zeitbedarf je Bohrung/Verpressung | | |
|-----------------------------------|-----------|------|
| Einrichten Bohrgerät | [min] | 45,0 |
| Bohrung für Verpressrohr | [m/min] | 0,25 |
| Verpressrate | [l/min] | 50,0 |
| Ziehzeit je Verpresspunkt | [min/Hub] | 3,00 |
| Abbau, Nebenzeiten, Pausen | [min] | 60,0 |

Die Abschätzung des zeitlichen Ablaufes erfasst neben den reinen Zeiten für die Verfüllmaßnahme auch die Zeiten für die Bohrungen und deren Einrichtung. Das Abteufen einer Bohrung wird mit einem Wert von 0,25 m/min angenommen. Dieser Ansatz ist ebenso wie die weiteren Zeiten durch einen vorlaufenden in-situ Versuch zu überprüfen.

Für die favorisierte Variante 6 werden bei Ansatz einer 16stündigen täglichen Arbeitszeit und bei 2 parallel arbeitenden Bohr- und Verpresseinheiten ca. 160 Arbeitstage benötigt. 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.

7.3.3 Anmerkungen zum Bohrkonzzept

Funktionales Ziel der Bohrungen ist es, geeignete Verpressrohre schnell und direkt von den Bohrkavernen aus in die Kammern rückholbar einzubringen. Für diesen Zweck ergeben sich u. a. folgende Anforderungen:

- Durchmesser des für die Injektion eingebauten Rohres ca. 3 bis 4 Zoll
- zwischen Rohr und dem umgebenden Salzgrus ist nach Einbau kein Ringspalt vorhanden
- das Rohr ist über eine geeignete Vorrichtung abschnittsweise zu ziehen
- über das Rohr sind die Verpressarbeiten ausführbar

Darüber hinaus ergeben sich aus dem Bohrbereich/der Bohrumgebung folgende Anforderungen:

- Durchbohren von sowohl festem Salzgebirge wie auch locker gelagertem Salzgrus
- Beherrschung des Wechsels Salzgrus/Blocksalz bzw. Salzgrus/Schwebenreste
- Beherrschung des Bohrgutes (Staubvermeidung, Staubabscheidung)
- Möglichkeiten zur Fassung und zum hydraulischen Rückziehen des Injektionsrohres

Aufgrund der Durchführung der Arbeiten im Grubengebäude sind zudem verschiedene Randbedingungen zu beachten, wie etwa

- die Logistik, einschl. Energieversorgung,
- chemische Einflüsse sowie
- Luftfeuchtigkeit und Temperatur

Grundsätzlich kommen für die Arbeiten drehende Bohrverfahren, mit oder ohne Verrohung, oder dreh Schlagende Bohrverfahren infrage.

Von Seiten der Fachfirmen sind weiterhin folgende Fragestellungen zu klären:

- Rückziehen/Rückbau des Injektionsrohres mit dem Bohrgerät
- Rückziehen/Rückbau des Injektionsrohres mit gesonderten Gerät
- Spülbedarf für die Bohrungen / Injektionsrohre / Behandlung der Spülung bzw. Spülungsreste
- Bohrgeschwindigkeiten

Eine grundsätzliche Erwägung ist, die Durchbohrung des festen Salzes von der Weiterbohrung im Salzgrus verfahrenstechnisch und gerätetechnisch abzukoppeln. Hierdurch kann ggf. eine Optimierung der Abläufe hinsichtlich des Geräteeinsatzes und der Bohrzeiten erreicht werden.

Aus der Vielzahl an zur Verfügung stehenden Bohrverfahren wurden in der Diskussion mit entsprechenden Fachfirmen das Drehbohren mit Imlochhammer und das Überlagerungsdrehbohrverfahren als mögliche Verfahren für die durchzuführenden Bohrungen im Salzgrus benannt.

Beim Verfahren mit dem Imlochhammer schlägt ein mit Druckluft beschleunigter Kolben in kurzen Abständen auf eine über die gesamte Fläche mit Hartmetall bestückte, sich drehende Bohrkronen. Der Besatz der Bohrkronen zertrümmert dabei das Bohrgut. Das Bohrgut wird von der Bohrlochssole durch den Ringraum zwischen Gestänge und Bohrlochwand oder Verrohrung mit Druckluft nach oben gefördert. Nachteilig bei diesem Verfahren ist der starke Staubaustritt aus dem Bohrloch. Mit Hilfe indirekter Spülbohrverfahren ähnlich dem Lufthebeverfahren wird dem entgegen gewirkt.

Beim Überlagerungsdrehbohrverfahren werden eine Verrohrung und das innenlaufende Bohrgestänge durch zwei unabhängige Drehantriebe betrieben und gegenläufig voneinander gedreht.

Aus den Befragungen der verschiedenen Spezialbohrfirmen mit einschlägiger Bohrerfahrung im Salinar bleibt festzuhalten, dass keine der angefragten Schachtbau- bzw. Spezialtiefbauunternehmen über Erfahrungen mit Bohrungen im Salzgrus verfügt. Entsprechend ist zu empfehlen die von den Fachfirmen vorgeschlagenen und vorausgewählten Verfahren zunächst fachtechnisch auf Plausibilität und bei Erfolgsaussicht schließlich im Rahmen des Untersuchungsprogramms nach Kapitel 8 vorab zu überprüfen.

Erwähnt, aber nicht weiter ausgeführt werden soll an dieser Stelle die Möglichkeit die Bohr- und Injektionsmaßnahme in Anlehnung an den sogenannten 'Top to Bottom' – Ansatz [U31] durchzuführen. Der Einpressvorgang ist in diesem Fall dem Bohrvorgang vorgeschaltet. Der Bohr- und Injektionsfortschritt erfolgt hierbei in die gleiche Richtung. Somit wird zur Erreichung der nächsten Injektionsstufe der vorher injizierte Körper durchbohrt. In Abhängigkeit von den Eigenschaften des Injektionskörpers kann so ein sicherer Bohrfortschritt erreicht werden. Diesem stehen jedoch größere Aufwendungen und damit verbunden ein vor allem deutlich größerer Zeitbedarf bei der technischen Durchführung entgegen.

7.3.4 Anmerkungen zum Bohrraster

Für die Vorplanung des Bohrrasters wird angenommen, dass im unteren Bereich der Abbaukammern eine Schicht mit einer Dicke von ca. 3 m durch das Eigengewicht schon soweit verdichtet ist, dass hier keine weitere Verdichtung mehr vorgesehen werden muss bzw. eine Verdichtungsinjektion nur in geringem Maße gelingt und keinen angemessenen Beitrag zur Erhöhung der Gesamtsteifigkeit des Versatzmaterials in der Kammer leistet. Dies vorausgesetzt, wird vorgesehen, die Abbaukammern aus 2 Ebenen im oberen Bereich entsprechend den Prinzipskizzen in Anlage 63 (Variante a) oder über eine dreidimensionale ausgefächerte Anordnung (Anlage 63, Variante b) für die Injektionsarbeiten zu beaufschlagen. Die beiden Varianten unterscheiden sich hierbei in ihrer Anordnung der Verpressrohre über die Kammerhöhe. So wird bei der Variante a

die Kammer über 2 übereinanderliegende Injektionsebenen behandelt (siehe Anlage 63). Im anderen Fall b erfolgt die Injektionskampagne über geneigt eingebrachte Verpressrohre.

Mit beiden Varianten wird der Bereich zwischen Kammerdecke und der unten liegenden, bereits durch Eigengewichtswirkungen verdichteten Zone erfasst und über die Injektionen miteinander verspannt und verdichtet. Beide Ansätze führen zu der gewünschten integralen Versatzsteifigkeitserhöhung, da sie den gesamten Verfüllraum der Abbaukammer erfassen und den Salzgrus verdichten. Welche Anordnung schlussendlich gewählt wird, hängt von den örtlichen Möglichkeiten und Bedingungen wie auch von den in-situ zu erreichenden Verdichtungskörpern ab.

Die Bohransatzpunkte können - zusammengefasst in Gruppen - ausgehend von den Abbaubegleitstrecken und/oder der Wendelstrecke in gesondert aufzufahrenden Bohrkavernen liegen. Diese Kavernen können nach Abschluss der Arbeiten mit Sorelbeton und/oder Salz sicher verschlossen werden. Aus dieser Konzentration der Bohransatzpunkte ergibt sich das notwendige Ausfächern der Bohrungen (Anlage 64). Die Abstände der Verpressrohre untereinander sind dadurch über die Länge unterschiedlich, was bei der Festlegung der planmäßigen Verpressmenge je Punkt – in noch festzulegenden Grenzen – berücksichtigt werden muss.

Als Alternative zu den aufgefächerten Bohrungen ist in Anlage 65 der Grundriss für eine gleichmäßige Aufteilung der Bohransatzpunkte über die Kammerwand dargestellt. Hierdurch ergeben sich feste Abstände zwischen den Verpressrohren, sodass die Verpressmenge an jedem Punkt gleich groß sein kann. Eine solche Anordnung benötigt den freien Zugang zur gesamten Kammerbreite. Es ist aber auch denkbar die Bohransatzpunkte abschnittsweise ohne Ausbildung einer Auffächerung zu konzentrieren.

Eine endgültige Festlegung der Bohransatzpunkte und somit auch der Bohrlängen kann erst nach Auswertung der in Kapitel 8 beschriebenen Untersuchungen und nach Rücksprache mit den ausführenden Fachfirmen zur Bohrtechnik sowie zu den örtlichen Randbedingungen mit der Betriebsleitung erfolgen.

7.3.5 Anmerkungen zur Umsetzung der Maßnahme

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.

Hierfür ist in Abhängigkeit vom gewählten Bohrverfahren und der einzubauenden Verpressmenge je Verpresspunkt eine für die Aufgabe hinreichende Verteilung der Einzelverpresspunkte und damit auch der Verpressrohre (siehe z. B. Anlage 65) festzulegen. Diese Anordnung muss in Abstimmung mit den Ergebnissen des in Kapitel 8 beschriebenen Untersuchungsprogrammes erfolgen. Hiervon abhängig ist auch der genaue Zeitplan der Durchführung und somit die Angabe der Gesamtzeitdauer für die Maßnahme.

Grundsätzlich bieten Injektionsmaßnahmen die Möglichkeit der Nachverpressung, so dass in Abhängigkeit des gemessenen Deformationsverhaltens über nachträgliche Injektionen Einfluss auf das weitere Verschiebungsverhalten genommen werden kann. In dem vorliegenden Fall könnte die Versatzsteifigkeit nachträglich somit unter Umständen weiter erhöht werden.

Die zuvor angeführten Massen und Zeiten dienen als Orientierung für eine erste Aufwands- und Zeitabschätzung der Maßnahme. Deutlich wird hierbei, dass die einzuplanenden Zeiten maßgeblich von der angestrebten Versatzsteifigkeit und der Anzahl der zu verstärkenden Kammern abhängen.

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.

Im Rahmen einer fachgutachterlichen Betreuung sind die Arbeiten zur Hohlraumreduzierung mittels Verdichtungsinjektionen kontinuierlich zu überwachen und ggf. zu optimieren. Die anfallenden Daten sind permanent zu dokumentieren und hinsichtlich der erforderlichen weitergehenden Arbeiten technisch zu bewerten. Die nachfolgend aufgeführten Punkte sind Teil der im Rahmen des noch zu planenden Qualitätssicherungsprogramms durch von der Fachbauleitung zu erbringenden Leistungen:

- Festlegung von Bohransatzpunkten, Bohrlängen und -richtungen
- Festlegung der Injektionsparameter hinsichtlich Mengen, Einpressraten und maximalen Drücken für die einzelnen Ansatzpunkte in Abstimmung mit der ausführenden Firma
- Anpassungen der Injektionsparameter oder des maßgebenden Bereichs bei erkannten lokalen Besonderheiten
- Überprüfung des Verfüll- und Verpresserfolges
- Baubegleitende Kontrolle der Verfüll- und Verpressleistungen sowie der Materialmengen und der beaufschlagten Horizonte
- Kontrolle der Arbeitsprotokolle (Injektionsprotokolle), Tagesberichte, Hindernisanzeigen und Ermittlung der täglichen Geräteleistung

7.4 Verfüllgut

Zwingende Anforderungen an das Verfüllgut sind sowohl die Beständigkeit gegen NaCl-Lauge als auch die Langzeitbeständigkeit gegenüber dem Schutzfluid (Magnesiumchloridlösung $MgCl_2$) [U29]. Darüber hinaus soll das Material in seiner Grundrezeptur aus baubetrieblichen Gründen in beiden Fällen, also sowohl für die Verfüllung der Firstspalte als auch für die Verdichtungsinjektionen verwendet werden können.

Als dem Grunde nach geeignet und ausreichend erprobt kann der auf der Schachtanlage zum Bau der Strömungsbarrieren verwendete Sorelbeton angesehen werden. Dieser wurde vom GSF in Zusammenarbeit mit K-UTECH, Sondershausen speziell für die Situation im Grubengebäude mit anschließender Flutung durch eine $MgCl_2$ -Lösung entwickelt und weist alle für die für Verfüllung und Langzeitstabilität benötigten Eigenschaften auf [U25] und [U30].

Der Sorelbeton in seiner derzeitigen Rezeptur soll für den Bau der Strömungsbarrieren und für die Verfüllung der Abbaubegleitstrecken eingesetzt werden. Er weist folgende Grundrezeptur auf:

Tabelle 7.4 Grundrezeptur Sorelbeton A1 [U25]

| Komponente | Spez. Dichte [g/cm ³] | Standard A1 [Ma%] | kg/m ³ |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
| MgCl ₂ -Lösung | 1,3235 (35 °C) | 25,0 | 485 |
| NaCl | 2,17 | 63,7 | 1237 |
| MgO | 3,45 | 11,3 | 218 |
| Summe Basismaterial | | | 218 |
| Summe Vorprodukt | | | 1455 |
| Summe Fertigprodukt | | | 1940 |

Die Körnungslinie des Vorprodukts (MgO plus NaCl) mit einem Größtkorn von 400 µm (= 0,4 mm) ist in Anlage 66 dargestellt. Beim verwendeten Salz handelt es sich um Fremdsalz, welches auf der Schachtanlage Asse in einer Brecheranlage auf die gewünschte Körnungslinie gebrochen wird.

Die beim Abbinden des Betons gemessenen Temperaturen bewegen sich in einem Bereich von 80 bis 87 °C, teilweise sind aber auch deutlich höhere Werte bis ca. 100 °C gemessen worden [U25].

Das Setzfließmaß des Betons liegt im Bereich von 508 mm, wobei je nach Menge an Anmachflüssigkeit ($MgCl_2$ -Lösung) auch Fließmaße von 700 mm und darüber hinaus möglich sind. Laut Qualitätsstandard darf die Anmachflüssigkeit auf 600 kg/m³ gesteigert werden, um die Fließigenschaften des Betons zu verbessern [U30].

Nach ersten Vorgesprächen kann die Konsistenz des Materials sowie dessen Festigkeitseigenschaften den jeweiligen Anforderungen aus Verfüll- bzw. Verpresstechnik, Leitungssystemen und Endfestigkeit angepasst werden. Für die Verdichtungsinjektionen sind eher steifere Konsistenzen erforderlich (Setzfließmaße < 250 mm) bei flüssiger Konsistenz würde das Material im Salzgrus verlaufen und so keine für das Verfahren typische kugelförmige Konturen ausbilden.

Der Sorelbeton soll möglichst keine Überschusslösung an den umgebenden Salzgrus abgeben. Die Feuchtigkeit würde zum Schwinden des Gruses führen und so den kraftschlüssigen Verbund aufheben.

All diese Anforderungen können nach Auskunft der Fachleute der Asse [U30] durch entsprechende Einstellungen in der Rezeptur abgedeckt werden.

Zur Sicherstellung der geforderten Qualität und zur Überprüfung der Materialeigenschaften sollten die Einwirkungen des Sorelbetons auf den Salzgrus durch Laborversuche nachgewiesen werden. Darüber hinaus sind durch entsprechende Eignungsprüfungen die für die Verfüllmaßnahme und für die Verpressmaßnahme benötigten rheologischen Eigenschaften sowie die Festigkeitseigenschaften zu überprüfen und zu belegen.

Darauf aufbauend kann durch Versuche im Maßstab 1:1 die Rezeptur für die Verdichtungsinjektionen optimiert werden. Gleichzeitig dienen die Versuche zur Validierung der Ansätze. Ein entsprechendes Voruntersuchungsprogramm wird in Kapitel 8 beschrieben. In Rahmen dieser Vorversuche ist auch die planmäßige Kontur der Verpresskörper im Salzgrus durch Freilegung zu überprüfen.

8 VORUNTERSUCHUNGEN

Beim Einsatz von Injektionstechniken für Volumenersatz- und Verdichtungszwecke wird in der Regel eine Probeinjektion ausgeführt. Auch die entsprechende DIN EN 12715 führt aus, dass die Planung, wann immer nur möglich, durch Injektionsversuche im Baugrund überprüft und ggf. angepasst werden sollte. 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 sind verfahrenstechnische Details abzusichern bzw. zu justieren.

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

- Abschnitt 1 Verifizierung der 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 zugrundeliegenden Annahmen und der zuvor gewonnen 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 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.

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.

8.1 Abschnitt 1 - Wechselwirkung Injektionsgut – Salzgrus

Im Rahmen dieses Abschnittes 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 Wasserbindevermögens 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 Asse 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.

Der Versuch beginnt mit dem Einbau des ersten Verpressrohres auf Endteufe und der anschließenden Beaufschlagung mit dem Verpressmörtel. Je nach Einbautiefe werden oberhalb dieser Verpresspunkte weitere Verpresspunkte durch abschnittsweises Ziehen des Verpressrohres und jeweils anschließender Verpressung ausgeführt. In der Grundfläche des Versuchsbereichs werden dann im Zuge weiterer Verpressrohre/Verpresspunkte maßgebliche Injektionsparameter getestet und optimiert.

Im Hinblick auf eine optimale Wirksamkeit sind folgende Parameter zu variieren und festzulegen:

- der Einpressdruck,
- die Verpressrate (Verpressgeschwindigkeit)
- die Abstände der Verpressrohre
- die Abstände der Verpresspunkte in Rohrachse

Darüber hinaus wird die Grundrezeptur des Sorelbetons hinsichtlich ihrer Konsistenz optimiert. Der Versuch wird abgeschlossen mit der Freilegung der Verpressbereiche, der Beurteilung der eingebauten Verpresskubaturen und deren Verdichtungswirkung auf den umgebenden Salzgrus und deren Bewertung.

Der detaillierte Versuchsablauf ist vor Beginn der Tests unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen - in Abstimmung mit dem Betriebspersonal - und der Ergebnisse der Laboruntersuchungen festzulegen.

Eine prinzipielle Versuchsanordnung (Vorentwurf) ist in Anlage 67 angegeben. Gewählt wurde hierfür die Abbaukammer 9b. Sie dient zur Zeit vorwiegend zur Bunkerung des Fremdsalzes und könnte für die geplanten Untersuchungen freigehalten werden. Im Versuchsfeld A der Abbaukammer 9b werden die Auswirkungen einzelner Parameter auf das Injektionsergebnis überprüft. Betrachtet werden hier die Verpressrohrabstände 2 und 3 m. Auf der Rohrachse variieren die Abstände der Verpresspunkte zwischen 1 und 2 m. Die Variation der Verpressrate erfolgt in Abhängigkeit des Einpressdruckes zwischen 30 bis 60 l/min. Abhängig von den beobachteten Drücken werden ggf. die Verpressmengen je Punkt angepasst.

Da eine Kombination aller variablen Parameter weder möglich noch sinnvoll ist, wird eine unmittelbare Versuchsauswertung vor Ort vorgesehen und im Zuge der Feinplanung eine entsprechende Versuchsmatrix erstellt und dann unter Berücksichtigung von Zwischenergebnissen abgearbeitet.

Im Feld B bleibt die Anordnung der Verpressrohre und -punkte derzeit noch frei, sie wird auf Grundlage der bis dahin erhaltenen Ergebnisse festgelegt und soll der für die Hauptaufgabe letztendlich gewählten Anordnung möglichst nahe kommen. Die Größe der Kammer lässt Versuchsergänzungen bei entsprechendem Bedarf jederzeit zu.

Das Untersuchungsprogramm erfordert die aktive Mitarbeit des Betriebspersonals der Schachtanlage Asse – insbesondere im Hinblick auf Logistik, Randbedingungen und die vorliegenden Erkenntnisse und Erfahrungen mit dem Sorelbeton.

Die fachtechnische Steuerung, Überwachung, Dokumentation und Auswertung der einzelnen Abschnitte des Versuchsprogramms, einschließlich der Durchführung der Laboruntersuchungen und der abzuleitenden Empfehlungen für die Hauptaufgabe sollte mit Blick auf die gesamtheitliche Zielsetzung einem Fachgutachter, ggf. in Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal, übertragen werden.

Es bleibt zu prüfen, ob die Ausstattung und die Erfahrungen des Betriebspersonals der Schachtanlage Asse es erlauben ggf., die eigentlichen Arbeiten dieses Abschnittes 1, wie das Einbringen der Injektionslanzen, die Durchführung der Injektionen und das Freilegen der Injektionskörper ohne Fremdfirmen durchzuführen.

8.2 Abschnitt 2 - Überprüfung der Bohrtechnik und Gerätschaften

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 werden, könnte dieser Versuch ggf. auch von 2 Firmen durchgeführt werden. Nachzeitigem Kenntnisstand kommen hierfür z. B. Überlagerungsbohrungen und das Drehbohren mit Imlochhammer infrage.

Die Bohrungen erfolgen von Bohrkavernen in den Abbaubegleitstrecken bzw. von der Wendelstrecke aus jeweils in die betreffende Kammer. Um im anschließenden Abschnitt 3 den Einfluss der Verdichtung durch die Injektionskörper untersuchen zu können, sollen die Bohrungen in Anlehnung an das in Anlage 62 schematisch dargestellte Bohrraster erfolgen. Einzelheiten zum Ablauf der Untersuchungen und zur Anordnung der Bohrungen werden vor Versuchsbeginn abhängig von den Vorschlägen der anbietenden Fachfirmen und in Abstimmung mit der Schachtanlage festgelegt.

Neben dem Bohrverfahren ist die Ziehtechnik für die Verpressrohre und die Staubminimierung bei der Bohrung Gegenstand der Untersuchungen dieses Abschnitts. Die Verpressrohre werden dazu nach erfolgreicher Erprobung der Bohrtechnik in der Einbauposition belassen und stehen zusammen mit der Bohr-/Ziehvorrichtung für Abschnitt 3 zur Verfügung.

Für die Ausgestaltung der Ausschreibung und die Steuerung, Überwachung und auftraggeberseitige Auswertung der Leistungen der Fremdfirmen gelten die gleichen Empfehlungen wie zu den betreffenden fachgutachterlichen Leistungen des Abschnittes 1. Eine enge Zusammenarbeit mit dem Betriebspersonal der Schachtanlage Asse ist auch hier unerlässlich.

8.3 Abschnitt 3 - Überprüfung der Misch- und Verpressabläufe

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 Schachanlage erbracht werden.

Aufgrund der in diesem Abschnitt letztendlich nachzuweisenden Verfahrenseignung für den vorgesehenen Zweck ist die unmittelbare Mitarbeit des Fachgutachters mit online-Auswertung und Weisungs- und Steuerungsbefugnis der Versuchsabläufe, sowie Erstellung einer Dokumentation und Auswertung, hinsichtlich Wirksamkeit und Qualitätssicherung von zentraler Bedeutung.

Im Rahmen des betreffenden Abschlussberichtes werden alle Parameter, Verfahrensabläufe Qualitätskontrollen, die Dokumentation und in Zusammenarbeit mit dem Markscheider die zugehörigen Beobachtungen des Grubengebäudes im Einflussbereich der Verpressungen für die Hauptaufgabe festgelegt.

8.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend wird festgestellt, dass mit dem vorgestellten, zeitlich eng gefassten Untersuchungsprogramm (geschätzte Dauer ca. ¾ Jahr), 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 dargestellt.

Die Firstspaltverfüllung kann unabhängig hiervon bereits vorbereitet und begonnen werden.

Das Programm berücksichtigt neben der Festlegung der Grundrezeptur des Verfüllgutes die Erprobung und Beurteilung der Wechselwirkungen Injektionsmörtel/Salzgrus sowie die vorzusehen-

den Injektionsparameter wie Verpressrate und Verpresspunktabstände. Die Entwicklung eines Bohrverfahrens für den Salzgrus und die Überprüfung der Misch- und Verpressabläufe sind ebenso Bestandteil der Untersuchung.

Notwendige oder angezeigte Verfahrensanpassungen werden mit Blick auf die Zielstellung durch die fachgutachterliche Steuerung und unmittelbare Auswertung und Dokumentation ebenso abgesichert wie die unmittelbare Entwicklung von Qualitätsstandards und –nachweisen für die Hauptaufgabe.

Alle Versuchsabschnitte sollten in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit den Verantwortlichen der SchachanlageASSE geplant und durchgeführt werden.

9 KOSTENABSCHÄTZUNG

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 für die hier dokumentierte Kostenschätzung in unserem Hause entworfenen und genutzten Berechnungen sind hinterlegt und können im Rahmen weiterer Gespräche mit dem Betreiber der Schachanlage und nach weiterer Präzisierung der Maßnahme sowie nach dem Vorversuch fortgeschrieben werden.

9.1 Firstspaltverfüllung

Die Arbeiten zur Verfüllung der Firstspalten bestehen aus

- dem digitalen Aufmaß der Hohlräume in den Kammern,
- dem druckfesten Verschluss der Kammeröffnungen,
- der Bereitstellung der Infrastruktur (Förderleitungen, Mischanlage, Pumpen, Molche, etc.)
- der eigentlichen Verfüllung der Firstspalte und
- der Qualitätssicherung

Die im Kapitel 7.3 aufgeführten Arbeiten können, bei Verfügbarkeit von Personal und einer dem Vorkenntnisstand angepassten Einweisung, durch die Asse selbst durchgeführt werden.

Im Wesentlichen ist der Kostenrahmen für diese Maßnahme abhängig von der zur Verfügung stehenden arbeitstäglichen Pumpenzeit und der Pumpenleistung. Diese wiederum wird bestimmt von der kontinuierlichen Verfügbarkeit des Sorelbetons, was wiederum angemessen dimensionierte Misch- und Förderanlagen voraussetzt. Ein Großteil der benötigten Gerätschaften, wie etwa die Mischanlage und Leitungssysteme zum Transport des Sorelbetons; sowie das Material selber sind auf der Anlage vorhanden und zum Teil schon im Rahmen des bestehenden Schließungskonzeptes kostenmäßig erfasst.

Aufgrund der sinnvollerweise anzusetzenden zumindest, teilweisen Nutzung der vorhandenen Einrichtungen und von Personal der Schachanlage kann eine genaue Kostenermittlung nur in enger Abstimmung mit den Betreibern der Asse erfolgen. Dementsprechend wird empfohlen nach gemeinsamer Erörterung eines möglichen Bauablaufes und der Schnittstellen zu der/den Fremd-

firmen eine Kostenschätzung für die Maßnahme gemeinsam mit den Verantwortlichen der SchachanlageASSE vorzunehmen.

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 hierin 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.

9.2 Voruntersuchungen

Zur Überprüfung der Durchführbarkeit der Hohlraumreduzierung durch Verdichtungsinjektionen sind sowohl Laborversuche als auch Voruntersuchungen im Großmaßstab unter Tage erforderlich.

Für die Arbeiten des betreffenden Abschnittes 1 (vgl. Kapitel 8.1) wurde angeregt, die nötigen Arbeiten unter Tage und – bei Verfügbarkeit der entsprechenden Gerätschaften und ausreichendem Personal - durch die Schachanlage durchzuführen zu lassen. Dementsprechend empfiehlt es sich die Kostenabschätzung gemeinsam mit den Betreibern der SchachanlageASSE nach Erörterung der einzelnen zu erbringenden Leistungen nochmals abzustimmen.

Die beiden darauf aufbauenden Abschnitte 2 und 3 (vgl. Kapitel 8.2 und 8.3) zur Überprüfung der Bohrtechnik und der Misch- und Verpressabläufe enthalten sowohl Leistungen von Fremdfirmen wie auch mögliche Eigenleistungen der Schachanlage. Vorgesehen sind u. a. folgende von der Schachanlage zu erbringende Leistungen:

- Gestellung, Vorhaltung und Betrieb der benötigten Einrichtungen
- Bereitstellung und Unterhaltung sowie den Betrieb von Misch- und Fördereinrichtungen
- Gestellung, Einrichtung und Betrieb von messtechnischen Einrichtungen
- Aufbau, Unterhaltung und Betrieb der elektrischen Versorgung

Die Geräte zur Bohrung und zur Einpressung des Verfüllgutes können nach derzeitigem Kenntnisstand nicht wieder über Tage eingesetzt werden. Somit müssen für sie die vollen Investitionsbeträge in der Kostenabschätzung mit aufgenommen werden. Sollte die Schachanlage eine Möglichkeit zur weiteren Verwendung der Gerätschaften sehen, so könnte dieser Kostenanteil für die Vorversuche um einen anderweitig zu realisierenden Abschreibungsanteil entlastet werden.

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€.

Aufgrund der nachzuweisenden Verfahrenseignung für die Hauptmaßnahme ist die unmittelbare Beteiligung eines Fachgutachters mit entsprechender Weisungs- und Steuerungsbefugnis der Versuchsabläufe, sowie Erstellung einer Dokumentation und Auswertung, hinsichtlich Wirksamkeit und Qualitätssicherung erforderlich. Die Kosten hierfür sind im oben genannten Kostenrahmen der Fremdbeauftragung einkalkuliert.

9.3 Verdichtungsinjektionen

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 der Schachanlage dem Grunde nach und hinsichtlich der Kosten weiterentwickelt werden sollten.

Grundlegend gilt, dass die Schachanlage am Verfahren aktiv beteiligt wird und folgende Leistungen gesondert erbringen sollte und dementsprechend kalkuliert:

- a) Gestellung, Unterhaltung und Betrieb
 - der für die Arbeiten benötigten Flächen sowie der Räume für die Unterbringung des Fremdpersonals,
 - der Sicherstellung und Überwachung der Arbeitssicherheit,
 - der Personalkleidung und sicherheitstechnischen Ausrüstung, Kauenbetrieb
- b) die anteilige Gestellung, Vorhaltungskosten und Betriebskosten der benötigten Einrichtungen der Schachanlage für den Horizontal- und Vertikaltransport von Personal, Material und Geräten, über die gesamte Bauzeit
- c) die Bereitstellung und Unterhaltung sowie den Betrieb von Fördereinrichtungen für den Injektionsmörtel, einschließlich der Lagerung der Ausgangsstoffe

- d) die Gestellung, Einrichtung und den Betrieb von messtechnischen Einrichtungen im Einflussbereich der Verpressarbeiten, zur Überprüfung von Verformungen, einschließlich Vorauswertung und Plausibilitätsbetrachtung durch den Markscheider der Schachtanlage
- e) Aufbau, Unterhaltung und Betrieb der elektrischen Versorgung für die Bohr- und Verpresseinheiten an den verschiedenen Einsatzpunkten
- f) Übernahme der Bohr- und Verpressrückstände am Arbeitsort und kostenfreie Entsorgung

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.

Wie oben bereits ausgeführt ist, zu diesem Thema eine gemeinsame Erörterung mit dem Betriebspersonal der Schachtanlage durchzuführen und die Schnittstellen und die Kostenabgrenzungen sowie eine grobe Kostenschätzung der oben genannten Leistungen der Schachtanlage gemeinsam vorzunehmen.

Bei Zugrundelegung der vorstehend beschriebenen Annahmen und Voraussetzungen bestimmen die Bohr- und Injektionsleistungen je Arbeitstag den Gesamtzeitbedarf und der damit verbundene Personalaufwand die Gesamtkosten. Da hierzu noch keine In-situ-Erfahrungen vorliegen, bleiben die Kostenschätzungen, zunächst bis zu den Voruntersuchungen mit den betreffenden Arbeiten im Großmaßstab unter Tage mit Ungenauigkeiten behaftet.

Angesetzt wird für eine erste Kostenschätzung der in Tabelle 7.3 aufgeführte Zeitbedarf für die Bohr- und Injektionsarbeiten. Die Kosten für die technische Ausrüstung und den Aufbau (Baustelleneinrichtung, Aufbau der Logistik, Lieferung und komplette Abschreibung der technischen Geräte für den unter-Tage-Einsatz) können derzeit nur als Orientierungswert angegeben werden.

Ausgegangen und erwartet werden, je nach Bohrverfahren und -technik, Investitionskosten von ca. 700 T€ je Bohrgerät und ca. 100 T€ je Pump- und Mischeinheit.

Unter Berücksichtigung der in Kap. 7.4 beschriebenen Variante 6 (8 Kammern) werden folgende Kosten in Abhängigkeit der eingesetzten Geräteeinheiten und der Bauzeit abgeschätzt:

- Kammerzahl: 8
 - Schichten pro Tag:3
 - Anzahl Geräteeinheiten: 2 (hiervon 1 Geräteeinheit im Rahmen der Vorversuche schon kalkulatorisch erfasst)
 - Bauzeit: ca. 1 Jahr
 - Leistung Fremdfirma: ca. 8 Mio. €
 - enth. Geräteinvestitionen: ca. 0,8 Mio.€
 - enth. Kosten für den Sorelbeton ca. 0,8 Mio. €
- Zzgl. Eigenaufwand SchachtanlageASSE und Energiekosten, etc.

Vorausgesetzt wird hierbei, dass die in den Voruntersuchungen verwendeten Geräte in den Besitz der Schachtanlage übergehen und für die Verpressarbeiten zur Verfügung stehen.

Deutlich zeigt sich hier der hohe Investitionsaufwand für die Verpressarbeiten. Er beträgt 10 bis 16% des Gesamtaufwandes bei den 8 zu behandelnden Kammern.

Nicht enthalten sind in dieser Aufstellung die Energiekosten, da eine Abschätzung des Energiebedarfs erst vorgenommen werden kann, wenn die Gerätetypen und ihre Anschlussleistungen bekannt sind. Für den Sorelbeton wird ein Materialpreis von 155 € je m³ angesetzt.

Wie bereits dargelegt, können die unter Tage eingesetzten Geräte und das betreffende Zubehör nach Aussage der Schachtanlage wie auch nach allgemeiner Erfahrung anderer Salzbergwerke nicht wieder über Tage eingesetzt werden. Sie sind deshalb mit den vollen Investitionsbeträgen mit in die Kostenschätzung aufgenommen worden. Soweit die Schachtanlage eine weitere Verwendung für diese (zunächst nur für relativ kurze Zeit benötigten) Geräte hat, kann das hier in Rede stehende Projekt natürlich um den betreffenden, anderweitig zu realisierenden Abschreibungsanteil entlastet werden. Es wird empfohlen diesen Punkt mit der Schachtanlage weiter zu erörtern.

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 erüchtigenden Kammern.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Ausschreibung der Fremdleistungen (Bohr- und Verpressarbeiten) neben der Abstimmung mit der Schachtanlage mit Blick auf Qualität, Zielerfüllung und Preisbildung besonderer Sorgfalt bedarf. Dementsprechend sind Bietergespräche und –befragungen vorzusehen.

Die Kosten für die Schachtanlage ergeben sich zum Großteil aus der Gestellung und Aufrechterhaltung der Infrastruktur, also der Sicherstellung des Betriebs der Schachtanlage. Dies sind Kosten die mindestens auch ohne die Durchführung der Hauptmaßnahme anfallen. Kosten aus der direkten Umsetzung der Maßnahme entstehen z. B. durch erhöhte Planungsarbeiten und der Bereitstellung eines Bautrupps zur Baustellenvorbereitung.

Sowohl für die Gestaltung der Ausschreibung wie für die Steuerung und Überwachung als auch für die auftraggeberseitige Auswertung der Leistungen der Fremdfirma ist eine intensive fachgutachterliche Begleitung und Beratung erforderlich. Dies gilt auch für die Eigenüberwachung.

9.4 Kostenzusammenstellung

Auf Basis der vorhergehenden Überlegungen kann für die geplanten Maßnahmen der in Tabelle 9.1 angegebene Kostenrahmen abgeschätzt werden, wobei es sich bei allen Angaben um Netto-Beträge handelt.

Tabelle 9.1 Auflistung der abgeschätzten Kosten für die geplanten Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit in der Südwestflanke der Asse unter Ansatz eines mittleren Firstspaltes mit $h_F = 0,35$ m und der favorisierten Variante 6 mit 8 durch Verdichtungsinjektionen zu ertüchtigenden Kammern

| Phase 1: Qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung | |
|---|---------------|
| Leistung | Kosten |
| Fremdleistungen | ca. 10 Mio. € |
| enth. Materialkosten | ca. 6 Mio. € |
| zzgl. Eigenleistung Schachanlage Asse | |

| Phase 2: Voruntersuchungen | |
|---------------------------------------|----------------|
| Leistung | Kosten |
| Fremdleistungen | ca. 2 Mio. € |
| enth. Geräteinvestitionen | ca. 0,8 Mio. € |
| zzgl. Eigenleistung Schachanlage Asse | |

| Phase 3: Durchführung der Verdichtungsinjektionen | |
|---|----------------|
| Leistung | Kosten |
| Fremdleistungen | ca. 8 Mio. € |
| enth. Geräteinvestitionen | ca. 0,8 Mio. € |
| enth. Materialkosten | ca. 0,8 Mio. € |
| zzgl. Eigenleistung Schachanlage Asse | |

10 BEWERTUNG DES ENTWICKELTEN KONZEPTEES

10.1 Einschätzung und Beurteilung des Konzeptes hinsichtlich der Stabilisierung der Südwestflanke

Die numerischen Berechnungen des IfG prognostizieren einen progressiven Anstieg der Pfeilerstauchungsraten in der trockenen Betriebsphase ab 2014 (Anlage 69). Hierdurch kommt es zu einem zunehmenden Tragfähigkeitsverlust und damit zu einer Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten, welche wiederum die latente Gefahr von Laugenzutritten erhöht. Um solche negativen Auswirkungen zu vermeiden, wird dort empfohlen Maßnahmen zur Reduzierung der Deckgebirgsverschiebungsraten einzuleiten [U2].

Dieses Ziel verfolgt das hier dargestellte Konzept der Versatzsteifigkeitserhöhung des Salzgruses in Abbaukammern der Südwestflanke.

Durch die in der Stufe 1 erfolgende qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung wird ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Salzgrus und Pfeiler-Schweben-System hergestellt. Hierauf aufbauend können je nach Entwicklung der Pfeilerstauchungsraten in einem Zeitraum von 5 Jahren Versatzsteifigkeiten von ca. 0,3 bis 0,4 MPa erreicht werden. Dies entspricht dem 8-fachen Wert des vom IfG angesetzten seitlichen Druckes auf die Kammerwände durch das Eigengewicht des Salzgruses.

Darüber hinaus wird durch die qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung der kraftschlüssige Verbund zwischen Salzgrus und Pfeiler-Schweben-System nach der Prognose mindestens ca. 6 bis 14 Jahre vorgezogen werden (Tabelle 6.1). Durch den damit aktivierbaren Verformungswiderstand des Versatzes ist schon ca. 2 Jahre nach der Beendigung der Verfüllmaßnahme eine nennenswerte Beteiligung des Versatzes am Lastabtrag und somit ein Beitrag zur Stabilisierung der Südwestflanke zu erwarten.

Hinzu kommt die stärkere Einspannung der Pfeiler aufgrund der höheren seitlich wirkenden Versatzsteifigkeit. Durch diese stärkere Bettung weist der Pfeiler um bis zu 100% höhere Restfestigkeiten auf (vgl. Kapitel 6.1).

Durch die Verdichtungsinjektionen der Stufe 2 des hier vorgelegten Konzeptes können voraussichtlich Versatzsteifigkeiten von 0,5 MPa in ca. 1 Jahr für die behandelnden Kammern bei Vorlage eines kraftschlüssigen Verbundes zwischen Salzgrus und Pfeiler-Schweben-System erzielt werden.

In Tabelle 10.1 sind die Zeiträume aufgetragen, welche zum Aufbau solch hoher Versatzsteifigkeiten benötigt werden, wenn die Firstspalten verfüllt wurden auf Stabilisierungsmaßnahmen jedoch verzichtet wird. Grundlage der Berechnungen ist die Standardkammer mit den Maßen 40 x 60 x 15 m. Für eine Versatzsteifigkeit von z. B. 0,5 MPa werden hiernach bei einer Stauchungsrate von 100 mm/a rd. 8 Jahre benötigt.

Tabelle 10.1 Zeitraum bis zur Erzielung der Versatzsteifigkeit in Abhängigkeit von der Stauchungsrate in Jahren

| | | Zeitraum zur Erzielung einer Versatzsteifigkeit in Jahren | | | |
|--------------------|---------|---|---------|----------|----------|
| | | 60 mm/a | 80 mm/a | 100 mm/a | 130 mm/a |
| Versatzsteifigkeit | 0,5 MPa | 14 | 10 | 8 | 6 |
| | 1,0 MPa | 48 | 36 | 29 | 22 |

Die überschlägigen numerischen Berechnungen im Kapitel 6.2 zeigen auf, dass es zur Mobilisierung einer signifikanten Mittragwirkung des Versatzes einer gesamten Sohle bei kraftschlüssigem Verbund über Firstspaltverfüllungen aller auf der Sohle befindlichen Abbaukammern ausreichend ist, wenn ausgewählte Kammern eine zusätzliche Ertüchtigung des Versatzes durch Verdichtungsinjektionen erfahren (Anlage 40). Die Lastabtragung verteilt sich hierdurch gleichmäßiger auf das Baufeld und die Spannungsumlagerung auf die Baufeldränder wird vermindert.

Die durch die Aktivierung der Versatzsteifigkeit und deren Erhöhung zu erzielenden Reduzierungen der Pfeilerstauchungsraten liegen nach den überschlägigen Spannungs-Verformungsberechnungen im Bereich von 15 bis 30% und ergeben somit eine deutliche Stabilisierung des Pfeiler-Schweben-Systems.

Diese Aussagen beruhen auf Tendenzen abbildenden numerischen Berechnungen und sollten hinsichtlich ihrer Belastbarkeit für die Gesamtstruktur der Schachtanlage mithilfe großräumiger Modelle und umfassenderer Stoffansätze erweitert werden.

Insgesamt gesehen führen die beschriebenen Maßnahmen zu einer Verminderung der Pfeilerstauchungsraten und damit zu einer Stabilisierung des Grubengebäudes, wodurch die latente Gefahr einer Erhöhung der Laugenzutrittsraten vermindert wird.

10.2 Einordnung in das geplante Schließungskonzept, Langzeitsicherheit

Das derzeitige Schließungskonzept der Asse [U29] sieht die gezielte Flutung des Grubengebäudes mit einem an $MgCl_2$ aufgesättigtem Schutzfluid vor, welches sich im chemischen Gleichgewicht mit den anstehenden Salzen befinden wird und so Umlösungen im Carnallitbereich unterbinden kann.

Durch die Einleitung des Schutzfluids in den Bereich der Südwestflanke werden der Versatz und die aufgelockerten Gebirgsbereiche durchfeuchtet mit der Folge einer Reduzierung der Tragfähigkeit des Pfeiler-Schweben-Systems. Durch den Aufbau eines pneumatischen Innendrucks von bis zu 1,0 bis 1,5 MPa soll dieser Effekt kompensiert werden [U29].

Zur Erreichung der im Schließungskonzept [U29] dargelegten Schutzziele müssen neben einer Begrenzung der Schadstoffmobilisierung aus den Abfallgebänden auch die Lösungsbewegungen im Grubengebäude und eine Auspressung von Lösungen aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge begrenzt werden.

In diesen Maßnahmenkatalog kann das aufgestellte Konzept zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit eingegliedert werden. Mit den geplanten Maßnahmen wird eine Stabilisierung im Deformationsverhalten und ein stärkerer Lastabtrag des Grubengebäudes erreicht. Die Deckgebirgsverschiebungen können hierdurch reduziert und so die Entfestigungsprozesse vermindert werden.

Die Schutzfluideinleitung wird durch die Lage der Verpresspunkte nicht behindert, da genügend ausreichend durchlässiger Raum zwischen den Mörtelplomben verbleibt. Eine Reduzierung der Porosität über die gesamte Kammer auf unter 30% wird durch die geplante Maßnahme nicht vorgesehen, sodass dieser bei den Laborversuchen zur Schutzfluideinleitung [U24] angesetzte Wert nicht vweggenommen wird.

Die Flutung des Grubengebäudes wird voraussichtlich zu einem geringeren Verformungswiderstand des Versatzes führen. Die Konsequenzen hieraus für das Deformationsverhalten des Pfeiler-Schweben-System sowie für die Tragfähigkeit des Grubengebäudes dürften aber deutlich günstiger ausfallen, da das System durch die geplante Maßnahme zuvor eine Ertüchtigung in der trockenen Betriebsphase erfahren hat und somit zum Zeitpunkt der Schutzfluideinleitung ein höhere Standsicherheit aufweisen wird als bisher.

Die Materialeigenschaften der Firstspaltverfüllung werden so gewählt, dass das Verfüllmaterial bei weiter fortschreitenden Pfeilerstauchungen langfristig durch die Kriecheigenschaften des umgebenden Salzes im innigen Verbund mit dem Blocksalz steht und verbleibt.

Im Rahmen des derzeitigen Langzeitsicherheitsnachweises ist die unplanmäßige Verfüllung der Firsthohlräume mit aufgenommen worden, da sie als Nebenprodukt der beabsichtigten Verfüllung der Wegstrecken anfällt. Da die Kammeröffnungen nicht im Vorlauf verschlossen werden, kann Sorelbeton in die Kammern einfließen und so den Hohlraum bis zu einem gewissen Anteil verfüllen. Diese Restspaltenfüllung mit Sorelbeton muss somit im Rahmen des schon eingereichten Nachweises enthalten sein.

Der Einfluss der Verdichtungsinjektionen auf den Langzeitsicherheitsnachweis hängt von der gewünschten Versatzsteifigkeit und dem hierfür zu injizierenden Volumen ab. Die Auswirkungen auf den Langzeitsicherheitsnachweis sollten deshalb im Rahmen der schlussendlichen Festlegung der zu injizierenden Kammern überprüft werden.

10.3 Anmerkungen zum Genehmigungsverfahren

Angaben zum durchzuführenden Genehmigungsverfahren für die geplanten Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit können aufgrund der aktuellen Ereignisse [U36] rund um den Betreiberwechsel nur sehr wage bleiben und entbehren der gesicherten Grundlage.

Bislang erfolgte die Schließung der Schachanlage Asse nach den Vorschriften des Bundesberggesetzes (BBergG). Hinsichtlich des Schließungskonzeptes ist gemäß §53 BbergG ein Abschlussbetriebsplan einzureichen, der eine genaue Darstellung der technischen Durchführung der Schließungsmaßnahmen enthält sowie aufzeigt, dass die in §55 BbergG bezeichneten Genehmigungsvoraussetzungen erfüllt sind.

In diese Nachweisführung wäre laut Aussage des bislang zuständigen Bergamtes vom 01.09.2008 [U37] auch das hier skizzierte Konzept einzugliedern. Der formale Fortgang wäre die Einreichung von Sonderbetriebsplänen gewesen, welche getrennt von einander für die Maßnahmen einer hochwertigen Firstspaltverfüllung mit oder ohne Hohlraumreduzierung des Versatzes durch Verdichtungsinjektionen und den Vorversuchen hätten erstellt werden müssen. Das Recht auf Einreichung dieser Unterlagen hätte alleinig der Betreiber der Schachanlage Asse.

Nach derzeitigem Kenntnisstand erfolgt die weitere Schließung auf Grundlage des weiterreichenden Atomrechts. In diesem Zusammenhang wurde auch ein Betreiberwechsel vorgenommen [U36], sodass Aussagen zum Genehmigungsverfahren zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gemacht werden können.

10.4 Anmerkungen zum Zeitplan

Der zeitliche Ablauf der geplanten Maßnahmen stellt sich im Einzelnen wie folgt dar:

Stufe 1: Qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung

- Ausführungs- und Genehmigungsplanung
- Genehmigungsphase
- Vorbereitende Maßnahmen (z. B. Aufmaß der Hohlräume)
- Firstspaltverfüllung
- Qualitätsmanagement und Dokumentation

Stufe 2: Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial durch Volumenzugabe

- Untersuchungsprogramm
- Ausführungs- und Genehmigungsplanung
- Genehmigungsphase
- Vorbereitende Maßnahmen

- Bohrarbeiten
- Injektionsarbeiten
- Qualitätsmanagement und Dokumentation

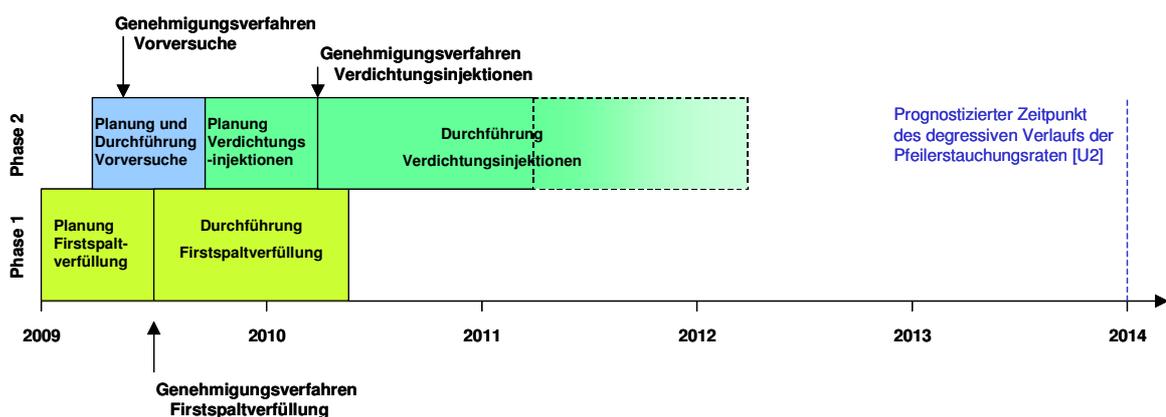
Die Entwicklung eines detaillierten Bauablaufplanes und der vorbereitenden Maßnahmen zur Firstspaltverfüllung sollte in enger Abstimmung mit den Verantwortlichen der Schachthanlage in relativ kurzer Zeit von ca. ½ Jahr möglich sein. Die eigentlichen Verfüllarbeiten nehmen je nach Förderraten ½ bis 1 Jahr in Anspruch. Hinzu kommen begleitende Arbeiten wie das Aufmaß der Hohlräume und der Kammerverschluss. Diese Arbeiten finden im Vorlauf der eigentlichen Verfüllung statt und verlängern bei entsprechender Planung die Gesamtzeitdauer der Maßnahme nicht.

Für die Planung und Durchführung der Voruntersuchungen wird ein Zeitraum von ca. einem 3/4 Jahr veranschlagt.

Die Dauer der Planungsarbeiten für die Injektionsmaßnahmen hängen von der Anzahl der zu ertüchtigenden Kammern ab, werden grundsätzlich aber mit ca. 1/2 Jahr abgeschätzt. Die der Bohr- und Injektionsmaßnahmen dauern ca. 1 bis 2 Jahre, je nach Anzahl zu behandelnder Kammern. Für die von uns favorisierte Variante 6 wird für diese Arbeiten ca. 1 Jahr benötigt.

Aussagen zur Dauer des Genehmigungsverfahrens sind zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht zu machen, da das Genehmigungsregime vom Bergrecht zum Atomrecht gewechselt hat.

Bei paralleler Bearbeitung der 2 Stufen des vorgestellten Konzeptes ergibt sich folgende denkbare Zeitleiste.



11 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN

11.1 Zusammenfassung

Die Stabilität des Grubengebäudes der Schachtanlage Asse II wird im Wesentlichen durch die Größe und den Durchbauungsgrad des Baufeldes an der Südwestflanke des Asse-Sattels bestimmt. Das Gesamttragsystem besteht aus dem Deckgebirge und dem nachgiebig und zeitlich begrenzt standfesten System aus Pfeilern und Schweben (Pfeiler-Schweben-System) im jüngeren Steinsalz.

Basierend auf den großen gemessenen Verformungen im Grubengebäude und in Verbindung mit den in-situ Beobachtungen von Abschaltungen an den Pfeilern und Brüchen in den Schweben ist davon auszugehen, dass sich das Pfeiler-Schweben-System im Grenzzustand befindet. Die Ergebnisse der von dem Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig (IfG) durchgeführten statischen Berechnungen nach der Methode der Finiten Elemente unter Berücksichtigung des viskoplastischen, zeitabhängigen Spannungs-Verformungsverhalten des Salzes unterstützen diese Einschätzung.

Ein erster Schritt zur Stabilisierung des Gesamttragsystems wurde speziell durch die Versatzmaßnahmen der Abbaue an der Südwestflanke des Asse – Sattels (1995 bis 2004) eingeleitet. Der Hohlraumversatz aus Salzgrus, der im Mittel eine Porosität von 42% aufweist, hat dazu beigetragen, die Verformungsraten in den Pfeilern zu reduzieren.

Im Rahmen der nunmehr vorliegenden Konzeptstudie werden weitere Maßnahmen zur frühzeitigen und kurzfristig wirksamen Stabilisierung der Südwestflanke beschrieben. Hierbei soll durch eine Verfüllung der offenen Hohlräume (Firstspalt) in den Abbaukammern und durch eine Reduzierung des Hohlraumgehaltes im Salzgrus eine Erhöhung der Versatzsteifigkeit erzielt werden.

Ohne diese zusätzlichen Maßnahmen wurde auf Grundlage numerischer Berechnungen des IfG ein progressiver Anstieg der Pfeilerstauchungsraten ab dem Jahr 2014 mit dem Risiko erhöhter Laugenzutritte prognostiziert. Ein möglicher unkontrollierter Anstieg der Laugenzutritte könnte über verstärkte Lösungsvorgänge die Standsicherheit des gesamten Grubengebäudes gefährden.

Das im vorliegenden Bericht dargestellte Konzept zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit des Salzgruses in den Abbaukammern der Südwestflanke beinhaltet 2 Stufen, welche sich wie folgt darstellen:

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

- Erzielung eines kraftschlüssigen Verbundes
- Einspannung der Pfeiler
- Aktivierung der Versatzsteifigkeit

Stufe 2: Hohlraumreduzierung im Versatzmaterial durch Volumenzugabe, zur
frühzeitigen Erhöhung der Versatzsteifigkeit

Durch die Firstspaltverfüllung wird ein kraftschlüssiger Verbund zwischen Salzgrus und Pfeiler-Schweben-System hergestellt. Durch diesen Verbund werden bei nachfolgenden Verformungen der Kammer Versatzsteifigkeiten aktiviert, die zu einer deutlichen Tragfähigkeitserhöhung des Grubengebäudes und zu einer Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten führen. Zudem wird die Einspannung der Pfeiler verstärkt, was auch bei Pfeilern, die sich im Nachbruchbereich befinden zu einer Ertüchtigung der Tragfähigkeit führt. Somit wird durch diese Maßnahme das Deformationsverhalten der Pfeiler günstig beeinflusst und die Stabilität des Grubengebäudes spürbar erhöht.

Für die Umsetzung der Firstspaltverfüllung (Stufe 1) stehen bekannte Techniken des Pumpversatzes zur Verfügung, so dass diese Maßnahme kurzfristig umsetzbar ist. Erfahrungen hinsichtlich der Verfülltechnik und Materialverhalten des Sorelbetons für die Firstspaltverfüllung liegen auf der Schachanlage Asse vor. Der für diese Maßnahme angesetzte Zeitbedarf liegt bei ca. 1 Jahr.

Durch ausgewählte, mit Verdichtungsinjektionen (Stufe 2) ertüchtigte Kammern kann eine höhere Mittragwirkung der gesamten Sohle bzw. von Bereichen des Grubengebäudes erreicht werden. Die Lastabtragung verteilt sich hierdurch gleichmäßiger auf das Baufeld der Südwestflanke, eine Spannungsumlagerung auf die Baufeldränder wird vermindert. Es kommt zu einer signifikanten Stabilitätserhöhung und Reduzierung der Stauchungsraten in den Pfeilern.

Die Bauzeit zur Umsetzung der Maßnahme ist abhängig von der Anzahl der zu behandelnden Kammern und der anzuwendenden Technik. Unter Berücksichtigung der gewählten Variante 6, bei der im Kernbereich mit großen Pfeilerstauchungsraten an insgesamt 8 Kammern Verdichtungsinjektionen ausgeführt werden sollen, lässt sich eine Bauzeit von ca. 1 Jahr abschätzen.

Da keine ausreichenden Erfahrungen bzgl. der anzusetzenden Bohrtechniken im Salzgrus bei Spezialbohrfirmen vorliegen, sollten durch Voruntersuchungen entsprechende Erprobungen unter Tage stattfinden. Ebenso wird in DIN EN 12715 empfohlen, die Planung von Injektionsmaßnahmen grundsätzlich durch Versuche im Gebirge zu überprüfen und ggf. anzupassen.

Hinsichtlich der Kosten, die sich für die geplanten Maßnahmen ergeben, kann von einer Größenordnung von ca. 10 Mio. € für die qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung ausgegangen werden. Die Kosten für die geplanten Voruntersuchungen betragen ca. 2 Mio. €. Für die Verdichtungsinjektionen zur Ertüchtigung von 8 Kammern mit einer Versatzsteifigkeit von ca. 0,5 MPa wird ein Kostenrahmen von ca. 8 Mio. € abgeschätzt. Die Gesamtinvestitionskosten für Planung und Ausführung von Firstspaltverfüllung, Voruntersuchungen und Verdichtungsinjektionen zum Erreichen einer frühzeitigen Erhöhung der Versatzsteifigkeit liegt somit in der Größenordnung von ca. 20 Mio. €, die Bauzeit erstreckt sich über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren.

Abschließend muss festgehalten werden, dass sich das Pfeiler-Schweben-System in Abhängigkeit von Lage, Anzahl und Höhe der erzielten Versatzsteifigkeiten in den Abbaukammern weiter verformen wird. Da es sich im Grenzzustand befindet, kommt es auch künftig zu Lastumlagerungen sowohl im Salz- als auch im Deckgebirge. Schwachstellen für den Laugentransport im Deckgebirge sind vornehmlich Störungszonen und Gleitflächen. Insofern ist davon auszugehen, dass mit zunehmenden Verformungen des Pfeiler-Schweben-Systems sich die latente Gefahr eines vermehrten Laugenzutritts erhöht. Aufgrund der komplexen Gebirgsverhältnisse und des nicht eindeutig definierbaren Laugenzutritts in das Salzgebirge ist nicht prognostizierbar, ob überhaupt und wenn ja bei welchem Verformungszustand im Gebirge ein erhöhter Laugenzutritt eintritt. Insofern lässt sich lediglich die allgemeine Überlegung anstellen, dass eine Reduzierung der Verformungsgeschwindigkeit des Pfeiler-Schweben-Systems pro Zeiteinheit zu einer geringeren Verformung im Salz- und Deckgebirge führt, und dadurch die latente Gefahr eines erhöhten Laugenzutritts reduziert wird.

Werden keine zusätzlichen Maßnahmen zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit - wie die vorgeschlagenen Firstspaltverfüllungen und Verdichtungsinjektionen vorgesehen - so zeigen theoretische Überlegungen, dass sich in Abhängigkeit der Höhe der Verformungsgeschwindigkeit des Pfeiler-Schweben-Systems der nächsten Jahren z. B. in einem Zeitraum von ca. 16 Jahren eine Versatzsteifigkeit in den Abbaukammern von $p_v = 0,5 \text{ MPa}$ einstellen wird. Die gleiche Größe der Versatzsteifigkeit wird mit den vorgesehenen Maßnahmen einer Firstspaltverfüllung und der gezielten Ausführung von Verdichtungsinjektionen bedeutend schneller erreicht. Die Abschätzung des dafür benötigten Zeitrahmens liegt bei ca. 3 Jahren, und stellt damit einen Zeitgewinn von ca. 13 Jahren dar. Eine Zusammenstellung der Auswirkungen ist in Tabelle 11.1 aufgeführt.

Damit soll aber nicht ausgesagt werden, dass noch genügend Zeit zur Verfügung steht lange über alternative Maßnahmen nachzudenken, sondern es ist dringend angeraten, gezielt und konsequent zu handeln und die vorgeschlagenen Maßnahmen zeitnah umzusetzen.

Tabelle 11.1 Prognose der Auswirkungen der einzelnen Szenarien auf die Stabilisierung der Südwestflanke

| | Keine Maßnahmen | Stufe 1: Qualitätsgesicherte Firstspaltverfüllung | Stufe 1 + Stufe 2: Verdichtungsinjektionen in ausgewählten Kammern (Variante 6) |
|-------------------|--|---|--|
| in 2 bis 5 Jahren | fortgesetzte Stauchungen in den Pfeilern ohne wesentliche Mittragwirkung des Versatzes, dabei weitere Entfestigungen in den Tragelementen verbunden mit Spannungsumlagerungen | fortgesetzte Stauchungen mit kraftschlussbedingter Wirkung auf die Versatzsteifigkeit der Kammern, damit Beginn der Entwicklung der Mittragwirkung des Versatzes und dementsprechender Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten | in den betreffenden Kammern wird durch die Versatzsteifigkeitserhöhung die Mittragwirkung frühzeitig aktiviert, insgesamt deutlich geringere Stauchungsraten |
| 5 bis 15 Jahre | wie vor, Stauchungswirkungen bedingen die Firstspaltreduzierung bis hin zur Schließung, Zeitdauer zur Schließung in Abhängigkeit von der Größe des Firstspaltes, Beginn einer Versatzsteifigkeitsentwicklung, weitere Entfestigungen bei Tragelementen | Versatz entwickelt eine Mittragwirkung, bei niedrigeren Stauchungsraten im Grubengebäude | durch die behandelten Kammern wird eine gleichmäßigere und ausgeprägte Mittragwirkung im Pfeiler-Schweben-System erreicht, bei entsprechender Reduzierung der Pfeilerstauchungsraten |

11.2 Empfehlungen

Im Vorfeld der Umsetzung der im vorliegenden Bericht dargestellten Maßnahmen sollte eine numerische Überprüfung der gemachten Aussagen zur Wirkung und zur Auswahl der Kammern durch ein anerkanntes Institut mit einem entsprechend großräumigen Modell erfolgen. Berechnet werden sollten:

- Ist-Zustand auf Grundlage der aktuellen Messwerte
- Simulierung der Firstspaltverfüllung sowie
- Simulierung der Firstspaltverfüllung mit Ansatz der aufgeführten 6 verschiedenen Varianten der mit Verdichtungsinjektion zu behandelnden Abbaukammern. Dabei sollte auch die Höhe der Ausgangsversatzsteifigkeit variiert werden.

Durch diese Berechnungen kann eine Abschätzung des Einflusses der jeweiligen Variante auf die Stabilisierung und damit die Verformungsrate der Südwestflanke stattfinden. Hierbei sollte ausgehend von der Variante 6 eine mögliche Ausweitung der zu behandelnden Bereiche/Kammern modelliert werden. Mit diesen Überprüfungen ist dann auch eine sinnfällige Reihenfolge der Einzelmaßnahmen planbar.

Zur Entwicklung der Bohrtechnik für den Salzgrus und zur Absicherung verfahrenstechnischer Details der Verdichtungsinjektionen wie auch zur Überprüfung der angesetzten Arbeitszeiten sind Untersuchungen vor der eigentlich stattfindenden Verpressmaßnahme unabdingbar. Das Untersuchungsprogramm sollte folgende Punkte umfassen:

- Überprüfen der technische Ausführbarkeit durch in-situ Versuche
- Verifizierung der Materialausgangswerte, Wechselwirkung Injektionsgut – Salzgrus
- Überprüfung der zu erstellenden Verpresskörper
- Überprüfung der Bohrtechnik und Gerätschaften
- Überprüfung der Misch- und Verpressabläufe

Um ggf. frühzeitig eine Stabilisierung des Grubengebäudes zu erreichen, wird empfohlen die Maßnahmen zur Versatzsteifigkeitserhöhung parallel zu den geplanten Maßnahmen des Schließungskonzeptes auszuführen.

Abschließend wird angemerkt, dass die Anwendung der beschriebenen Injektionstechnik unter den hier gegebenen Randbedingungen, in dem außergewöhnlichen Material und für den vorgesehenen Zweck in dieser Kombination unseres Wissens nach noch nicht ausgeführt wurde. Dies gilt für die direkte Wechselwirkung des Verpressmörtels mit dem Salzgrus, für die Platzierung der Injektionspunkte und den damit zusammenhängenden Druckaufbau in der unmittelbaren Umgebung, für die integrale Erhöhung Versatzsteifigkeit und im weiteren für die Initialisierung und Fortentwicklung der Injektionssteuerung, für die messtechnischen Kontrollen und die Qualitätssicherung sowie deren Anpassung und Fortschreibung.

Die umfassende und gesamtheitliche fachgutachterliche Begleitung aller Arbeitsschritte, von der Planung, Steuerung und Auswertung der Vorversuche bis hin zur Qualitätssicherung während der Ausführung sind wesentlicher Bestandteil des hier vorgestellten Gesamtkonzeptes.

CDM Consult GmbH
Bochum, 2008-09-17



Dr.-Ing. Peter Jordan

i. A. 
Dr.-Ing. Aloys Kisse