

Deckblatt

Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: I
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64331000	GC	RB	0005	00	Stand: 11.03.2009

Titel der Unterlage:

GEBIRGSMECHANISCHE ZUSTANDSANALYSE UND PROGNOSE AUF DER BASIS VON
STANDORTDATEN SOWIE 3D-MODELLRECHNUNGEN

Ersteller:

IFG

Textnummer:

Stempelfeld:

Freigabe für Behörden:

i.V. *[Handwritten Signature]* 24/3/09

Datum und Unterschrift

Freigabe im Projekt:

i.V. *[Handwritten Signature]* 24/3/09

Datum und Unterschrift

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung des BfS

Revisionsblatt


Projekt	PSP-Element	Aufgabe	UA	Lfd.Nr.	Rev.	Seite: II
NAAN	NNNNNNNNNN	AAAA	AA	NNNN	NN	
9A	64331000	GC	RB	0005	00	Stand: 11.03.2009

Titel der Unterlage:


GEBIRGSMECHANISCHE ZUSTANDSANALYSE UND PROGNOSE AUF DER BASIS VON STANDORTDATEN SOWIE 3D-MODELLRECHNUNGEN

Rev.	Rev.-Stand Datum	UVST	Prüfer (Zeichn.)	rev. Seite	Kat (*)	Erläuterung der Revision

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Revision
 mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden



**Gebirgsmechanische
Zustandsanalyse und Prognose auf
der Basis von Standortdaten sowie
3D-Modellrechnungen**



Institut
für
Gebirgsmechanik
GmbH

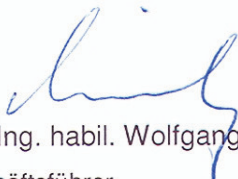
Gebirgsmechanische Zustandsanalyse und Prognose auf der Basis von Standortdaten sowie 3D-Modellrechnungen

Auftraggeber: Bundesamt für Strahlenschutz, Salzgitter

Auftrag-Nr. (AN): 04/2009

Bearbeiter: Dr. - Ing. Peter Kamlot
Dipl. - Ing. Ralf-Michael Günther
Dipl. - Geol. Grit Asmussen-Günther

Leipzig, den 11.03.2009



Dr. - Ing. habil. Wolfgang Minkley
Geschäftsführer



Dr. - Ing. Peter Kamlot
Projektleiter

Inhaltsverzeichnis

1	ANLASS UND ZIELSTELLUNG.....	4
2	LÖSUNGSWEG	6
3	GEBIRGSMECHANISCHE BEWERTUNG AUSGEWÄHLTER DATEN DER STANDORTÜBERWACHUNG.....	6
3.1	PFEILERSTAUCHUNGSRATEN BIS ENDE 2008.....	6
3.2	SPANNUNGSMONITORSTATIONEN IN DEN PFEILERN.....	7
3.3	VERSATZDRUCKGEBER IN DEN ABBAUEN.....	9
3.4	MIKROSEISMISCHE MESSUNGEN.....	10
3.5	AUSBREITUNG DER DECKGEBIRGSLÖSUNG UND NOCH VORHANDENE RESTHOHLRÄUME.....	11
4	PROGNOSERECHNUNGEN MIT DEM VERTIKALEN 3D-MODELL.....	12
4.1	BEWERTUNG DER BISHER VORLIEGENDEN PROGNOSEN BIS 2016.....	12
4.2	PROGNOSERECHNUNGEN BIS 2020 MIT HÖHEREN VERSATZDRÜCKEN.....	13
5	ZUSTANDSANALYSE UND PROGNOSERECHNUNGEN MIT DEM HORIZONTALLEN 3D-MODELL.....	15
5.1	MODELLBESCHREIBUNG.....	15
5.1.1	<i>Rechencode.....</i>	<i>15</i>
5.1.2	<i>Modellgeometrie.....</i>	<i>16</i>
5.1.3	<i>Randbedingungen und Grundspannungszustand.....</i>	<i>17</i>
5.1.4	<i>Stratigraphie, Stoffgesetze und Materialparameter.....</i>	<i>18</i>
5.1.5	<i>Hydraulische Lastannahmen im Deckgebirge</i>	<i>21</i>
5.1.6	<i>Modellierung der Auffahrung und des Versatzeinbringens</i>	<i>23</i>
5.1.7	<i>Modellierung von Schwebenbrüchen.....</i>	<i>23</i>
5.2	BEWERTUNG DER BEANSPRUCHUNGEN IM DECKGEBIRGE UND DER STEINSALZBARRIERE	24
5.3	MODELLIERUNG DER FIRSTSPALTVERFÜLLUNG UND BERECHNUNG DER AUSWIRKUNGEN AUF DIE DECKGEBIRGSVERSCHIEBUNGEN	27
5.3.1	<i>Modellfestlegungen</i>	<i>27</i>
5.3.2	<i>Berechnung der Auswirkungen der Firstspaltverfüllung.....</i>	<i>29</i>
6	ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG	31
	LITERATUR.....	35
	ANLAGENVERZEICHNIS.....	37

1 ANLASS UND ZIELSTELLUNG

Die hier vorgelegte gebirgsmechanische Zustandsanalyse aktualisiert die in den veröffentlichten Berichten

- Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase [1] und
- Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse [2]

getroffenen sowie im Kurzbericht

- Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachanlage Asse II [3]

zusammengefassten Systemeinschätzungen sowie die auf dieser Basis erstellten Prognosen für die weitere offene Betriebsphase.

Die Systemeinschätzungen führten zu dem Ergebnis, dass durch die geringen Abmessungen der Tragelemente (Pfeiler und Schweben) und die lange offene Standzeit die Abbaufelder der Asse II durch Entfestigungs- und Bruchprozesse gekennzeichnet sind. Insbesondere im Baufeld an der Südflanke ist es durch die gering mächtige Steinsalzbarriere zu einem Lastabtrag auf das benachbarte südliche Deckgebirge gekommen. Dieses hat unter der Wirkung anstehender Deckgebirgslösungen mit lokalen Festigkeitsüberschreitungen in geologisch angelegten Trennflächen bzw. mit der Ausbildung von Scherbändern in den Gesteinsschichten reagiert. Die Festigkeitsverluste verringerten die Eigentragfähigkeit im die Südflanke überspannenden Deckgebirgsgewölbe und verursachten wiederum eine höhere Beanspruchung des Abbausystems sowie seit Mitte der 1980er Jahre verstärkte Deckgebirgsverschiebungen. Seit 1988 existiert an der Südflanke ein Salzlösungszutritt und die zutretenden Deckgebirgslösungen, die an NaCl gesättigt, jedoch im Carnallitit lösefähig sind, werden seitdem auf immer tieferen Sohlen nachgewiesen. Aufgrund der Bedeutung dieser Randbedingungen, Einwirkungen und Prozesse konzentriert sich die aktualisierte gebirgsmechanische Zustandsanalyse auf das Baufeld an der Südflanke.

Das Tragsystem der Südflanke befindet sich derzeit in einem Grenzzustand, der durch Verformungen im Nachbruch- und Restfestigkeitsbereich der Pfeiler und Schweben sowie den sich langsam aufbauenden Versatzdruck gegenüber den auflaufenden Gebirgslasten be-

stimmt wird. Die Belastungen werden zu weiteren Verschiebungen und Deformationen führen, die wiederum weitere Schädigungen der Tragelemente zur Folge haben. Aufgrund der nicht vorhandenen Standfestigkeit des Pfeiler-Schweben-Systems (das Abbausystem an der Südflanke wurde von vornherein mit nicht standfesten Abmessungen aufgefahren) werden die weiter auflaufenden Lasten in das Deckgebirge abgetragen und führen dort zur Öffnung von Wegsamkeiten für Deckgebirgslösungen. Es ist zu besorgen, dass die Wegsamkeiten verstärkt die hydraulisch leitfähigen Gesteinsschichten des Muschelkalks anschließen und sich weiterhin der Eintrittsort der Salzlösung in das Grubengebäude, aber auch ihre Menge und Zusammensetzung, verändern. Dem stehen die Konturstabilisierung der Pfeiler und Schweben durch den eingebrachten Versatz mit einem allmählichen Aufbau des Versatzwiderstandes als stützende Kraft gegenüber.

Zur Prognose der weiteren offenen Betriebsphase ohne Schließungsmaßnahmen wurde mittels einer Modellrechnung in [2] und [3] ausgeführt, dass es infolge der seit Jahrzehnten andauernden und in situ nachprüfaren Entfestigungs- und Bruchprozesse ab 2014 zu einem zunehmenden Tragfähigkeitsverlust und damit einer Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten kommen kann. Da die Zuverlässigkeit von Modellrechnungen mit steigendem Prognosezeitraum grundsätzlich abnimmt, wurde vom IfG eine begleitende Begutachtung mit einer Überprüfung und ggf. Korrektur der Prognoserechnungen auf Basis von In-situ-Messwerten der Standortüberwachung empfohlen. An der Südflanke sind die üblichen in der Salzmechanik zur Analyse der Stabilität und Barrierewirkung des Gebirges gebräuchlichen gebirgsmechanischen Kriterien bereits verletzt und es laufen Bruchprozesse ab, so dass ein sensibel auf veränderte Randbedingungen reagierendes Tragsystem im Grenzzustand vorliegt.

Im Rahmen eines vom Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) weitergeführten Auftrages wurde eine solche Überprüfung veranlasst und die Ergebnisse sollen jetzt vorgelegt werden. Die aktualisierte gebirgsmechanische Zustandsanalyse wird in einem Kurzbericht erstellt, der vorwiegend Bezug auf die neuen Daten der Standortüberwachung bis Ende 2008 und die sich daraus ergebenden neuen Prognoserechnungen für die weitere offene Betriebsphase ohne wesentliche Eingriffe in das Systemverhalten (wie z.B. eine Schutzfluideinleitung) nimmt. Bezüglich der Stoffparameter und Modellbeschreibung des vertikalen 3D-Modells in streichender Bergwerksmitte wird auf [2] verwiesen. Für das neu entwickelte horizontale 3D-Modell, welches eine gebirgsmechanische Bewertung in der gesamten Ost-West-Erstreckung (streichende Richtung) der Südflanke einschließlich der Baufeldränder gestattet

und das für die Prognose der Auswirkungen einer Firstspaltverfüllung (Phase 1 nach [4]) verwendet wurde, erfolgt eine ausführliche Beschreibung im Kapitel 5.

Der Kurzbericht beschreibt den gebirgsmechanischen Zustand und die zukünftige Entwicklung des Tragverhaltens an der Südflanke und bildet somit eine Basis für die Prüfung und Umsetzung der unterschiedlichen Optionen bei der Schließung des Bergwerkes.

2 Lösungsweg

Die Bearbeitung erfolgte in den Schritten

- Darstellung und Bewertung ausgewählter Daten der Standortüberwachung bzw. von In-situ-Befunden für die gebirgsmechanische Zustandsanalyse mit dem Ziel der Modellbegründung für die Prognoserechnungen (Kapitel 3)
- Prognoserechnungen mit dem vertikalen 3D-Modell bis 2020 unter Vorgabe der seit 2005/2006 messtechnisch nachgewiesenen erhöhten Versatzdrücke (Kapitel 4)
- Zusätzliche Berücksichtigung des Feuchtekriechens im Bereich der tieferen Sohlen der Südflanke infolge der Ausbreitung der Deckgebirgslösung zur Berechnung eines Prognosekorridors (Kapitel 4)
- Modellbeschreibung des horizontalen 3D-Modells zur gebirgsmechanischen Bewertung in der streichenden Erstreckung der Südflanke und zur Bewertung einer Firstspaltverfüllung mit Sorelbeton (Kapitel 5.1)
- Bewertung der Beanspruchungen im südlichen Deckgebirge und der Steinsalzbarriere (Kapitel 5.2)
- Modellierung der Firstspaltverfüllung und Bewertung der Auswirkungen auf die Deckgebirgsverschiebungen bzw. Gebirgsbeanspruchungen (Kapitel 5.3)

3 Gebirgsmechanische Bewertung ausgewählter Daten der Standortüberwachung

3.1 Pfeilerstauchungsraten bis Ende 2008

In den periodisch erarbeiteten Zwischenberichten werden im jährlichen Abstand die Pfeilerstauchungsraten in mm/Jahr für unterschiedliche Sohlen und Pfeiler dargestellt. Diese Pfeilerstauchungsraten beziehen sich auf die querschlägigen Pfeilerabmessungen von etwa 40 m und werden in etwa halber Kammerhöhe gemessen. Die Position der Messstellen ist in Anlage 1 angegeben. In den Anlagen 2 bis 5 sind die Verläufe der jährlichen Pfeilerstauchungsraten des letzten Zwischenberichtes ab November 1981 bis zum November 2008 zu

sehen. Die Messungen selbst erfolgen zwar vierteljährlich von Hand, die grafischen Darstellungen in den Zwischenberichten beziehen sich aber immer auf eine Zeitdifferenz von einem Jahr jeweils für die Monate Februar, Mai, August und November. Aus den Anlagen 2 bis 5 wird ersichtlich, dass zwar ab Ende der 1990er Jahre eine allgemein degressive Tendenz infolge der Versatzmaßnahme (1995 bis 2004) existiert, diese in der letzten Jahresetappe aber schwächer wird. An einigen Messstellen im oberen Bereich der Südflanke und an den östlichen und westlichen Baufeldrändern ist sogar ein deutlicher Anstieg der Raten erkennbar, wobei die größten Beträge etwa 140 mm/a erreichen. Dieser Befund wird mit einer zunehmenden Nachgiebigkeit im Zentrum der Südflanke infolge von Bruchprozessen und einer Spannungsumverlagerung auf die Baufeldränder erklärt (siehe auch folgendes Kapitel). Die Isolinien Darstellung der Pfeilerstauchung von 11/2007 bis 11/2008 zeigt das Maximum der Pfeilerstauchungsraten im oberen Teil der Südflanke über den Abbaureihen 6 und 7 mit einem Niveau > 120 mm/a. Der Stauchungsbereich > 100 mm/a erstreckt sich auch über den 20 m breiten Pfeiler zwischen den Abbaureihen 4 und 5 (alle anderen Pfeiler sind 12 m breit), was auf eine zunehmende Entfestigung auch dieses ursprünglich stabileren Tragelementes hinweist.

3.2 Spannungsmonitorstationen in den Pfeilern

Die Spannungsmonitorstationen bestehen aus Druckgebern, die in den Steinsalzpfeilern etwa in Schwebenhöhe und streichender Pfeilermitte installiert sind. In querschlägiger Richtung liegen die Einbauorte an der südlichen und nördlichen Pfeilerbegrenzung bzw. in Pfeilermitte. Im Folgenden wird aufgrund der gebirgsmechanisch stärksten Reaktivität (keine Stützwirkung durch die südlichen und nördlichen Baufeldränder) nur auf die Messwerte in querschlägiger Pfeilermitte Bezug genommen. Nach dem Einbau in Bohrungen werden die Stationen einzementiert und für eine belastbare Messung muss ein Form- und Kraftschluss im Steinsalzpfeiler vorliegen. Bei 6 gemessenen Normalspannungen zu den Druckgebern ist die Berechnung des räumlichen Spannungstensors und mit Methoden der Tensormathematik die Berechnung der Beträge und Richtungen der Hauptspannungen möglich. Diese Auswertung wird von der Standortüberwachung in jährlichen Zwischenberichten vorgelegt.

Aus den dargestellten Spannungsverläufen (siehe beispielhafter berechneter Hauptspannungsverlauf in Anlage 7) kann überwiegend geschlussfolgert werden, dass die Stationen in den zementierten Bohrlöchern einen Form- und Kraftschluss erreicht haben, der die Anzeige des räumlichen Spannungszustandes in dem überwachten Pfeilerbereich gewährleistet. Die Algorithmen für die Berechnung der Beträge und Richtungen der Hauptnormalspannungen werden auch am IfG verwendet und die Berechnungen konnten nachvollzogen werden. Da

an den Gebern keine Zugspannungen gemessen werden können (rote Kurve in Anlage 7), bedarf die Ausweisung von σ_{\min} im Zugbereich z.T. deutlich über der Zugfestigkeitsgrenze des Steinsalzes einer plausiblen Begründung: Mittels des Auswertalgorithmus für den dreidimensionalen Hauptnormalspannungstensor kann gezeigt werden, dass sich für σ_{\min} dann Zugspannungen ergeben, wenn die gemessenen Normalspannungen an den Druckgebern große Unterschiede aufweisen. In querschlägiger Pfeilermitte wirken die größten Normalspannungen meist senkrecht zum Einfallen der Südflanke und die kleinsten Normalspannungen horizontal streichend. An einer Vielzahl von Lokationen beträgt die kleinste Normalspannung nur wenige MPa oder ist Null und die größte Normalspannung übersteigt die einachsige Langzeitfestigkeit. Unter diesen Bedingungen ist von einer Ausbildung von vertikal querschlägigen Zugrissen auszugehen, so dass die theoretischen Voraussetzungen des Auswertalgorithmus eines homogenen und isotropen Gebirgsbereiches, in dem 6 Normalspannungswerte eines Volumenelementes gleichberechtigt zum räumlichen Spannungstensor zusammengefügt werden können, nicht mehr gegeben sind. Diese Zugrisse können sich anfangs als Mikrorisse ausbilden, die nicht zu sehen sind, und später in Makrorissen konzentrieren. Die berechneten Zugspannungen in einer gebirgsmechanisch unzulässigen und mechanisch nicht erträglichen Höhe sind demzufolge vermutlich nicht in voller Höhe existent, sondern zeigen eine schon vorhandene Rissbildung in den installierten Pfeilerbereichen an. Die Makrorissbildung ist mittels Bohrlochkamerabefahrungen in den Pfeilern zu sehen (beispielhaft Anlage 8) und erklärt auch die z.T. unregelmäßigen (bruchhaften) Spannungsverläufe an den Druckgebern. Der zunehmende Tragfähigkeitsverlust in Richtung der aus dem südlichen Deckgebirge wirkenden Belastungen ist an der grünen Kurve in Anlage 7 gut zu erkennen.

Da eine solche Bewertung der In-situ-Messwerte Konsequenzen für die Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes für die noch verbleibende Betriebsphase besitzt, wurde in Anlage 9 eine Übersichtsdarstellung der berechneten Hauptspannungsverläufe der in querschlägiger Pfeilermitte installierten Spannungsmonitorstationen erstellt. Im Vergleich mit Anhang 8 in [5] sind alle Stationen bis auf 2 Ausnahmen erfasst:

- Eine Station im Pfeiler 5/6 in einer Teufe von 535 m weist sehr niedrige Hauptnormalspannungen < 6 MPa und eine nur geringe Zugspannung von 1 MPa aus. Die Station wurde vermutlich bereits in einen entfestigten Pfeilerbereich eingebaut.
- An einer Station im Pfeiler 3/4 in einer Teufe von 661 m sind nicht mehr alle 6 Druckgeber aktiv, so dass der Spannungstensor nicht berechnet werden kann.

Insbesondere die Zugspannungen als Indikator für eine schon existierende Rissbildung zeigen in Anlage 9, dass in situ insbesondere unter den Pfeilerstauchungsraten ab 80 mm/a bei den gegebenen freien Bewegungsmöglichkeiten der Pfeiler (keine stützenden Feldestränder, Querdehnungsbehinderung nur durch schon gebrochene Schweben) eine zunehmende Entfestigung stattfindet. Die hoch belasteten Tragelemente werden in den nächsten Jahren mittels Bruchprozessen zunehmend der Beanspruchung ausweichen, die von benachbarten Bereichen aufgenommen werden muss (siehe Bewertung in [5] und [6]). Wenn man davon ausgeht, dass die Spannungsmonitorstationen nur einen „begrenzten Einblick“ in den gebirgsmechanischen Zustand der Pfeiler gestatten (tatsächlich sind wesentlich mehr Tragelemente, z.B. sehr ausgeprägt Pfeiler 4/5, bruchhaft beansprucht) und meist im Bereich der noch stützenden Schwebenringe installiert sind (in halber Kammerhöhe ist die Entfestigung noch stärker), sind keine Reserven für das Systemtragverhalten der Südflanke mehr erkennbar. Solange sich keine wesentlichen Versatzdrücke aufbauen, ist von einer zunehmenden Instabilität auszugehen.

3.3 Versatzdruckgeber in den Abbauen

Die Positionen der Versatzdruckgeber können Anlage 10 entnommen werden. Die Druckgeber sind vorwiegend im oberen Drittel der Abbaue lokalisiert und messen in vertikaler, horizontal streichender sowie horizontal querschlägiger Richtung. Die als repräsentativ ausgewählten Verläufe in den Anlagen 11 bis 13 weisen in querschlägiger Richtung den stärksten Versatzdruck und in den beiden anderen Richtungen oft signifikant geringere Beträge aus. Entgegen der Verschiebung der Südflanke baut sich in querschlägiger Richtung ein Widerstand auf, der Beträge von 1 MPa oder mehr erreichen kann. Jedoch sind die Versatzkörper noch nicht in der Lage, solche Spannungen über längere Zeit abzutragen. Infolge des vorhandenen Porenraumes kann der Versatz quer zum Lasteintrag ausweichen oder bei vorhandenen Verkrustungen (durch Einfluss von Salzlösungen) seitlich wegbrechen. Im Bereich der Firstspalte ist ohnehin ein Ausweichen in vertikaler Richtung möglich. Die gemessenen diskontinuierlichen Verläufe bzw. die Versatzdruckabfälle lassen sich auf solche Ausweichprozesse zurückführen.

Trotzdem ist seit dem Jahr 2005 bzw. 2006 an nahezu allen Gebern ein Lastaufbau gegeben, der vorher noch nicht nachweisbar war. Das hat entscheidende Konsequenzen für die hier zu diskutierenden numerischen Prognoserechnungen: Bis 2006 konnte in den Abbauen nur von einem Versatzdruck in Höhe des Eigengewichtes (im Sohlenniveau eines Abbaus 0,13 MPa) ausgegangen werden. Dieser Versatzdruck war in den in [2] und [3] vorgestellten Rechenfällen zu gering, um bei den auflaufenden Entfestigungs- und Bruchprozessen in den

Pfeilern diese wirksam zu stützen. Es kam ab 2014 zu einem zunehmenden Tragfähigkeitsverlust und damit einer Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten. Aus den in den Anlagen 11 bis 13 dargestellten Kurven ergeben sich jedoch gegenwärtig (3 Jahre später) doppelt so hohe Versatzdrücke bis zu Beträgen > 1 MPa, die sich in den nächsten Jahren mit den Deckgebirgsverschiebungen weiter aufbauen werden. Aus den neuen In-situ-Befunden resultieren neue Prognoserechnungen, die im Kapitel 4 diskutiert werden.

3.4 Mikroseismische Messungen

Die mikroseismische Überwachung im Bergwerk Asse besteht zur Zeit aus 24 Stationen. Es wird in einem Frequenzbereich von 30 bis 1500 Hz gemessen. Die Lokalisierung der Ereignisse ist mit einer Genauigkeit von etwa 2 m möglich.

Aus der Vielzahl von Darstellungen der Ereignisse in vertikalen und horizontalen Schnitten soll im vorliegenden Kontext nur Bezug auf die Ereignisse des Messzeitraumes 10/2007 bis 09/2008 im Schnitt 2 aus [5] genommen werden. Die Symbole im linken Teil der Anlage 14 repräsentieren Magnituden von -3 bis 0. Das Cluster mit gehäuften Ereignissen im oberen Teil der Südflanke zeigt die Schädigungsprozesse in der gering mächtigen Steinsalzbarriere (in diesem Bereich liegt auch die primäre Zutrittsstelle für die Deckgebirgslösungen in das Grubengebäude) und im unmittelbar angrenzenden Rötanhydrit. Weiterhin ist eine Ausrichtung entlang der streichenden Störungen im Oberen Buntsandstein erkennbar. Diese Befunde sind seit Jahren bekannt und stimmen mit den in [2] berechneten Scherdeformationen (rechte Abbildung in Anlage 14, Vertikalschnitt durch die Pfeilermitte) in der Größenordnung von > 6 % überein. Im Messzeitraum 10/2007 bis 09/2008 wurden erstmalig auch Ereignisse in der Verlängerung der streichenden Störung S2a in der Steinsalzbarriere nachgewiesen. Im Zusammenhang mit dem relativ starken Ereignis an der Schichtgrenze zum Unteren Muschelkalk ergibt sich die Besorgnis, dass sich die mit der Seismik angezeigten Mikrorisse in der Steinsalzbarriere in Richtung der 700-m-Sohle zu Makrorissen vereinigen und zu hydraulischen Konsequenzen (Anschluss des hydraulisch leitfähigen Muschelkalks über die Störung S2a) führen. Ein solcher Prozess sollte durch eine möglichst weitgehende Resthohlraumverfüllung in den Abbauen abgemindert werden. Das Rechenergebnis für diesen Teufenbereich in der rechten Abbildung weist mit Scherdeformationen von 2 bis 4 % bei minimalen Druckspannungen > 4 MPa auf volumetrische Auflockerungen von < 1 % hin, eine Permeation von Salzlösungen über lokale Risse kann jedoch bei weiterer Schädigung mittelfristig nicht ausgeschlossen werden.

3.5 Ausbreitung der Deckgebirgslösung und noch vorhandene Resthohlräume

Neben den seit 2005/2006 angezeigten Versatzdrücken muss in den hier vorgelegten Prognoserechnungen auch der gebirgsmechanische Einfluss der sich ausbreitenden Deckgebirgslösung berücksichtigt werden. Die Fotos in den Anlagen 15 und 16 belegen, dass auf der über den Einlagerungskammern aufgefahrenen 725-m-Sohle die Deckgebirgslösung eine weit reichende Befeuchtung verursacht hat. Die Lösungsansammlungen waren Ende 2008 am Pfeiler 2/3 und vor dem Blindschacht 2 zu sehen. In der durch den Versatz und die Pfeiler am nördlichen Abbaurand aufgefahrenen Strecke (Auffahrung 2003 bis 2006) sind an der Firste die Stalaktiten und auf der Sohle die Salzverkrustungen sichtbar. Damit ist ein Feuchtigkeitseinfluss über eine streichende Länge von mindestens 160 m belegt, der eine Berücksichtigung im vertikalen 3D-Rechenmodell rechtfertigt.

Auch auf der höheren 700-m-Sohle waren, jedoch mit geringerer räumlicher Erstreckung, Hinweise auf die Permeation der Deckgebirgslösung durch den Versatz sowie Risszonen in den dilatanten Schweben (Stalaktiten im rechten Bild in Anlage 17) und Konturbereichen erkennbar. Auf der 700-m-Sohle waren weiterhin vergleichsweise große offene Abstände von den Versatzkörpern zur Firste und zu den Stößen auffallend (linkes Bild in Anlage 17), die, wie oben ausgeführt, unverzüglich verfüllt werden sollten.

Auf der 750-m-Sohle werden gemäß [7] seit einigen Jahren Deckgebirgslösungen nachgewiesen. Die an verschiedenen Lokationen gefassten Mengen sind in Anlage 18 dargestellt. Im Abbau 9 (750 mS) wurden Ende letzten Jahres ca. 100 l pro Tag aufgefangen und insgesamt hat sich für die 725- und 750-m-Sohle bis Ende 2008 die gefasste Menge auf etwa $1,7 \text{ m}^3$ pro Tag erhöht.

In Anlage 19 ist der auf Basis dieser Befunde im vertikalen 3D-Modell (ausführliche Modellbeschreibung in [2]) modellierte Durchfeuchtungsbereich von der Sohle 700 m bis 15 m unterhalb der Sohle 750 m dargestellt. Bis in eine Sohlentiefe von 15 m wurden mit vertikalen Bohrungen im Rahmen der Standorterkundung für die Strömungsbarrieren auf der 750-m-Sohle Salzlösungen nachgewiesen. In dem Teufenbereich werden im Rechenprogramm für die Modellelemente im Steinsalz die Scherdeformation (Vergleich mit der Gesamtdeformation des Triaxialversuches), volumetrische Auflockerung (Dilatanz) und Zugdehnung abgefragt und bei Überschreitung eines der in Anlage 19 aufgeführten Kriterien ein Feuchtekriechen mit einem Beschleunigungsfaktor von 5 angesetzt. Dieser Faktor ist in [2] mittels Laborversuchen belegt. Eine Verringerung der Festigkeit des Steinsalzes oder eine Veränderung der Versatzparameter erfolgt nicht. Die Anwendung der Kriterien und die Initialisierung des Feuchtekriechens laufen im Rechenprogramm ab Juni 2007. Ab diesem Zeitpunkt hat sich

gemäß Anlage 18 die auf der 725 und 750 mS täglich gefasste Deckgebirgslösungsmenge nach einer vorherigen konstanten Phase wieder deutlich erhöht.

In der weiteren offenen Betriebsphase ist zu vermeiden, dass sich in den Rissystemen, in denen eine Lösungspereation stattfindet, erhöhte Lösungsdrücke aufbauen. Entsprechend der in [8] durchgeführten Laborversuche kann unter erhöhten Salzlösungsdrücken, die sich der minimalen Druckeinspannung nähern, aufgrund von salzlösungsdruckinduzierten physikalisch-chemischen Prozessen im Kristallgefüge des Steinsalzes bzw. an der Spitze von Rissen ein Beschleunigungsfaktor für das Feuchtekriechen auftreten, der wesentlich über dem in den Modellrechnungen angesetzten Faktor von 5 liegt. Der Beschleunigungsfaktor wurde in [2] für eine drucklose Lösungseinleitung in dilatante Steinsalzprüfkörper gefunden. Die folgenden Prognoserechnungen gelten für Systemzustände unter sich aufbauenden Salzlösungsdrücken, die mit einer Eskalation der Zutrittsmengen verbunden sind, nicht.

4 Prognoserechnungen mit dem vertikalen 3D-Modell

4.1 Bewertung der bisher vorliegenden Prognosen bis 2016

Das in Anlage 20 dargestellte dreidimensionale Rechenmodell besitzt eine Breite von 6,3 km und eine Höhe von etwa 2,5 km. Die streichende Erstreckung umfasst eine halbe Pfeilerbreite von 6 m und eine halbe Abbaulänge von 30 m. Das Modell liegt im geologischen Vertikalschnitt 2 und ist somit repräsentativ für das Maximum der Deckgebirgsverschiebungen, d.h. die gebirgsmechanische Maximalbeanspruchung. Alle weiteren Modellparameter und Stoffgesetzbeschreibungen sind im Bericht [2] enthalten. Die mit diesem Bericht übergebenen Prognoserechnungen bis 2016 zeigten für die weitere offene Betriebsphase ab 2014 einen zunehmenden Tragfähigkeitsverlust mit einer Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten (siehe Anlagen 21 und 22). Die Erhöhung zum Zeitpunkt 2014 wurde in den IfG-Berichten nicht als Zusammenbruch der Südflanke interpretiert, sondern als Ende des gebirgsmechanisch zulässigen Prognosezeitraumes, wenn die Forderung degressiver oder zumindest nicht ansteigender Verformungsraten erhoben wird. Diese Forderung wurde hilfsweise erhoben, da an der Südflanke die üblichen in der Salzmechanik zur Analyse der Stabilität und Barrierewirkung des Gebirges gebräuchlichen Kriterien bereits verletzt sind und langsam ablaufende Bruchprozesse bewertet werden müssen. Die damals empfohlene begleitende Begutachtung mit einer Überprüfung und ggf. Korrektur der Prognoserechnungen auf Basis von neuen In-situ-Messwerten der Standortüberwachung ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

4.2 Prognoserechnungen bis 2020 mit höheren Versatzdrücken

Wie im Kapitel 3 ausgeführt, konnte im Bericht [2] aus 2006 in den Abbauen nur von einem Versatzdruck in Höhe des Eigengewichtes (im Sohlenniveau eines Abbaus 0,13 MPa) ausgegangen werden. In den Modellrechnungen erfolgte ab den Zeitpunkten des Versatzeinbringens in den Abbauen die Vorgabe von Spannungsrandbedingungen normal zur Sohle mit 0,2 MPa und normal zu den Stößen unter Ansatz eines Seitendruckkoeffizienten von 0,5 mit steigender Höhe abnehmend. Unterhalb der Schwebenringe wurde kein Versatzdruck angesetzt. Dieser modellierte Versatzdruck war zu gering, um bei den sich akkumulierenden Schädigungen in den Pfeilern diese wirksam zu stützen.

Aus den in den Anlagen 11 bis 13 dargestellten Messkurven ergeben sich jedoch gegenwärtig (3 Jahre später) wesentlich höhere Versatzdrücke, die jetzt als neue Modellrandbedingung anzusetzen sind. Da auf Basis der unregelmäßigen Druckverläufe (Ausweichprozesse aufgrund der Porositäten > 40 % bzw. offener Spalte zur Firste und zu den Stößen) ein Kurvenausgleich und eine Prognosefunktion nicht sinnvoll waren, wurden stattdessen die in Laborversuchen am IfG ermittelten Versatzdruckkurven (Kompaktionswiderstand als Mittelwert der 3 Hauptspannungen in Abhängigkeit von der Kompaktion) für Ronnenbergversatz bzw. den im Bergwerk angefallenen Eigenversatz verwendet.

In den neuen Rechnungen wird fortlaufend die volumetrische Konvergenz der Abbaue ermittelt und der Kompaktion der Versatzkörper gleichgesetzt. Der sich aus den Versatzdruckkurven ergebende Versatzdruck wirkt normal zur Sohle und zu den Stößen. Die Berücksichtigung der mechanischen Konsequenzen offener oder geschlossener Firstspalte erfolgte mit 2 unterschiedlichen Rechenfällen, bei denen vertikal von unten auf die Schweben bzw. Schwebenreste kein Druck bzw. ein geringer Stützdruck von 1 bar wirkt.

Da die tieferen Sohlen des Bergwerkes (725- bis 775-m-Sohle) bereits in den 1980er Jahren mit Eigenversatz gefüllt wurden, mussten die Modellrechnungen für diese Zeit wieder neu begonnen und mittels der Simulation der Schwebenbrüche an die gemessenen Deckgebirgsverschiebungen angepasst werden. Ab der 700-m-Sohle nach oben wurden in den Abbauen die Versatzdruckkurven des Ronnenbergversatzes verwendet. Im Carnallitbaufeld kamen gleichfalls die Parameter des Eigenversatzes zur Anwendung.

Die neue Modellierung führt zu dem Ergebnis, dass gegenwärtig in den Abbauen der Südflanke mit Ronnenbergversatz normal zur Sohle und zu den Stößen Drücke bis 0,2 MPa wirken und in den Abbauen mit Eigenversatz Drücke von etwa 0,9 MPa. Diese Lastrandbedingungen als Mittelwerte der 3 Hauptspannungen im Versatz stimmen gut mit den gegenwärtigen Messwerten überein. Bis zum Ende des Prognosezeitraumes 2020 steigen die berech-

neten Drücke im Ronnenbergversatz bis auf maximal 0,7 MPa (700 mS) bzw. im Eigenversatz bis auf 1,3 MPa (750 und 775 mS) an.

Die resultierenden Deckgebirgsverschiebungsraten für den Südstoß auf der 553- und 700-m-Sohle, jeweils als Prognose mit und ohne Feuchtekriechen in dem in Anlage 19 markierten Gebirgsbereich, für den Rechenfall ohne Unterstützung der Schwebenreste sind in den Anlagen 23 und 24 sowie die entsprechenden Rechenfälle mit einer Unterstützung der Schwebenreste mit einem Normaldruck von 1 bar in den Anlagen 25 und 26 dargestellt. Der in dem Rechenfall in [2] ausgewiesene starke Anstieg der Deckgebirgsverschiebungsraten zum Zeitpunkt 2014 wird aufgrund der generell höheren Versatzdrücke nicht mehr festgestellt, jedoch liegen die Prognoserechnungen für die 700-m-Sohle unter Feuchtekriechen über den alten Prognosen. Der bisherige Erfahrungskorridor wird dabei nur geringfügig überschritten. Generell zeigt sich in allen Rechnungen infolge der Unterstützung der Schwebenreste mit 1 bar eine stabilisierende Wirkung und daraus resultieren geringere Verschiebungsraten als ohne Unterstützung. Dieser gebirgsmechanisch positive Effekt entspricht näherungsweise einer Firstspaltverfüllung, im Kapitel 5 werden die Auswirkungen jedoch in Modellierung der konkreten betrieblichen Planung dieser Maßnahme detailliert untersucht.

Es kann keine Gewichtung der Prognoserechnungen vorgenommen werden, aufgrund des festgestellten Einflusses der Deckgebirgslösungen sind die Obergrenzen der Prognosekorridore genauso gerechtfertigt wie die Untergrenzen. In den Modellrechnungen wurden im Vergleich zur Prognose aus dem Jahr 2006 nur die Versatzdrücke geändert bzw. die Simulation des Feuchtekriechens (Anlage 19) vorgenommen. Die signifikanten Unterschiede in den Prognosen sind mit der hohen Sensitivität des Tragsystems an der Südflanke gegenüber geringen Änderungen in den Stützkräften zu erklären. Solche ausgeprägten Sensitivitäten sind aus der Gebirgsmechanik bekannt für Tragsysteme, die sich im Bruch- bzw. Nachbruchzustand befinden.

Aus den gleichen Rechenfällen lassen sich auch die Pfeilerstauchungsraten für das Verschiebungsmaximum der 553- und 700-m-Sohle ableiten und mit den quartalsweise von der Markscheiderei vorgelegten Messwerten vergleichen. Zu diesem Zweck wurden aus den jährlichen Speicherständen des vertikalen Rechenmodells für die jeweiligen Sohlen in halber Kammerhöhe und streichender Pfeilermitte (Position analog zu den Extensometern) die Knotenpunktverschiebungen entnommen. Die Berechnung der Stauchung der Messbasis auf den beiden Sohlen in halber Kammerhöhe erfolgte in den Schritten

- Festlegung von zwei Koordinaten am südlichen und nördlichen Pfeilerrand als Referenzpunkte für die jeweiligen Messpunkte der Extensometer.
- Berechnung des Abstandes im Januar 1981 (entspricht etwa dem Einbauzeitpunkt der Extensometer). Der mittlere Abstand beträgt etwa 40 m.
- Jährliche Berechnung der neuen Knotenpunktkoordinaten infolge der Knotenpunktverschiebungen (in vertikaler und querschlägiger Richtung) und Neuberechnung des Knotenpunktabstandes.
- Ableitung der Pfeilerstauchungsrate aus den jährlichen Differenzen des Knotenpunktabstandes.

In den Anlagen 27 und 28 sind die berechneten jährlichen Stauchungen der Messbasis, die im Januar 1981 eingerichtet wurde, dargestellt. Die berechneten Pfeilerstauchungsraten stimmen für Ende 2008 sehr gut mit den gemessenen Werten (Einzelwert als Symbol) überein. In Abhängigkeit von der Stützung der Schweben bzw. Schwebenreste ergeben sich für beide Rechenfälle wieder die entsprechenden Prognosekorridore.

5 Zustandsanalyse und Prognoserechnungen mit dem horizontalen 3D-Modell

5.1 Modellbeschreibung

5.1.1 Rechencode

Das für die gebirgsmechanische Modellierung verwendete Rechenprogramm *FLAC^{3D}* (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, Itasca Consulting Group) wurde speziell für geotechnische Probleme entwickelt. Es bestehen über mehrere Jahrzehnte praktische Anwendungserfahrungen bei der Modellierung gebirgsmechanischer Problemstellungen, wobei das Rechenprogramm durch Einbau spezieller Stoffansätze kontinuierlich weiterentwickelt und den praktischen Anforderungen angepasst wurde. So wurde z. B. zur Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Salzgesteine das am IfG entwickelte, in [1] und [2] vorgestellte visko-elasto-plastische Stoffmodell zur Beschreibung von Entfestigung und Dilatanz als „user defined model“ (DLL-Modul) in das Programmsystem eingebunden.

Der Rechencode *FLAC^{3D}* nutzt die Methode finiter Differenzen. Wie bei der Methode finiter Elemente (FEM) wird die zu untersuchende Struktur als Modellkörper in eine Vielzahl von Elementen mit zugehörigen Knotenpunkten unterteilt. Jedes einzelne dieser Elemente reagiert entsprechend seines diskret vorgegebenen Stoffverhaltens auf die angreifenden Kräfte bzw. vorgegebenen Randbedingungen. Bei Verletzung der Gleichgewichtsbedingungen gerät das System aus dem Gleichgewicht und steuert entsprechend der gegebenen physikali-

schen Möglichkeiten einem neuen Gleichgewichtszustand zu, der durch die Lösung der vollständigen dynamischen Bewegungsgleichungen mit Hilfe des expliziten LAGRANGE'schen Lösungsalgorithmus für jedes Element in Einklang mit den Nachbarelementen berechnet wird. Die Wirkung großer Deformationen, die insbesondere im Zusammenhang mit dem Kriechverhalten von Steinsalz eine entscheidende Rolle spielen, wird im Code berücksichtigt.

Im Programmcode ist eine eigene Programmiersprache (FISH) implementiert, mit deren Hilfe sowohl notwendige Modifikationen programmierter Stoffansätze und Programmabläufe, als auch eine spezielle Auswertung berechneter gebirgsmechanischer Größen (Zustandsbewertung) realisiert werden können.

5.1.2 Modellgeometrie

Das in Anlage 29 dargestellte Berechnungsmodell zeigt eine Draufsicht auf eine Scheibe mit einer Höhe von 21 m, die quer zu den steil einfallenden Schichten des Salzsattels und Deckgebirges orientiert ist. Es umfasst den Salzstock mit dem sich darin befindlichen Grubengebäude sowie die triassischen Deckgebirgsschichten, die südlich und nördlich an den Salzstock angrenzen. Das Modell wird im Süden durch die Schichtgrenze vom Oberen Muschelkalk zum Keuper und im Norden mit dem Unteren Buntsandstein begrenzt. Die mittlere modellierte Mächtigkeit des nahezu senkrecht zur Modellebene einfallenden nichtsalinaren Deckgebirges beträgt im Vorfeld der Südflanke des Salzstockes ca. 400 m und im Bereich der Nordflanke 660 m. Die Lage der Abbaukammern entspricht geometrisch der 616-m-Sohle, die simulierten gebirgsmechanischen Reaktionen sind aber repräsentativ für den mittleren bis oberen Teil der Südflanke. Im Teufenbereich der 616 mS wird das Salinar mit einer mittleren Nord-Süd-Ausdehnung von 480 m modelliert, woraus eine querschlägige Gesamtmodellerstreckung (in Nord-Süd-Richtung) von 1540 m resultiert. In streichender (ost-westlicher) Richtung besitzt das Berechnungsmodell eine Ausdehnung von 2055 m.

Das Salinar wird im Schnittniveau in zwei geologische Homogenbereiche aufgeteilt, die dem Carnallitlager und dem Steinsalz entsprechen. Dabei wird nicht zwischen Leine- und Staßfurt-Steinsalz unterschieden, auch bleibt der im Schnittniveau liegende schmale A3/T3-Horizont unberücksichtigt.

Entlang der Südflanke werden die Kammerreihen 1 bis 9 der 616 mS modelliert. Die Abbaukammern sind im Modell mit einer mittleren Höhe von 15 m angenommen. Die Schweben zwischen den Abbausohlen besitzen eine Mächtigkeit von 6 m. In vertikaler Richtung beschreibt das Modell ein vollständiges Kammer-Schweben-System, welches durch die Abbau-

kammern und die jeweils oben bzw. unten angrenzende Schweben gebildet wird. Da es aus Symmetriegründen genügt, jeweils nur eine halbe Schweben zu modellieren, d. h. die Schweben nur bis zu ihrer Mitte (bis zur „neutralen“ Faser) abzubilden, ergibt sich eine vertikale Gesamtmodellstärke von 21 m (Anlage 30).

Die Abbaureihen werden durch Pfeiler voneinander getrennt. Bis auf den 20 m breiten Zentralpfeiler, der sich zwischen der 4. und 5. Abbaureihe befindet, besitzen alle anderen Pfeiler eine Breite von 12 m. Die Abbaukammern sind in querschlägiger Richtung einheitlich 40 m breit. In streichender Richtung variieren die Kammerlängen entsprechend des Risswerkes mit:

Kammerreihen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Länge [m]	48	48	64	56	56	56	60	61	68

Daraus folgt eine modellierte Baufeldlänge im Streichen von 621 m. Das Baufeld liegt in der Modellmitte, so dass bei einer Gesamtmodelllänge von 2055 m östlich und westlich des Abbaufeldes ein nicht durchbauter Bereich von 717 m existiert, auf den sich, nach Auffahrung der Abbaukammern, das horizontale Traggewölbe abstützen kann.

Im Bereich des Abbausystems und im angrenzenden Deckgebirge wurde das Modell feinmaschig mit Elementabständen von 1 bis 2 m vernetzt. Da durch Entfestigungsprozesse und die Entwicklung von Scherzonen lokal große Unterschiede im Spannungs- und Verformungsfeld erwartet wurden, die einen wesentlichen Einfluss auf das Festigkeitsverhalten von Tragelementen besitzen, war eine solche feine Diskretisierung erforderlich. Für das gesamte Modell ergab sich daraus eine relativ große Elementanzahl von 370000 Elementen. Weiterhin ist das Netz der Stratigraphie des Deckgebirges und Salinars sowie der Geometrie der Schachanlage angepasst.

5.1.3 Randbedingungen und Grundspannungszustand

Alle Modellrandflächen, mit Ausnahme der südlichen Grenze, welche die Schichtgrenze zwischen Oberem Muschelkalk und Keuper markiert, sind in Richtung der Flächennormalen verschiebungsbehindert. Auf die freie Modellrandfläche des südlichen Modellrandes wirkt eine Horizontalspannung von $\sigma_{xx} = 13 \text{ MPa}$. Diese Spannung entspricht dabei nicht einer theoretischen aus dem Überlagerungsdruck und dem elastischen Seitendruckkoeffizienten resultierenden Horizontalspannung, die in diesem Teufenniveau deutlich geringer wäre. Um-

fangreiche numerische Untersuchungen zum Grundspannungszustand, die im Rahmen unterschiedlicher Stabilitätsuntersuchungen mit zwei- und dreidimensionalen Vertikalmodellen in den letzten Jahren durchgeführt worden sind, haben vielmehr gezeigt, dass die Horizontalspannung in Nord-Süd-Richtung bis weit in das Vorfeld der Salzstockflanke durch den Spannungszustand im Salinar überprägt und damit angehoben wird. In streichender Richtung wirkt dagegen im Deckgebirge ein weitgehend unbeeinflusster Spannungszustand. Die Spannungsrandbedingung sowie die Komponenten des Grundspannungszustandes, die dem Horizontalmodell als Anfangsspannungszustand vorgegeben wurden, sind der Berechnung zum Grundspannungszustand aus [2] entnommen.

Folgender Grundspannungszustand wurde initialisiert:

Im Salinar:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = 13 \text{ MPa}$$

Im Deckgebirge:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} = 13 \text{ MPa} \quad \sigma_{yy} = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_{zz} = 6,1; \quad \nu = 0,32$$

5.1.4 Stratigraphie, Stoffgesetze und Materialparameter

Für das gesamte Modell kam das visko-elasto-plastische Stoffmodell nach [9] zur Anwendung. Im Bereich des Salzstocks wurde zwischen Kalilager und Steinsalz unterschieden. Die verschiedenen Steinsalzvarietäten Älteres Steinsalz, Na₂, Jüngeres Steinsalz, Na₃, und Allersteinsalz, Na₄ lassen sich entsprechend des Festigkeitskatasters [10] mit gemeinsamen Stoffparametern modellieren. Die im Salinar befindlichen Ton- und Anhydritmittel sind aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit und der deshalb zu vernachlässigenden gebirgsmechanischen Bedeutung nicht abgebildet.

Das Deckgebirge wurde in den früheren Modellrechnungen in [2] mit einem bilinearen transversal-isotropen elasto-plastischen Stoffansatz beschrieben. Im vorliegenden Horizontalmodell kommt für das Deckgebirge das gleiche visko-elasto-plastische Stoffmodell zur Anwendung, welches auch für das salinare Gebirge verwendet wurde. Die nunmehr angewendeten kontinuierlich gekrümmten Hüllkurven beschreiben dabei das gleiche Festigkeitsverhalten wie die vorherigen bilinearen Bruchhüllkurven. In Anlage 31 ist diese Modellanpassung dargestellt. Die bilinearen Festigkeitsparameter in den Tabellen 1 bis 3 sind mit den Angaben in

[2] vergleichbar, aber nicht identisch. Im Rahmen der Modellanpassung an die die In-situ-Messwerte für die zurückliegende Betriebsphase war eine geringfügige Modifikation im Rahmen der gegebenen Materialstreuung erforderlich. Wie in [2] wurden auch im Horizontalmodell alle Deckgebirgsschichten mit einheitlichen Parametern belegt. Dies ist gerechtfertigt, da ohnehin eine signifikante Verringerung der Gesteinsfestigkeiten des Katasters [10] auf die infolge der Klüftigkeit geringeren Gebirgsfestigkeiten notwendig ist. In den Tabellen 1 bis 3 ist der Bezug zu den Festigkeiten der Gebirgsmatrix, der Schichtflächen sowie der Großstörungen erkennbar.

Tabelle 1: Materialparameter für die Gebirgsmatrix

Gebirgsmatrix			
Minimale Druckein- spannung < 4 MPa		Minimale Druckein- spannung \geq 4 MPa	
Coh [MPa]	Fric [Grad]	Coh [MPa]	Fric [Grad]
0	46,1	3	33
Anpassung mit visko-elasto-plastischem Stoffmodell			
σ_D [MPa]	σ_{Max} [MPa]	σ_ϕ [MPa]	-
0	73	11	-

Tabelle 2: Materialparameter für die Schichtflächen

Schichtflächen			
Minimale Druckein- spannung < 2 MPa		Minimale Druckein- spannung \geq 2 MPa	
Coh [MPa]	Fric [Grad]	Coh [MPa]	Fric [Grad]
0	25,3	0,2	22
Anpassung mit visko-elasto-plastischem Stoffmodell			
σ_D [MPa]	σ_{Max} [MPa]	σ_ϕ [MPa]	-
0	40	30	-

Tabelle 3: Materialparameter für die Großstörungen

Schichtflächen			
Minimale Druckein- spannung < 3,5 MPa		Minimale Druckein- spannung ≥ 3,5 MPa	
Coh [MPa]	Fric [Grad]	Coh [MPa]	Fric [Grad]
0	21,1	0,2	19
Anpassung mit visko-elasto-plastischem Stoffmodell			
σ_D [MPa]	σ_{Max} [MPa]	σ_ϕ [MPa]	-
0	40	30	-

Im Horizontalmodell werden die Deckgebirgsschichten mit dem visko-elasto-plastischen Stoffansatz mit den beiden Parametersätzen für die Spitzenfestigkeit und die Restfestigkeit modelliert. In der Gebirgsmatrix gehen die Spitzenfestigkeiten nach einer geringen plastischen Deformation von 1,5 % in die Restfestigkeiten über und in den Längs- und Querklüften (siehe Anlage 32) sind diese Restfestigkeiten von vornherein vorgegeben. Die Lage der Längs- und Querklüfte entspricht dem geologischen Risswerk. Der Vorteil der einheitlichen Verwendung des visko-elasto-plastische Stoffmodells liegt in der Simulation kontinuierlicher spannungs- und verformungsabhängiger plastischer Entfestigungsvorgänge nun auch für das Deckgebirge, was bisher nicht möglich war.

Die nachstehende Tabelle 4 gibt die visko-elastischen Parameter für alle Gebirgsbereiche an. Das plastische Verhalten des Steinsalzes und Carnallitits ist in den Anlagen 33 bis 36 dokumentiert (aus [1] unverändert übernommen).

Tabelle 4: Visko-elastische Parameter im Horizontalmodell

Schicht	Stoffgesetz	Stoffparameter			
		K [GPa]	G_M [GPa]	η_M [MPa·h]	m [MPa ⁻¹]
Steinsalz	Visko-elasto-plastisch mit Entfestigung und Dilatanz	16,66	10	$3 \cdot 10^8$	0,25
Carnallitit	Visko-elasto-plastisch mit Entfestigung und Dilatanz	20,5	7,4	$1,39 \cdot 10^9$	0,16
Deckgebirge	Visko-elasto-plastisch mit Entfestigung	13,3	6,0	$1e38$	-
Störungen	Visko-elasto-plastisch mit Entfestigung	4,0	2,0	$1e38$	-

Der Wert von $\eta_M = 1 \cdot 10^{38} \text{ MPa} \cdot \text{h}$ für das Deckgebirge bzw. die Störungen bedeutet, dass das Kriechmodell ausgeschaltet ist. Das visko-elasto-plastische Stoffmodell reduziert sich dadurch auf ein verallgemeinertes nichtlineares MOHR-COULOMB'sches elasto-plastisches Entfestigungsmodell [12], mit dem Deckgebirge und Störungen beschrieben werden.

5.1.5 Hydraulische Lastannahmen im Deckgebirge

Der Konvergenzprozess im Abbausystem der Südflanke ist mit einem zusätzlichen Lastabtrag auf das unmittelbare Deckgebirge verbunden, der auch dort zu Festigkeitsüberschreitungen führt. Das Deckgebirge besitzt zumindest lokal in unmittelbarer Nähe zum Bergwerk entsprechend der ingenieurgeologischen Befunde (insbesondere in der Bohrung Remlingen 6) einen hohen Zerlegungsgrad mit geringen Gebirgsfestigkeiten. Infolge der triaxialen Einspannung im Gebirge sind die Trennflächen zusammengepresst (überwiegend auch mineralisiert) und der effektive Porenraum in den Trennflächen ist gering. Gemäß den hydraulischen Modellannahmen wird von einer Sättigung der interkonnektiven Transportpfade in den Trennflächen und Porenräume in der Gesteinsmatrix mit Deckgebirgslösung ausgegangen. Da mit dem nachlassenden Tragwiderstand im Abbausystem der Südflanke durch Kriechbrüche und Entfestigung ein zusätzlicher Lastabtrag auf das unmittelbare Deckgebirge verbunden ist, muss bei der geringen Gebirgsfestigkeit von einer schrittweisen Öffnung der geschlossenen und mineralisierten Trennflächen und damit einer Erhöhung des effektiven Porenraumes ausgegangen werden. In der logischen Konsequenz ergibt sich ein Zusammenhang zwischen dem effektiv wirksamen Zerlegungsgrad und der mechanischen Wirkung der Deckgebirgslösung im Gebirge. Es wird vorausgesetzt, dass der Lastabtrag auf das unmittelbare Deckgebirge, verbunden mit einer Entspannung und Bewegung in Richtung Südflanke, eine Öffnung der Trennflächen und eine weitere Erhöhung des effektiven Zerlegungsgrades nach sich zieht.

Die hydraulisch-mechanischen Konsequenzen sind plausibel, wenn man sich eine einzelne Trennfläche vorstellt, in der ein Lösungsdruck wirkt (tatsächlich sind Trennflächen in unterschiedlichen Raumrichtungen angelegt und untereinander verbunden): Solange wie noch Materialbrücken existieren, kann der Lösungsdruck nur partiell auf der Oberfläche wirken und die resultierende Kraftwirkung ist verringert. Die Trennfläche wird noch teilweise über die Materialbrücken zusammengehalten. Mit steigender effektiver Durchtrennung erhöhen sich die resultierende Kraftwirkung und damit die hydraulisch bedingte mechanische Beanspruchung des Gebirges. Es kommt zur weiteren Öffnung ursprünglich nur angelegter und noch geschlossener Klüfte, teilweise auch zur Neubildung von Rissen, und damit zu einer Verringerung des Zusammenhaltes und der Eigentragsfähigkeit der Gebirgsschichten.

Das Ansteigen des effektiven Zerlegungsgrades bzw. der Verlust von lastabtragenden Materialbrücken erhöht die Fläche, auf der ein Lösungsdruck wirken kann. Bei einer effektiven Durchtrennung $\ll 1$ bzw. einer geringen effektiven Porosität im Gebirge (Summe aus interkonnekktivem Porenraum in den Trennflächen und in der Gesteinsmatrix) kann entsprechend dieser Hypothese auch vorher schon eine vollständige Sättigung vorliegen und ein hydraulischer Druck entsprechend der anstehenden Gradienten wirken, die Wirkung des hydraulischen Druckes ist jedoch noch vernachlässigbar klein. Das bedeutet, das Deckgebirge kann auch vor der Auffahrung des Bergwerkes schon fluidgefüllte Poren und Klüfte besitzen und muss nicht vollständig „trocken“ sein. Unter diesen Modellannahmen muss für die in den 1980er Jahren einsetzende hydraulische Wirkung kein Zuflussweg nachgewiesen werden, sondern es werden, eine ständige Sättigung und nachfließende Deckgebirgslösung vorausgesetzt, nur die mechanisch am stärksten beanspruchten Deckgebirgsbereiche mit hydraulischen Drücken beaufschlagt.

In (indirekter) Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad des an der Südflanke anstehenden Deckgebirges wurden auch im Horizontalmodell, vergleichbar zu [2], Fluiddrücke in die betroffenen Bereiche der Deckgebirgsschichten eingeschrieben. Die für diesen Zweck programmierte FISH-Routine überprüfte regelmäßig, gekoppelt an die Zeitschritte der Berechnung, die akkumulierte Scherdeformation jedes Elements im Deckgebirge und initialisierte bei Überschreitung des als kritische Grenze definierten Wertes von 4,5 % und gleichzeitiger Verletzung des Minimalspannungskriteriums in der betroffenen Zone einen der Teufenlage und Dichte von NaCl-Lösung entsprechenden hydraulischen Druck. In Bezug auf den effektiven Zerlegungsgrad von Klüften oder in Scherbändern wird die Gewichtung des Fluiddruckes über einen „Wirkfaktor für strukturelle Integrität WF“ gesteuert. Es handelt sich hierbei um einen Abminderungsfaktor für den Fluiddruck entsprechend des zur Verfügung stehenden Porenraumes bzw. Rissinventars als Angriffsfläche für einen hydraulischen Druck. Im Unterschied zu den umfangreichen Fallstudien mit differenzierten hydraulischen Wirkfaktoren in [2] war es im Horizontalmodell ausreichend, einen Wirkfaktor mit $WF = 30\%$ als modellspezifisch konstanten Wert festzulegen. Damit war eine „Grundbeweglichkeit“ des Deckgebirges gewährleistet und die Entfestigungs- und Schädigungsprozesse an den Pfeilern und Schweben konnten als Ursache der Deckgebirgsverschiebungen wirksam werden.

5.1.6 Modellierung der Auffahrung und des Versatzeinbringens

Die Auffahrung der 616-m-Sohle im Modell erfolgt, beginnend ab dem Jahr 1943, zeitlich gestaffelt über einen Zeitraum von 7 Jahren. Die nachstehende Tabelle 5 verdeutlicht die dabei modellierte Auffahrungssequenz:

Tabelle 5: Zeitliche Abfolge der Abbauauffahrungen im Horizontalmodell

Kammer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Auffahrungszeitpunkt	1943	1943	1944	1944	1945	1946	1950	1946	1947

Der Hohlraum wird im Modell geschaffen, indem die entsprechenden Netzelemente in ein Nullmodell umgewandelt werden. Da die Vernetzung dabei nicht gelöscht wird, ist es relativ einfach möglich, das Nullmodell zu einem späteren Zeitpunkt mit einem Versatzmodell zu belegen, d. h. den modellierten Hohlraum wieder zu versetzen.

Das Kompaktionsverhalten des trockenen Ronnenbergversatzes (Tabelle 6) wurde aus [1] übernommen:

Tabelle 6: Kompaktionsverhalten von Ronnenbergversatz

volumetrische Deformation ε_v	Versatzdruck p_v
[%]	[MPa]
0	0,0
10	0,2
20	0,7
25	1,2

5.1.7 Modellierung von Schwebenbrüchen

Das Tragsystem der Südflanke besteht aus Pfeilern und Schweben, wobei auch die Schweben trotz ihrer geringen Mächtigkeit von 6 m eine wesentliche gebirgsmechanische Bedeutung besitzen. Sie bewirken einen Lastabtrag und stützen die Pfeiler seitlich. Aufgrund ihrer geringen Mächtigkeit und großen Spannweite (48 m - 68 m) waren sie jedoch von Anfang an stark unterdimensioniert, so dass in der Standzeit von Jahrzehnten Schwebendurchbrüche

eingetreten sind. Diese Schwächung des Tragsystems führte zu einer Zunahme der Pfeilerbelastung, die sich seit Mitte der 1980er Jahre in der deutlichen Zunahme der Pfeilerstauungsraten widerspiegelt.

Im Horizontalmodell wurden in den Schwebenkernen Ende der 1970er Jahre und in den 1980er Jahren signifikante plastische Zugverformungen von 20 % bis > 60 % (siehe Anlage 37) berechnet. Eine solche starke Schädigung repräsentiert den Bruchzustand. Dies muss aber in situ nicht unmittelbar zum Fall des Schwebenkerns führen, sondern kann infolge von Reibungskräften auch erst einige Jahre später erfolgen. Die gegebene Zeitspanne (bzw. zeitliche Unschärfe des vollständigen Tragverlustes im Schwebenkern) wurde genutzt, um mit den Schwebendurchbrüchen eine bestmögliche Übereinstimmung mit den gemessenen Deckgebirgsverschiebungen zu erzielen. Das bedeutet, die Umwandlung von Schwebenelementen in ein Nullmodell erfolgte zeitlich zwar in Anlehnung an die In-situ-Beobachtungen, Hauptintentionen waren jedoch die Anregung für die Deckgebirgsverschiebungen und die Übereinstimmung mit den Messungen im mittleren bis oberen Teil der Südflanke. Im Kapitel 5.1.2 wurde bereits ausgeführt, dass das Horizontalmodell zwar geometrisch der 616-m-Sohle entspricht, die simulierten gebirgsmechanischen Reaktionen aber repräsentativ für den mittleren bis oberen Teil der Südflanke sein sollen. Die Tabelle 7 zeigt die gefundene optimale zeitliche Abfolge der Schwebendurchbrüche im Berechnungsmodell.

In Anlage 38 ist ein Schwebenbruch fotografiert. Der Ronnenbergversatz wurde von 1995 bis 2004 pneumatisch in die Abbaue bis unter die noch existierenden Schwebenringe eingeblasen und füllte danach auch den offenen Hohlraum bis zur nächsthöheren Sohle.

Tabelle 7: Modellierte zeitliche Abfolge der Schwebendurchbrüche im Horizontalmodell

Kammer	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Hangendschwebe	X	X	1986	1985	1980	1978	1988	X	X
Liegendschwebe	X	X	1988	1987	1985	1982	1987	X	X

5.2 Bewertung der Beanspruchungen im Deckgebirge und der Steinsalzbarriere

Mit dem im Kapitel 5.1 dargelegten Modellkonzept wurde die Abbaugeschichte bis zur Gegenwart berechnet. Die gebirgsmechanischen Zustände sollen in den folgenden Ausführungen bewertet werden. In Anlage 39 ist die gute Übereinstimmung der im Horizontalmodell berechneten Verschiebungen des Südstoßes mit den Werten am Polygonmesspunkt 553001

am Südstoß der 553-m-Sohle dargestellt. Der History Plot des Rechenmodells ist in der streichenden Mitte des Pfeilers 5/6 an der südlichen Pfeilerkante sowie in halber Abbauhöhe lokalisiert. Dieser Bereich wird als repräsentativ für die streichende Mitte der Südflanke angesehen, wobei das Horizontalmodell für den mittleren bis oberen Bereich der Südflanke gültig ist. Eine Zuordnung zum genannten, ebenfalls am Südstoß in streichender Baufeldmitte liegenden, Polygonmesspunkt auf der 553-m-Sohle ist deshalb gerechtfertigt. Hinsichtlich der Modellgültigkeit ist es wichtig, dass die Erhöhung der Verschiebungsraten ab Ende der 1980er Jahre richtig wiedergegeben wird. Die Zunahme resultiert im Modell aus den Schwebenbrüchen bei gleichzeitig hoher Mobilität des unmittelbaren südlichen Deckgebirges (tektonische Strukturierung, geringe Gebirgsfestigkeiten infolge hoher Klüftigkeit, Deckgebirgsdrücke in mechanisch hoch beanspruchten Scherzonen oder Trennflächen) und wird auch in situ auf diese Einwirkungen und Prozesse zurückgeführt. Das Rechenmodell wird als validiert angesehen und ist somit auch für eine Prognose geeignet, wenn sich die bis zur Gegenwart gegebenen Rand- und Systembedingungen nicht ändern.

Die Anlagen 40 und 41 zeigen die maximalen und minimalen Hauptnormalspannungen im Horizontalschnitt durch das Rechmodell in halber Abbauhöhe zur Gegenwart. Weiterhin sind die Längs- und Querstörungen sowie der Übergang vom Salzgestein Na3 zum Rötanhydrit so1A skizziert. An der blauen Farbe ($24 \text{ MPa} \leq \sigma_{\max} \leq 30 \text{ MPa}$) der Isoflächenplots an den Baufeldrändern sowie der gelben Farbe ($3 \text{ MPa} \leq \sigma_{\max} \leq 9 \text{ MPa}$) in streichender Baufeldmitte ist in Anlage 40 eine Gewölbewirkung im Aufbau von σ_{\max} im südlichen Deckgebirge zu erkennen. Die minimale Hauptnormalspannung in Anlage 41 zeigt mit $2,5 \text{ MPa} \leq \sigma_{\min} \leq 5 \text{ MPa}$ deutliche Entlastungsbereiche, die im Oberen Buntsandstein und Muschelkalk, der Steinsalzbarriere und im Konturbereich der Abbaukammern sogar partielle Absenkungen auf Beträge $0 \leq \sigma_{\min} \leq 2,5 \text{ MPa}$ erreicht. Damit ist das in der Gebirgsmechanik für die Bewertung der Integrität des Salzgebirges entscheidende Minimalspannungskriterium (σ_{\min} muss größer als p_{Fluid} sein) überschritten. Der aus der Teufe und Dichte einer Steinsalzlösung resultierende Fluiddruck berechnet sich für das Niveau der 616-m-Sohle zu 6,45 MPa.

In den Anlagen 42 und 43 sind die gegenwärtigen Schädigungsbereiche in den Deckgebirgsschichten und die plastischen Scherdeformationen dargestellt. Die gelbe und grüne Farbe in Anlage 42 zeigt die ursprünglich nicht entfestigten Zonen, in denen gemäß Kapitel 5.1 die Spitzenfestigkeiten nach einer plastischen Deformation von 1,5 % in die Restfestigkeiten übergegangen sind und die Längs- und Querklüfte, in denen die Restfestigkeiten von vornherein vorgegeben waren und gegenwärtig weitere Schädigungsdeformationen stattfinden. Die zum Teil sehr großen plastischen Scherdeformationen an den vorgegebenen Großklüf-

ten, aber auch an den Feldesrändern bis zu Beträgen von 40 % in Anlage 43 weisen auf eine Mobilität des Deckgebirges hin, die sich vor allem auf die Querklüfte und die Baufeldränder konzentriert. Die starken Gradienten in diesen Bereichen, insbesondere das Abgleiten an den Querstörungen D3 und D15, sind in den Anlagen 44 (horizontale Gesamtverschiebung in halber Abbauhöhe) und 45 (horizontale Gesamtverschiebung in halber Schwebenhöhe) gut zu erkennen. Es ist kein Unterschied in den Verschiebungsbeträgen in den beiden Anlagen zu erkennen.

Von erheblicher gebirgsmechanischer Relevanz sind weiterhin die plastischen Scherdeformationen in der Steinsalzbarriere, die sich entsprechend Anlage 43 in der Fortsetzung der Querstörungen sowie durch die Scherbeanspruchung an den Feldesrändern einstellen. Wie im Kapitel 3 zu den Daten der Standortüberwachung ausgeführt, wurden durch die Mikro-seismik im Messzeitraum 10/2007 bis 09/2008 solche Schädigungen in der Verlängerung der streichenden Störung S2a in der Steinsalzbarriere tatsächlich nachgewiesen (siehe Anlage 14). Daraus resultiert die Besorgnis, dass sich die aus den Modellrechnungen abzuleitenden und durch die Seismik angezeigten Mikrorisse in der Steinsalzbarriere zu Makrorissen vereinigen und zu hydraulischen Konsequenzen führen. Dieser Prozess sollte durch eine Resthohlraumverfüllung an der Südflanke abgeschwächt werden.

In Anlage 46 sind die im Deckgebirge initialisierten Deckgebirgslösungsdrücke dargestellt. Die ersten Initialisierungen erfolgten in der Modellrechnung unter Anwendung der im Kapitel 5.1 erläuterten Methodik in den 1980er Jahren bei Überschreitung einer akkumulierten Scherdeformation von 4,5 % und gleichzeitiger Überschreitung des Minimalspannungskriteriums mit einem hydraulischen Wirkfaktor von 30 %. Gegenwärtig sind in den Längs- und Querstörungen, aber auch am westlichen und östlichen Baufeldrand Fluidrücke initialisiert. In der Steinsalzbarriere wurden keine Fluidrücke eingeschrieben, eine Permeation entlang der Scherbänder in Anlage 43 ist jedoch nicht auszuschließen und wird mit zunehmender Standzeit wahrscheinlicher, vor allem infolge der deutlichen Verletzung des Minimalspannungskriteriums (siehe Anlage 41).

Die genaue Lokalität und der Betrag der initialisierten Lösungsdrücke sind von den verwendeten Modellkriterien abhängig. Eine Konzentration an den Großstörungen und Feldesrändern wäre aber auch bei anderen Vorgaben gegeben. Entscheidend ist die zur Erklärung der Deckgebirgsverschiebungen aus südlicher Richtung (im Maximum > 5 m) notwendige geringe Eigentragsfähigkeit bzw. hohe Mobilität des Deckgebirges, die nur mit den geringen Gebirgsfestigkeiten bzw. den Lösungsdrücken erreicht wurde.

Die in Anlage 46 gezeigten Fluiddrücke weisen auf Öffnungen und einen Druckaufbau in den Großklüften bzw. neu gebildeten (eng lokalisierten) Scherbändern infolge der bergbauinduzierten Verschiebung des südlichen Deckgebirges hin. Die gemäß [11] bereits geogen vorhandenen, z.B. im Muschelkalk vermuteten, druckbeaufschlagten Salzlösungen sind nicht dargestellt (und auch nicht Gegenstand des gebirgsmechanischen Modells). Diese könnten angeschlossen werden und über das Druckgefälle in Richtung der Südflanke penetrieren.

Die hydrologische Gefährdung in der zukünftigen, noch offenen Betriebsphase wird in [11], Seite 71 folgendermaßen eingeschätzt: „Falls das Tragsystem nicht – wie erwartet – stabilisiert wird, muss damit gerechnet werden, dass die Zutrittsrate der Salzlösungen deutlich zunimmt und die erfolgreiche Umsetzung der Schließungsmaßnahmen erheblich behindert. Weiterhin ist dann auch durch Ausdehnung des Scherdeformationsbereiches mit einem weiteren, stufenweise erfolgenden Anstieg der Zutrittsrate bei gleichzeitiger Abnahme der Sättigung der zugeführten Lösungen zu rechnen.“

Weiterhin in [11], Seite 74: „Sollte eine weitere kurzfristige Stabilisierung des Tragsystems durch die geplanten Schließungsmaßnahmen nicht erfolgen, ist mit dem weiteren Aufreißen von Brüchen aus dem Grubenfeld in den Unteren Muschelkalk hinein zu rechnen. Damit wäre eine Erhöhung der Schüttungsmengen und eine Veränderung des Chemismus der zutretenden Lösungen zu erwarten. Dies würde aufwendige Sicherungsmaßnahmen erforderlich machen, um die Wässer zu fassen und nach über Tage zu pumpen.“

Die diskutierten gebirgsmechanischen Modellergebnisse stützen eine solche Interpretation, wie sie auf Basis der hydrogeologischen Bewertung geäußert wurde.

5.3 Modellierung der Firstspaltverfüllung und Berechnung der Auswirkungen auf die Deckgebirgsverschiebungen

5.3.1 Modellfestlegungen

Das neu entwickelte horizontale 3D-Modell, welches eine gebirgsmechanische Bewertung in der gesamten Ost-West-Erstreckung der Südflanke einschließlich der Baufeldränder gestattet, soll in diesem Kapitel auch für die Modellierung und Prognose der gebirgsmechanischen Auswirkungen einer Firstspaltverfüllung (Phase 1 nach [4]) verwendet werden.

In [4] wurde davon ausgegangen, dass in den Abbauen ein mittlerer Firstspalt von 0,35 m existiert und für ein repräsentatives Fallbeispiel der 574-m-Sohle mit einer konstanten Deckgebirgsverschiebungsrate von 100 mm/a aus südlicher Richtung berechnet, dass es 8,5 Jahre dauert, bis der Firstspalt geschlossen ist. Um diese „Karenzzeit“ von 8,5 Jahren, in der die

Schädigungen in der Südflanke voranschreiten ohne dass sich ein Versatzdruck größer als das Eigengewicht aufbaut, zu nutzen, wurde empfohlen, die Firstspalte mit Sorelbeton zu verfüllen. Dies führt in einer rechnerischen Abschätzung, bei der unmittelbar nach der Firstspaltverfüllung der Versatzdruck als Stützkraft gegen die Deckgebirgsverschiebung wirksam wird, in einem 10jährigen Prognosezeitraum für die streichende Baufeldmitte der 574-m-Sohle im Vergleich zur Entwicklung ohne Verfüllung zu einer Verringerung der sich in 10 Jahren akkumulierenden Verschiebung um 17 bis 18 %.

Das IfG Leipzig erhielt am 09.10.2008 den Auftrag, die Verfüllung der Firstspalte in 2 unterschiedlichen Zeitplänen zu modellieren und die Auswirkungen auf die Deckgebirgsverschiebungen nachzuvollziehen. Die Zeitpläne wurden am 31.10.2008 übergeben und beinhalten eine Firstspaltverfüllung aller Abbaureihen (Variante 1) bzw. nur der Abbaureihen 4 bis 9 (Variante 2). In Anwendung auf das Horizontalmodell, welches etwa im Teufenniveau der 616-m-Sohle liegt, ergibt sich für beide Varianten eine Zeitspanne von etwa Ende 2009 bis Ende 2010.

In Anlage 47 ist in einem Modellausschnitt der Abbaue 4 und 5 die Elementierung der Versatzkörper zu erkennen. Aus der Anzahl von 16 Elementen, bezogen auf eine Abbauhöhe von 15 m, ergibt sich eine Elementhöhe von 0,94 m. Wenn die oberste Elementscheibe als offener Firstspalt betrachtet wird, resultiert daraus eine zu modellierende Mächtigkeit der Sorelbetonscheibe von 0,94 m. Die Fotos der offenen Firstspalte der Abbaue auf der 700-m-Sohle in Anlage 17 belegen, dass auch größere Firstspalte als der in [4] genannte Mittelwert von 0,35 m der Realität entsprechen. In einer weiteren Konkretisierung zu [4], die zu größeren Konsequenzen in den Auswirkungen auf den Verformungsprozess führen wird, muss berücksichtigt werden, dass in vielen Abbauen der Schwebenkern durchgebrochen und bereits mit Versatz gefüllt ist. In Anlage 38 ist diese Situation dargestellt. In den Anlagen 48 und 49 ist zu erkennen, dass dann nur der Firstspalt unter den Schwebenresten für den Sorelbeton zugänglich ist. Um von der nördlichen Hinterfahrung die südlichen Bereiche unter den Schwebenringen zu erreichen, muss entweder der Sorelbeton aus den seitlichen und leichter zugänglichen Bereichen dorthin fließen oder der zentrale Versatzkörper muss durchbohrt werden. Diesbezüglich sind noch technologische Probleme der Fließfähigkeit des Sorelbetons bzw. zum Bohren im Versatz zu lösen. In Tabelle 7 ist aufgeführt, dass im Horizontalmodell in den Abbauen 3 bis 7 der Kern der oberen und unteren Schweben für den Sorelbeton unzugänglich ist.

Mit dem Auftraggeber wurde abgestimmt, für die Materialcharakterisierung zunächst die Festigkeitsparameter der Sorelbetoncharge 44-2 zu verwenden. Dieser Sorelbeton zeichnete

sich durch einen hohen Lösungsanteil von 560 kg/m^3 aus, der eine überdurchschnittliche Ausbreitfähigkeit erwarten lässt, und hatte eine Dichte von 1880 kg/m^3 . Bezüglich des Lösungsanteils ist nachzuweisen, dass bei der Ausbreitung auf dem Versatz keine Anmachlösung in einer Menge austritt, die ein Feuchtekriechen in den dilatanten Pfeilern verursachen könnte. Der Ersatzkompaktionsmodul lag für geringe minimale Druckeinspannungen und die untätigen Konvergenzraten bei etwa 0,5 GPa.

Für diese Charge liegen am IfG die Resultate von 3 Festigkeitsversuchen vor, auf deren Basis in Anlage 50 eine Festigkeitsbeziehung in Abhängigkeit von der Minimalspannung σ_3 festgelegt wurde (Laborfestigkeit ohne Abminderung). Da nach dem Aushärten auf den Versatzkörpern mit unregelmäßigen Oberflächen mit einer Rissbildung und unter dem Einfluss einer weiteren Hohlraumkonvergenz mit einer nachfolgenden signifikanten Entfestigung gerechnet werden muss, erfolgte die Aufstellung einer zweiten Festigkeitsbeziehung mit einer Festigkeitsabminderung nach einer geringen Deformation (in Anlage 50: Geringere Festigkeit durch Rissbildung und bei Beanspruchung nach geringer Deformation Abminderung auf Restfestigkeit). Mit beiden Parametersätzen wurden auf der Basis des (visko)-elasto-plastischen Stoffmodells Fallstudien durchgeführt.

5.3.2 Berechnung der Auswirkungen der Firstspaltverfüllung

In Anlage 51 sind die im Horizontalmodell bis zum Jahr 2020 berechneten Verschiebungen der Südflanke in streichender Baufeldmitte für folgende Fallstudien dargestellt:

- Rechnung ohne Firstspaltverfüllung
- Firstspaltverfüllung in allen Abbaureihen (Variante 1) von Ende 2009 bis Ende 2010, Annahme von Rissbildung und Entfestigung im Sorelbeton
- Firstspaltverfüllung nur in den Abbaureihen 4 bis 9 (Variante 2) von Ende 2009 bis Ende 2010, Annahme von Rissbildung und Entfestigung im Sorelbeton
- Firstspaltverfüllung in allen Abbaureihen (Variante 1) von Ende 2009 bis Ende 2010, Voraussetzung eines kompakten Sorelbetons ohne Rissbildung

Wie die Rechenergebnisse bis 2020 zeigen, ist die Verringerung der Südstoßverschiebung infolge der Firstspaltverfüllung in allen Rechenfällen relativ gering. Die Verschiebungsbeträge in Anlage 51 zum Zeitpunkt 2020 betragen:

- Rechnung ohne Firstspaltverfüllung = 4,24 m
- Firstspaltverfüllung Variante 2, abgeminderte Festigkeit = 4,20 m

- Firstspaltverfüllung Variante 1, abgeminderte Festigkeit = 4,18 m
- Firstspaltverfüllung Variante 1, Laborfestigkeit = 4,08 m

Auch unter der Voraussetzung der Laborfestigkeit, die für die In-situ-Bedingungen als überschätzt angesehen wird, ist für einen etwa 10jährigen Prognosezeitraum eine Verschiebungsverringerung von nur 16 cm gegenüber der Rechnung ohne Firstspaltverfüllung zu verzeichnen. Da eine Rissfreiheit des Sorelbetons nach dem Aushärten unter der Beanspruchung der auflaufenden Hohlraumkonvergenz unwahrscheinlich ist, wird in den weiteren Fallstudien nur noch von der geringeren Festigkeit mit einer Rissbildung und nachfolgenden Entfestigung ausgegangen.

In Anlage 52 sind unter dieser (realistischeren) Festigkeitsannahme die relativen Abminderungen der Verschiebung (Variante 1 und Variante 2 jeweils im Vergleich zur Entwicklung ohne Firstspaltverfüllung) kumulativ gegenüber der Verschiebung im Jahr 2009 angegeben. Diese Darstellungsform wurde gewählt, um einen Vergleich mit den Verschiebungszuwächsen in Tabelle 6.3 in [4] zu ermöglichen. Für einen 10jährigen Prognosezeitraum wurde dort für die streichende Baufeldmitte der 574-m-Sohle im Vergleich zur Entwicklung ohne Verfüllung eine Verringerung der sich in 10 Jahren akkumulierenden Verschiebung um 17 bis 18 % ausgewiesen. Aus Anlage 52 wird eine Verringerung der sich von 2009 bis 2020 akkumulierenden Verschiebung von 4 bis 7 % ersichtlich. Die Ursachen für diese Unterschiede sind, abgesehen von den unterschiedlichen Modellen und Stoffgesetzen, in folgenden Berechnungsvorgaben zu sehen:

- In [4] wurde von einem über die gesamte Abbauquerschnittsfläche zugänglichen Firstspalt ausgegangen. Tatsächlich sind in vielen Abbauen die zentralen Teile mit Versatz gefüllt und nur die Spalte unter den Schwebenresten können mit Sorelbeton gefüllt werden.
- Der in den Rechnungen in [4] als Stützkraft angesetzte Versatzdruck entspricht dem Widerstand von Ronnenbergversatz nach der Schutzfluideinleitung, also nach einer Versatzsackung und Verdichtung. Die Resultate in Anlage 52 basieren auf der Stützwirkung von noch nicht geflutetem Ronnenbergversatz.

Beide Unterschiede führen zu einer Überschätzung der Stützwirkung durch den Versatz.

Neben den im Kapitel 5.2 ausgewiesenen großen Gradienten in den querschlägigen Horizontalverschiebungen (Anlage 44 und 45), lokalisiert an den Querstörungen und Feldesrändern,

weisen auch die horizontalen Zerrungen und Pressungen in streichender Richtung in den Anlagen 53 und 54 auf erhöhte gebirgsmechanische Beanspruchungen in diesen Bereichen hin. Die horizontale Zerrung $> 1 \%$ bei geringer minimaler Druckeinspannung an der Schichtgrenze vom Salinar zum Rötanhydrit am westlichen Rand der Südflanke liefert günstige Voraussetzungen für eine Lösungspermeation. Die Baufeldgrenze fällt mit der Querstörung D3 zusammen. Die Querstörung D15 im Osten liegt dagegen nicht am Baufeldrand, sondern westlich der Abbaue 8 und 9. Die Deckgebirgsverschiebung in Richtung dieser Abbaue verhindert eine Zerrungsbeanspruchung wie im Westen und verursacht eine Pressung an der Schichtgrenze Steinsalz/Rötanhydrit.

Die beiden Beanspruchungsmaxima haben sich in der Rechnung mit der Zunahme der Deckgebirgsverschiebungen ab 1981 bis zur Gegenwart ausgebildet und sind in halber Schwebenhöhe etwas größer. Bis zum Jahr 2020 kommt es zu einer Vergrößerung der Pressung bzw. Zerrung um 40 % bzw. um 20 %. Dabei sind keine Unterschiede zwischen den Varianten 1 und 2 und auch keine Differenzen zur Entwicklung ohne Firstspaltverfüllung festzustellen.

Geringe Abweichungen in der gebirgsmechanischen Beanspruchung zeigen lediglich die Zuwächse der Horizontalverschiebungen (bis 2020, bezogen auf 2009) in den Anlagen 55 und 56. Hier sind keine Unterschiede für die halbe Abbau- bzw. Schwebenhöhe festzustellen. Der unsymmetrische Verschiebungsverlauf ist wieder auf den unterschiedlichen Einfluss der Querstörungen D3 und D15 und die Lage der Abbaue zurückzuführen.

6 Zusammenfassung und Bewertung

Die Bewertung der Daten der Standortüberwachung führt bzgl. der Pfeilerstauchungsraten zu dem Ergebnis, dass ab Ende der 1990er Jahre eine allgemein degressive Tendenz infolge der Versatzmaßnahme (1995 bis 2004) existiert, diese in der letzten Jahresetappe aber schwächer wird. An einigen Messstellen im oberen Bereich der Südflanke und an den östlichen und westlichen Baufeldrändern ist ein deutlicher Anstieg der Raten erkennbar. Dieser Befund wird mit einer zunehmenden Nachgiebigkeit im Zentrum der Südflanke infolge von Bruchprozessen und einer Spannungsumverlagerung auf die Baufeldränder erklärt.

Auch die Spannungsmonitorstationen zeigen zunehmende Rissbildungen insbesondere in der querschlägigen Pfeilermitte. Die hoch belasteten Tragelemente werden in den nächsten Jahren durch Bruchprozesse zunehmend der Beanspruchung ausweichen, die von benachbarten Bereichen aufgenommen werden muss. Wenn man davon ausgeht, dass die Spannungsmonitorstationen nur einen „begrenzten Einblick“ in den gebirgsmechanischen Zustand

der Pfeiler gestatten und meist im Bereich der noch stützenden Schwebenringe installiert sind (in halber Kammerhöhe ist die Entfestigung noch stärker), sind keine Reserven im Tragsystem der Südflanke mehr erkennbar.

Eine gebirgsmechanisch positive Wirkung geht dagegen von den erhöhten Versatzdrücken bis > 1 MPa aus, die seit dem Jahr 2005 bzw. 2006 an nahezu allen Druckgebern angezeigt werden. Das hat entscheidende Konsequenzen für die numerischen Prognoserechnungen, da bis 2005 in den Abbauen nur von einem Versatzdruck in Höhe des Eigengewichtes (im Sohlenniveau eines Abbaus 0,13 MPa) ausgegangen werden konnte.

Mittels der mikroseismischen Überwachung wurden im Messzeitraum 10/2007 bis 09/2008 erstmalig Ereignisse in der Verlängerung der streichenden Störung S2a in der Steinsalzbarriere nachgewiesen. Hier ist zu besorgen, dass sich Mikrorisse in der Steinsalzbarriere in Richtung der 700-m-Sohle zu Makrorissen vereinigen und zu hydraulischen Konsequenzen (Anschluss des hydraulisch leitfähigen Muschelkalks über die Störung S2a) führen. Diese Entwicklung sollte durch eine möglichst weitgehende Resthohlraumverfüllung an der Südflanke abgeschwächt werden. Die in Frage kommenden Resthohlräume sollten vor allem die offenen (konvergenzaktiven) Bereiche unter den Firsten und an den Stößen in den Abbauen einschließlich nicht mehr benötigter Zugangsstrecken und Blindschächte umfassen. Die Abbaue mit Auffangvorrichtungen für die Deckgebirgslösungen und auf den oberen Sohlen zur Aufnahme der Infrastruktur müssen davon zunächst ausgenommen werden.

Befahrungsbefunde auf den Sohlen im Teufenniveau 700 m bis 750 m zeigen, dass die am oberen Baufeldrand der Südflanke zutretende Deckgebirgslösung bis zur Gegenwart eine weit reichende Befeuchtung verursacht hat. Damit ist ein Feuchtigkeitseinfluss vorhanden, der eine Berücksichtigung im vertikalen 3D-Rechenmodell rechtfertigt.

Ein wesentliches Resultat der gebirgsmechanischen Rechnungen mit dem vertikalen 3D-Modell besteht darin, dass für den berechneten Prognosezeitraum bis 2020 eine Resttragfähigkeit ausgewiesen werden kann, ohne dass es zu einem deutlichen Anstieg der Deckgebirgsverschiebungsraten kommt, wie bisher berechnet. Die Ursache liegt in den im Modell vorgegebenen erhöhten Versatzdrücken, die erst seit 2005/2006 gemessen werden und die einer Beschleunigung der Bruchprozesse entgegen wirken.

In den Modellrechnungen wurden im Vergleich zur Prognose aus dem Jahr 2006 nur die Versatzdrücke an die aktuell gemessenen Werte angepasst. Weiterhin erfolgte die Berücksichtigung des Feuchte kriechens durch den Deckgebirgslösungseinfluss. Die signifikanten Unterschiede in den Prognosen sind mit der hohen Sensitivität des Tragsystems an der Südflanke gegenüber geringen Änderungen in den Stützkräften zu erklären. Solche ausgepräg-

ten Sensitivitäten sind aus der Gebirgsmechanik bekannt für Tragsysteme, die sich im Bruch- bzw. Nachbruchzustand befinden.

Die gebirgsmechanischen Zustandsanalysen und Prognosen sind unter diesen Umständen fortlaufend auf Basis der Daten der Standortüberwachung zu überprüfen und ggf. anzupassen. Die Prognosen stehen unter dem Vorbehalt, dass sich die System- und Randbedingungen nicht ändern. Die größten Besorgnisse beziehen sich dabei auf die nicht auszuschließende Zunahme der Deckgebirgslösungszutritte bei Anschluss von hydraulisch leitfähigeren Gebirgsschichten als bisher, der Ausbildung von weiteren Zutrittsorten und der Abnahme der bisherigen Sättigung an Steinsalz. Bei einer solchen Entwicklung gilt die vorgelegte Prognose der Resttragfähigkeit nicht mehr.

Mit dem neu entwickelten horizontalen 3D-Modell wurde zunächst die Abbaugeschichte bis zur Gegenwart berechnet und gezeigt, dass die berechneten Verschiebungen des Südstoßes gut mit den Messwerten am Südstoß der 553-m-Sohle übereinstimmen. Damit ist das Modell für eine gebirgsmechanische Zustandsbewertung und Prognose geeignet.

Bzgl. der minimalen Druckeinspannung in der Steinsalzbarriere zeigte sich eine deutliche Verletzung des für die Integritätsbewertung entscheidenden Minimalspannungskriteriums (σ_{\min} muss größer als p_{Fluid} sein). Die zum Teil sehr großen plastischen Scherdeformationen an den vorgegebenen Großklüften im Deckgebirge, aber auch an den Feldesrändern, weisen auf eine Mobilität des Deckgebirges hin, die sich vor allem auf die Querklüfte und die Baufeldränder konzentriert. Von erheblicher gebirgsmechanischer Relevanz sind weiterhin die plastischen Scherdeformationen in der Steinsalzbarriere, die sich in Fortsetzung der Querstörungen sowie durch die Scherbeanspruchung an den Feldesrändern ausbilden.

Die Scherdeformationen und ausgewiesenen Entfestigungen im südlichen Deckgebirge lassen ein weiteres Aufreißen von Schwächeflächen bis in den Unteren Muschelkalk hinein besorgen. Ohne Stabilisierungsmaßnahmen sind entsprechend hydrogeologischer Einschätzungen eine Erhöhung der Schüttungsmengen und eine Veränderung des Chemismus der zutretenden Deckgebirgslösungen nicht auszuschließen. Die Modellergebnisse stützen die hydrogeologischen Gefahreinschätzungen.

Die Modellierung der Firstspaltverfüllung in unterschiedlichen Fallstudien zeigt einen relativ geringen Einfluss auf die weiteren Verschiebungen und daraus resultierenden Beanspruchungen des Deckgebirges. Eine zügige Verfüllung aller in Frage kommenden Resthohlräume in den Abbauen der Südflanke an den Stößen und unter den Firsten wird trotzdem aus folgenden Gründen empfohlen:

- Grundsätzlich führt eine Verringerung konvergenzaktiver Volumina zu einem schnelleren Versatzdruckaufbau und damit einer besseren Stützung der Pfeiler und Schweben. Bei abnehmenden Konvergenzraten wird der Zuwachs der von der Verformung abhängigen Schädigung der Tragelemente geringer.
- Ein stetig wachsender Versatzdruckaufbau bildet die Voraussetzung für die Aufrechterhaltung der Resttragfähigkeit im Pfeiler-Schweben-System, welches sich im Nachbruchzustand befindet.
- Die hydraulische Strömung der Lösung aus dem Deckgebirge in Richtung der Südflanke wird durch die Entlastungswirkung der Hohlräume verursacht. Dieses Druckgefälle kann durch eine möglichst dichte Verfüllung der Resthohlräume verringert werden, wenn sich durch das auflaufende Gebirge ein Stützdruck aufbaut. Weiterhin könnte der erhöhte Stützdruck die hydraulische Durchlässigkeit in den Rissystemen der Abbaukonturen verringern.

Von Auffahrungen an der Südflanke, z.B. zur Suche von Zutrittspfaden mit dem Ziel einer Abdichtung oder Lösungsfassung, wird abgeraten, da die zusätzliche Entlastungswirkung (durch die Auffahrungen) einen vergrößerten Zufluss auslösen könnte. Das Risiko des Anschlusses von leitfähigen Gebirgsschichten sollte nicht eingegangen werden. Weiterhin führen Auffahrungen grundsätzlich zu Umverlagerungen der Gebirgsspannungen. Im Tragsystem der Südflanke sind keine standsicher dimensionierten Bereiche auszuweisen, die solche Zusatzlasten ohne weitere Schädigung aufnehmen könnten.

Aufgrund der begrenzten Resttragfähigkeit im mittleren Bereich der Südflanke sowie der hydrogeologischen Gefahren wird eine schnellstmögliche Umsetzung der Resthohlraumverfüllung in den Abbauen der Südflanke empfohlen. Mit dieser Maßnahme wird noch keine Entscheidung über die Schließung des Bergwerkes präjudiziert, eine Verzögerung könnte aber die in Frage kommenden Optionen immer weiter einschränken.

Literatur

- [1] IfG Leipzig: Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachtanlage Asse in der Betriebsphase, Bericht im Rahmen der LVB II des Rahmenvertrages „Gebirgsmechanische Modellierung“, Revision 02 vom 06.10.2006
- [2] IfG Leipzig: Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse, Bericht im Rahmen der LVB VIII des Rahmenvertrages „Gebirgsmechanische Modellierung“ vom 03.11.2006
- [3] IfG Leipzig: Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachtanlage Asse II, Kurzbericht zum Rahmenvertrag „Gebirgsmechanische Modellierung“ vom 09.11.2007
- [4] CDM Consulting GmbH: Konzeptstudie zur Erhöhung der Versatzsteifigkeit der mit Salzgrus gefüllten Kammern der Südwestflanke der Schachtanlage Asse II, Projekt 61574, erstellt im Auftrag des BMBF, Referat 713, Bochum, 12.09.2008
- [5] HMGU, Schachtanlage Asse: Fortschreibung der Darstellung und Bewertung des Spannungs- und Verformungszustandes im Tragsystem der Südflanke der Schachtanlage Asse nach Abschluss der Versatzmaßnahme auf der Grundlage gebirgsmechanischer In-situ-Messungen, Arbeitsbericht Nr. 05/2008 des Teilbereiches Standortüberwachung, 24.11.2008
- [6] IfG Leipzig: Vergleich der Ergebnisse von gebirgsmechanischen Rechenmodellen mit In-situ-Messergebnissen, Memorandum 01/2007 vom 22.08.2007
- [7] GSF, FB Asse: Zusammenstellung und Bewertung der ab 1988 im Grubengebäude der Schachtanlage Asse II aufgetretenen Salzlösungen und Gase, Bericht im Projekt Langzeitsicherheit, Revision 03 vom Januar 2006
- [8] IfG Leipzig: Untersuchungen zur Barrierenintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben SR2470 (interner Bericht), 2007

- [9] Minkley, W., et al. : A visco-elasto-plastic softening model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining, Proc. 2nd Int. FLAC Symposium Lyon, 29 - 31 October 2001
- [10] GSF, FB Asse: Kataster der gesteinsmechanischen Daten und Parameter für den Standort Asse, Band 1 und 2, Teilbereich Standortüberwachung, April 2000
- [11] Büro Dr. Schwandt: Ergänzende Beurteilung der Salzlösungszutritte in das Grubengebäude der Schachanlage Asse II unter Berücksichtigung der tektonischen, gebirgsmechanischen und regionalen hydrogeologischen Situation, Bericht im Auftrag von HMGU, Forschungsbergwerk Asse, Erfurt, Januar 2008
- [12] Minkley, W., Wüste, U.: Numerische Simulation von Entfestigungsvorgängen im Salzbebirge, Geomonitoring, FE-Modellierung, Sturzprozesse und Massenbewegungen, COG – Fachtagung Salzburg 2008, Seite 58 bis 74, Wichmann, Heidelberg

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 Positionen der Messstellen im Abbaufeld der Südflanke
- Anlage 2 Pfeilerstauchungsraten in mm/a auf der 490 mS bis 532 mS
- Anlage 3 Pfeilerstauchungsraten in mm/a auf der 553 mS bis 595 mS
- Anlage 4 Pfeilerstauchungsraten in mm/a auf der 616 mS bis 658 mS
- Anlage 5 Pfeilerstauchungsraten in mm/a auf der 679 mS bis 700 mS
- Anlage 6 Isolinien der Pfeilerstauchungsraten im Zeitraum 11/2007 bis 11/2008 in mm
- Anlage 7 Spannungsmonitoring im Pfeiler 5/6, Teufe 514 m
- Anlage 8 Fotos der Risse und Ausbrüche im Pfeiler 3/4
- Anlage 9 An den Spannungsmonitorstationen in querschlägiger Pfeilermitte gemessene Hauptspannungsverläufe
- Anlage 10 Positionen der Versatzdruckgeber in den Abbauen der Südflanke
- Anlage 11 Versatzdruckentwicklung im Abbau 2 der 616-m-Sohle
- Anlage 12 Versatzdruckentwicklung im Abbau 4 der 616-m-Sohle
- Anlage 13 Versatzdruckentwicklung im Abbau 9 der 616-m-Sohle
- Anlage 14 Mikroseismik Asse im Zeitraum 10/2007 bis 9/2008 und für die Gegenwart berechnete Scherdeformationen im Schnitt 2
- Anlage 15 Deckgebirgslösung in der Versatzstrecke 725 mS
- Anlage 16 Deckgebirgslösung in der Versatzstrecke 725 mS (Abbau 3 und 4)
- Anlage 17 Unversetzte Bereiche unter der Firste und an den Stößen in den Abbauen der 700-m-Sohle
- Anlage 18 Darstellung der täglich gefassten Lösungsmengen im Bereich der westlichen Abbaue auf der 725- und 750-m-Sohle
- Anlage 19 Verzerrung der Schweben im Rechenmodell (Gegenwart) und Kennzeichnung der Bereiche mit Feuchtekriechen
- Anlage 20 Vertikales 3D-Modell in streichender Baufeldmitte
- Anlage 21 Horizontale Verschiebungsraten des südlichen Deckgebirges 553 mS, Prognose von 2006
- Anlage 22 Horizontale Verschiebungsraten des südlichen Deckgebirges 700 mS, Prognose von 2006
- Anlage 23 Verschiebungsraten Südstoß 553-m-Sohle, keine Stützung der Schwebenreste
- Anlage 24 Verschiebungsraten Südstoß 700-m-Sohle, keine Stützung der Schwebenreste

- Anlage 25 Verschiebungsraten Südstoß 553-m-Sohle, Schwebenreste von unten mit 1 bar gestützt
- Anlage 26 Verschiebungsraten Südstoß 700-m-Sohle, Schwebenreste von unten mit 1 bar gestützt
- Anlage 27 Für die streichende Baufeldmitte im vertikalen 3D-Modell berechnete Pfeilerstauchungsraten, keine Unterstützung der Schwebenreste
- Anlage 28 Für die streichende Baufeldmitte im vertikalen 3D-Modell berechnete Pfeilerstauchungsraten, Unterstützung der Schwebenreste mit 1 bar
- Anlage 29 Horizontales 3D-Modell: Gesamtansicht
- Anlage 30 Horizontales 3D-Modell: Vernetzung
- Anlage 31 Deckgebirgsmodellierung: Anpassung der Parametersätze des visko-elasto-plastischen Stoffmodells an die bilinearen Ansätze aus [2]
- Anlage 32 Ausschnitt horizontales 3D-Modell: Satteln und südliches Deckgebirge mit Längs- und Querklüften
- Anlage 33 Tabelle für die Festigkeitsparameter Steinsalz Asse
- Anlage 34 Tabelle für die Dilatanzparameter Steinsalz Asse
- Anlage 35 Festigkeitskurven Carnallit Asse
- Anlage 36 Dilatanzkurven Carnallit Asse
- Anlage 37 Plastisches Zugversagen der Hangendschwebe als Ursache von Schwebenbrüchen in situ und Umsetzung im Modell
- Anlage 38 Pneumatisches Verfüllen der Abbaue einschließlich des gebrochenen Schwebenkerns zum Abbau der nächsthöheren Sohle
- Anlage 39 Vergleich der im Horizontalmodell berechneten mit dem am Südstoß der 553 mS gemessenen Deckgebirgsverschiebungen
- Anlage 40 Maximale Druckeinspannung im Abbausystem und Deckgebirge (Gegenwart)
- Anlage 41 Minimale Druckeinspannung im Abbausystem und Deckgebirge (Gegenwart)
- Anlage 42 Schädigungsbereiche im Deckgebirge infolge der Hohlraumkonvergenz (Gegenwart)
- Anlage 43 Plastische Deformationen im Abbausystem und Deckgebirge (Gegenwart)
- Anlage 44 Horizontale Gesamtverschiebung der Südflanke in halber Abbauhöhe
- Anlage 45 Horizontale Gesamtverschiebung der Südflanke in halber Schwebenhöhe
- Anlage 46 Im Deckgebirge initialisierte Lösungsdrücke (Gegenwart)
- Anlage 47 Horizontalmodell: Ausschnitt in streichender Baufeldmitte
- Anlage 48 Für die Firstspaltverfüllung zugänglicher Hohlraum (Ausschnitt in streichender Baufeldmitte)
- Anlage 49 Für die Firstspaltverfüllung zugänglicher Hohlraum (Modell aufgeschnitten)

- Anlage 50 In Fallstudien verwendete Festigkeiten für den Sorelbeton
- Anlage 51 Horizontalverschiebung des Südstoßes bis 2020, Auswirkungen unterschiedlicher Varianten der Firstspaltverfüllung
- Anlage 52 Kumulative Südstoßverschiebung ab 2009 bis 2020, Relativvergleich der Varianten 1 und 2 mit der Entwicklung ohne Firstspaltverfüllung
- Anlage 53 Horizontale Zerrung/Pressung entlang der Schichtgrenze Rötanhydrit/Steinsalz in halber Abbauhöhe
- Anlage 54 Horizontale Zerrung/Pressung entlang der Schichtgrenze Rötanhydrit/Steinsalz in halber Schwebenhöhe
- Anlage 55 Zuwachs der Horizontalverschiebung an der Schichtgrenze Rötanhydrit/Steinsalz in halber Abbauhöhe von 2009 bis 2020
- Anlage 56 Zuwachs der Horizontalverschiebung an der Schichtgrenze Rötanhydrit/Steinsalz in halber Schwebenhöhe von 2009 bis 2020