



**Gebirgsmechanische Zustandsanalyse
des Tragsystems der Schachtanlage
Asse II**

Kurzbericht

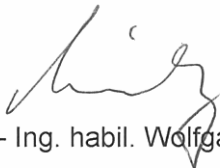


**Institut
für
Gebirgsmechanik
GmbH**

Gebirgsmechanische Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachtanlage Asse II

Kurzbericht

Leipzig, den 09.11.2007



Dr. - Ing. habil. Wolfgang Minkley
Geschäftsführer



Dr. - Ing. Peter Kamlot
Projektleiter

Inhaltsverzeichnis

1. ANLASS	4
2. ABLAUF DER BEARBEITUNG	4
3. STANDORTBEDINGUNGEN	6
4. MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN DES STEINSALZES UND DER DECKGEBIRGSSCHICHTEN	12
5. 3D-MODELLRECHNUNG UND GEBIRGSMECHANISCHE BEWERTUNG	15
6. PROGNOSE DER ZUKÜNFTIGEN ENTWICKLUNG MIT UND OHNE SCHLIEßUNGSMAßNAHMEN	22
7. ZUSAMMENFASSUNG	25
7.1 GEBIRGSMECHANISCHE ZUSTANDSANALYSE	25
7.2 PROGNOSE DER GEBIRGSMECHANISCHEN ENTWICKLUNG	26
GLOSSAR	29

1. Anlass

Mit Schreiben vom 24.09.2007 wurde das IfG Leipzig beauftragt, einen Kurzbericht zur gebirgsmechanischen Zustandsanalyse des Tragsystems der Schachanlage Asse II zu erstellen. Dabei soll Bezug genommen werden auf die beiden Berichte

- Tragfähigkeitsanalyse des Gesamtsystems der Schachanlage Asse in der Betriebsphase und
- Dreidimensionale gebirgsmechanische Modellrechnungen zur Standsicherheitsanalyse des Bergwerkes Asse,

die im Oktober bzw. November 2006 an die GSF übergeben wurden. Im Kurzbericht sollen die wesentlichen Aussagen zur gebirgsmechanischen Bewertung der Tragfähigkeit der Abbaufelder im Bergwerk Asse II zusammengefasst und die unterschiedlichen Prognoserechnungen für die zukünftige Betriebsphase mit und ohne Schließungsmaßnahmen erläutert werden.

Während die Fachberichte für die im Genehmigungsverfahren verantwortlichen Fachbehörden, Aufsichtsorgane und beteiligten Gutachter geschrieben wurden, sollen im vorliegenden Kurzbericht die wesentlichen Aussagen anschaulich erklärt und, soweit möglich, ohne Fachvokabular (ansonsten siehe Glossar) zusammengefasst werden. Die Kernaussagen der Langfassungen bleiben erhalten, auf die detaillierte Nachweisführung wird jedoch verzichtet. Zur Unterstützung der Argumentation wurden weiterhin ergänzende Abbildungen der GSF eingefügt und zur Herstellung der Aktualität erfolgte eine Weiterführung der Darstellungen für die In-situ-Messungen bis auf den derzeit vorliegenden Stand.

2. Ablauf der Bearbeitung

Das IfG Leipzig führt seit 1996 im Auftrag der GSF gebirgsmechanische Untersuchungen zum Bergwerk Asse II durch und ist als gebirgsmechanischer Sachverständiger tätig. In dieser Zeit wurden umfangreiche Laborversuche am Steinsalz, Carnallit und dem zur Stützung eingebrachten Steinsalzversatz sowie In-situ-Messungen im Bergwerk durchgeführt. Die Resultate bildeten die Basis für die Materialgesetze in den numerischen Modellrechnungen bzw. kamen bei der Bewertung der Modellergebnisse zur Anwendung.

Die Laborversuche am Steinsalz und Carnallit dienten der speziellen Parameterableitung für gesteinsmechanisch hohe Beanspruchungen, die nach Überschreitung der maximalen Festigkeit zu einer fortschreitenden Entfestigung und Auflockerung des Gesteins führen. Die Laborversuchskurven zeigen, dass Steinsalz bei Aufrechterhaltung einer Einspannung unter einer konstanten Deformationsrate nach Erreichen der maximalen Festigkeit nicht schlagartig versagt, sondern allmählich seine Festigkeit verliert und ein Restfestigkeitsplateau besitzt.

Die Restfestigkeit ist von der minimalen Druckeinspannung abhängig und für die Tragfähigkeitsanalyse von entscheidender Bedeutung.

Entsprechend der Daten der Standortüberwachung sowie der visuellen Befunde (einschließlich der Bohrlochkamerabemusterungen) sind die Pfeiler und Schweben in den Abbaufeldern der Asse II durch Entfestigungs- und Bruchprozesse gekennzeichnet. Zur Modellierung und Bewertung dieser Erscheinungen sind die üblichen in der Salzmechanik zur Analyse der Stabilität und Barrierewirkung des Gebirges gebräuchlichen Kriterien und Stoffmodelle nicht mehr anwendbar und es musste ein neuartiger, am IfG Leipzig entwickelter, visko-elastoplastischer Stoffansatz verwendet werden, der Auflockerung (Dilatanz), Entfestigung und Kriechen miteinander verknüpft. Dieser Stoffansatz ist in einer nationalen Vergleichsstudie zur Stoffgesetzentwicklung geprüft worden und kommt seit Jahren für die unterschiedlichsten nationalen und internationalen Bewertungsaufgaben im Salzbergbau und der Kavernenspeicherung im Salinar zum Einsatz.

Zur Analyse der gebirgsmechanischen Wechselwirkung mit dem Deckgebirge, die aus dem Tragfähigkeitsverlust der Pfeiler und Schweben resultiert, wurden in mehrjähriger Arbeit großräumige 2D- und 3D-Rechenmodelle entwickelt, mit denen es gelang, die in situ gemessenen Spannungen und Verschiebungen nachzubilden. Die gemäß den Verschiebungsmessungen hohe Mobilität des südlichen Deckgebirges wurde mit Gebirgsfestigkeiten modelliert, die mittels ingenieurgeologischer Bewertungen der Bohrkernbefunde gegenüber den im Labor mit Festigkeits- und Scherversuchen bestimmten Gesteinsfestigkeiten abgemindert werden mussten. Weiterhin wurden, um die gemessenen Verschiebungen nachbilden zu können, in lokalen Deckgebirgsbereichen mit den stärksten Festigkeitsüberschreitungen in Abhängigkeit vom Zerlegungsgrad hydraulische Drücke von Deckgebirgslösungen angesetzt. Der seit 1988 im oberen Teil des Steinsalzbaufeldes an der Südflanke beobachtete Lösungszutritt stützt diese Modellierung.

Im hier vorgelegten Kurzbericht zur Tragfähigkeitsanalyse werden zunächst die Standortbedingungen dargestellt und danach am Beispiel des Steinsalzes das den Modellrechnungen zugrunde liegende Materialverhalten erläutert. Anhand der Modellergebnisse und der nachgewiesenen Übereinstimmung mit den tatsächlichen Reaktionen im Bergwerk erfolgt eine gebirgsmechanische Zustandsanalyse. Die Prognose der zukünftigen Entwicklung wird in zwei getrennten Arbeitsschritten vorgenommen:

- Bewertung der von der GSF geplanten Schließungsmaßnahmen in ihrem konzipierten zeitlichen Ablauf und
- Berechnung der möglichen gebirgsmechanischen Entwicklung ohne weitere technische Schließungsmaßnahmen.

Im Bergwerk Asse II waren die folgenden für eine Mineralgewinnung aufgefahrenen drei Baufelder zu bewerten (siehe Bild 2):

- Carnallitbaufeld an der Nordflanke mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 1,0 Mio. m³ im Teufenbereich 710 bis 750 m. Abgebaut im Zeitraum von 1909 bis 1925, wobei bereits während der Gewinnung die Abbaue größtenteils mit Fabrikrückständen der Aufbereitung verfüllt worden sind.
- Steinsalzbaufeld an der Südflanke (Leine-Steinsalz) mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 3,4 Mio. m³ im Teufenbereich 475 bis 750 m. Abgebaut im Zeitraum von 1916 bis 1964. In den 1980er Jahren teilweise verfüllt mit Salz aus dem Tiefenaufschluss und 1995 bis 2004 nahezu vollständig verfüllt mit Fremdversatz.
- Steinsalzbaufeld im Sattelkern (Steißfurt-Steinsalz) mit einem Ausbruchsvolumen von ca. 0,5 Mio. m³ im Teufenbereich der Sohlen 725 bis 775 m. Abgebaut im Zeitraum von 1927 bis 1964, in dieser Zeit teilversetzt und fast vollständig verfüllt mit Salz aus dem Tiefenaufschluss in den 1980er Jahren.

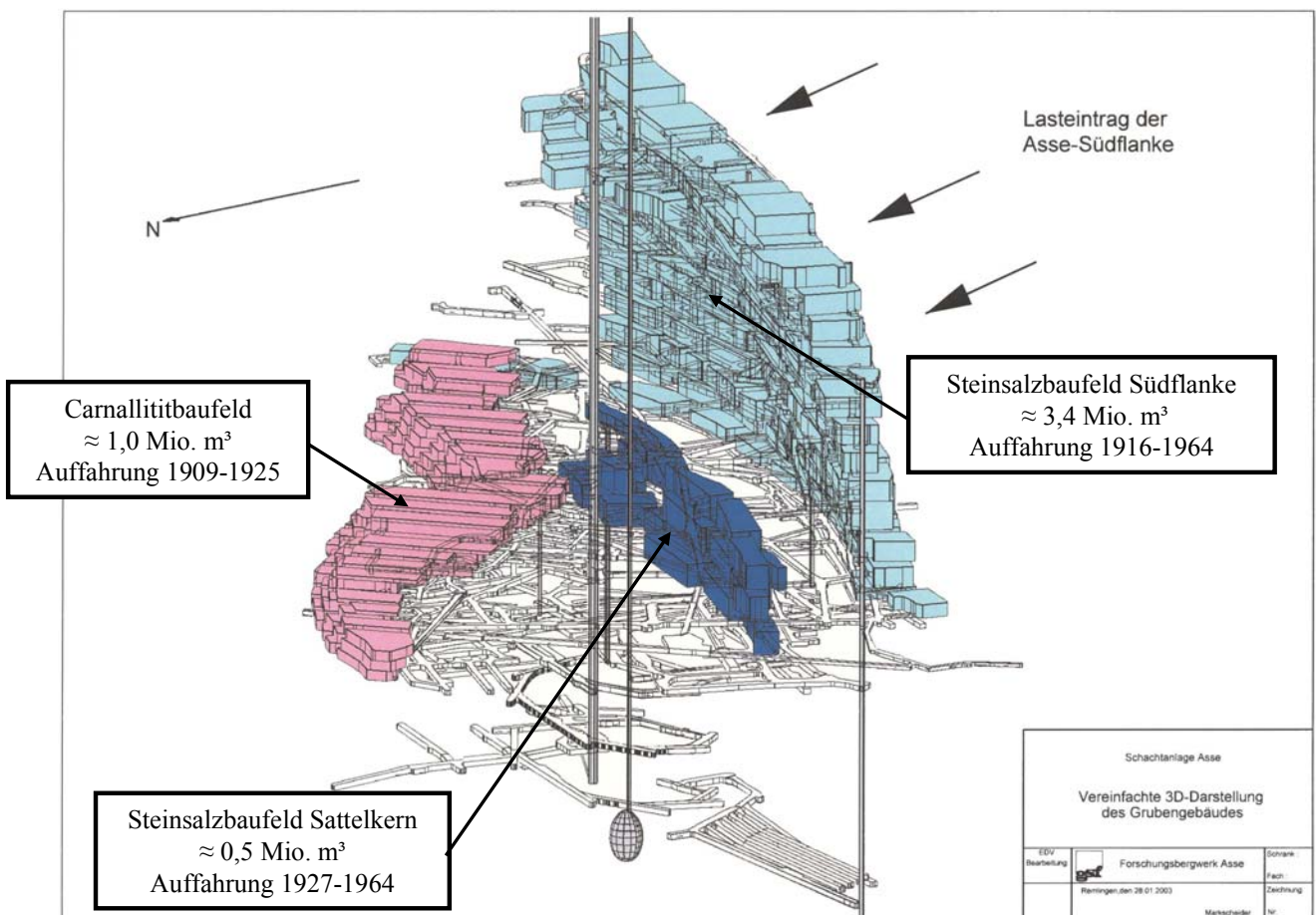


Bild 2: Dreidimensionale Darstellung des Grubengebäudes der Schachanlage Asse II

Aus den Bildern wird ersichtlich, dass das Baufeld im Leine-Steinsalz (Na 3) an der Südflanke auf Grund seiner Lage und Größe für die gebirgsmechanischen Reaktionen des Gesamtsystems Grubengebäude/Deckgebirge bestimmend ist. Die folgende Bewertung konzentriert sich deshalb auf dieses Baufeld.

Infolge des geringen Abstandes zum Deckgebirge und der langen offenen Standzeit kam es im Bereich der oberen Abbaukammern zu einem Verlust der Barrierenintegrität im Steinsalz. Seit 1988 wird ein Salzlösungszufluss mit einer gegenwärtigen Rate von etwa 12 m³/Tag beobachtet. Die Deckgebirgslösung ist an NaCl gesättigt und im Carnallit lösefähig und sickert über lokale Risszonen in das Grubengebäude.

Die im Tiefenaufschluss zwischen 1984 und 1992 für Forschungsarbeiten aufgefahrenen Einzelstrecken und Streckensysteme mit einem Auffahrungsvolumen von 0,24 Mio. m³ werden derzeit versetzt.

Die radioaktiven Abfälle befinden sich in Steinsalzammern im Sattelkern im Teufenniveau 750 m und 725 sowie an der Südflanke im Teufenniveau 750 m und 511 m.

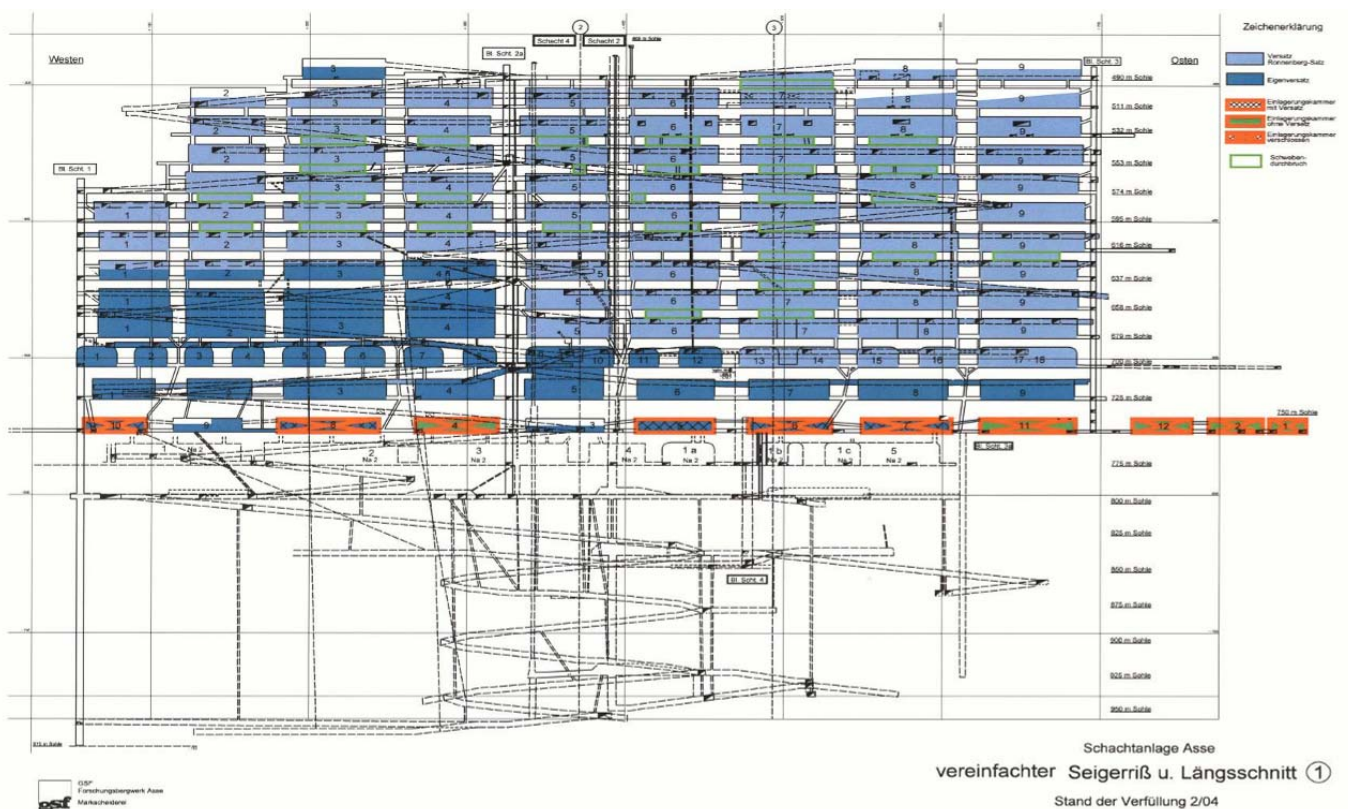


Bild 3: Blick auf das Abbaufeld an der Südflanke in nördliche Richtung

Die Auffahrung des Abbaufeldes an der Südflanke (Bild 3) erfolgte auf 13 Sohlen mit insgesamt 131 Abbaukammern. Meist sind auf einer Sohle in streichender Richtung 9 Abbaue nebeneinander angeordnet. Ein Standardabbau ist 60 m lang (streichend), 40 m breit

(querschlägig) und 15 m hoch. Zwischen den Abbauen existieren mit Ausnahme des 20 m breiten Pfeilers zwischen den Abbaureihen 4 und 5 ausschließlich 12 m breite Pfeiler. Die Schwebenmächtigkeiten zwischen den Abbauen in vertikaler Richtung betragen oberhalb der 700-m-Sohle etwa 6 m, zwischen der 700- und 725-m-Sohle ca. 8,5 m und zwischen der 725- und 750-m-Sohle etwa 14 m. Das Baufeld weist in streichender Richtung eine Abmessung von ca. 650 m und in vertikaler Richtung von 275 m auf.

Der ablaufende Entfestigungsprozess der Tragelemente im Baufeld an der Südflanke erforderte aus gebirgsmechanischer Sicht eine vollständige Verfüllung aller noch offenen Abbaue. Diese Arbeiten waren Anfang des Jahres 2004 in allen Abbauen, bis auf wenige Ausnahmen zur Aufnahme der zur Schließung notwendigen Infrastruktur, abgeschlossen. Die Einbringung erfolgte aus bergbausicherheitlichen Gründen mit einer pneumatischen Förderung. Etwa $\frac{3}{4}$ der Abbaue sind mit einem Fremdversatz (hellblaue Farbe in Bild 3) und $\frac{1}{4}$ mit dem Salz aus dem Tiefenaufschluss (dunkelblaue Farbe in Bild 3) gefüllt. Die In-situ-Befunde zeigen, dass sich bis zur Gegenwart noch keine signifikanten Versatzdrücke aufgebaut haben. Es findet jedoch eine Verdämmung der Pfeilerkonturen statt, die der Pfeilerquerdehnung entgegenwirkt. Die Stützwirkung ist mittels der degressiven Tendenz der Pfeilerstauchungsraten sowie der abnehmenden mikroseismischen Aktivität im Grubengebäude nachweisbar.

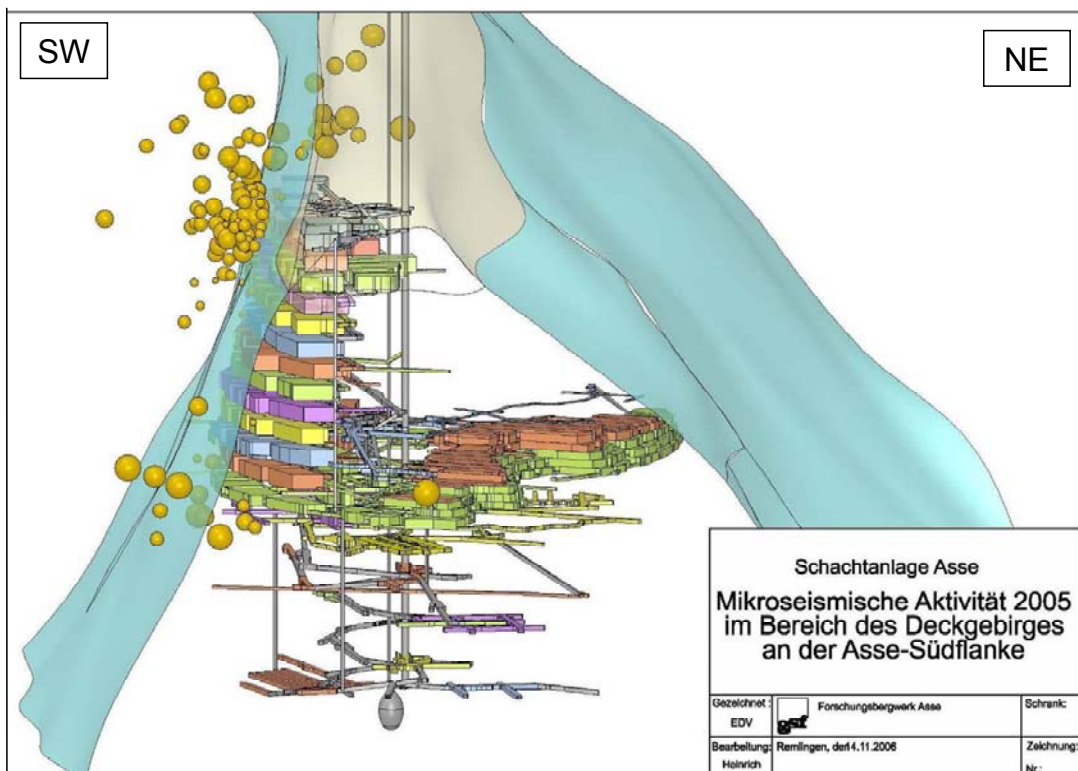


Bild 4: Mikroseismische Aktivität im Deckgebirge der Südflanke im Jahr 2005 (Magnituden von -3 bis -1)

Aufgrund der Nachgiebigkeit des Abbausystems ist es zu einer Gebirgsspannungsumverlagerung auf das südliche Deckgebirge gekommen, die auch dort zu lokalen Festigkeitsüberschreitungen führt und mit mikroseismischen Messungen nachweisbar ist (Bild 4). Die Mikroseismizität im Deckgebirge ist in den letzten Jahren etwa gleich geblieben.

Zusammenfassend wird die Auffahrungssituation wie folgt bewertet:

- In den Bildern 2 und 3 sind die im Verhältnis zu den Abbaudimensionen relativ schwachen Pfeiler und Schweben in den Abbaufeldern zu erkennen. Solche Abmessungen waren zur Auffahrungszeit in der steilen Lagerung nicht ungewöhnlich, jedoch fallen bei dem großen zusammenhängenden Baufeld an der Südflanke die relativ zu anderen damaligen Gewinnungsbergwerken großen querschlägigen Abbaubreiten mit sehr geringen Schwebenstärken zusammen. Die streichenden Abbaulängen waren in anderen Bergwerken oft größer, dafür aber auch die Pfeiler breiter. Die Abbauhöhen waren vergleichsweise niedrig.
- Die Abbaufelder im Steinsalz und Carnallit waren für die vorgesehenen Betriebszeiten von Jahrzehnten ohne zusätzliche Stützmaßnahmen (Versatz) nicht standsicher dimensioniert. Derartige Tragsysteme werden als nachgiebig bezeichnet und reagieren mit Kriechverformungen, dilatanter Entfestigung sowie lokalen Bruchprozessen auf die eingetragene Gebirgsspannung. Von diesen Prozessen werden zunächst die Pfeiler- und Schwebenkonturen erfasst und die nicht mehr aufnehmbaren Spannungen müssen von den besser gestützten (höhere minimale Druckeinspannung) Kernzonen aufgenommen werden. Wenn infolge Entfestigung und lokaler Risse auch die Pfeiler- und Schwebenkerne an Tragfähigkeit verlieren, erfolgt ein weiterer Lastabtrag auf benachbarte Pfeiler und schließlich auf die Baufeldränder. Die über Jahrzehnte andauernden Spannungsumlagerungsprozesse sind sehr komplex, nur mit umfangreichen In-situ-Messungen (wie sie in der Grube seit den 1980er Jahren installiert sind) nachzuweisen und nur mit speziellen Stoffgesetzen nachzubilden. In Bild 5 ist als typisches Belegfoto die Rissbildung in einem Schwebenrest in der Einbindung in den Pfeiler auf den oberen Sohlen der Südflanke zu sehen.
- Die Pfeilerkonturabschalungen und Schwebenaufblätterungen wurden im Bergwerk schon in den 1960er Jahren beobachtet, aber damals als normal für den Salzbergbau und für das Systemtragverhalten als unbedenklich angesehen. Man ging davon aus, dass in der steilen Lagerung der Lastabtrag über das südlich und nördlich benachbarte Gebirge stattfindet, welches auch bei einem hohen Durchbaungsgrad in den Abbaufeldern stabil stehen bleibt.



Bild 5: Reste der gebrochenen Schwebe zwischen den Sohlen 490 m und 511 m in der Abbaureihe 7 der Südflanke, Foto aus dem Jahr 2003

- Tatsächlich konnte diese Stützwirkung des Gebirges am Standort Asse II nicht zum Tragen kommen, da die oberen Sohlen der Südflanke einen zu geringen Abstand zum südlichen Deckgebirge aufweisen. Die gering festen und stark geklüfteten Deckgebirgsschichten des Oberen Buntsandsteins und Muschelkalks konnten die infolge der Nachgiebigkeit der Pfeiler und Schweben umverlagerten Spannungen nicht aufnehmen. Es kam auch dort zu Festigkeitsüberschreitungen mit nachfolgenden Rückwirkungen auf die Südflanke. Die in situ gemessenen Erhöhungen der Pfeilerstauungsraten ab Mitte der 1980er Jahre sind auf diese Wechselwirkungen zurückzuführen. Gegenwärtig sind insbesondere im Bereich des horizontalen Verschiebungsmaximums der Südflanke die meisten Schweben vollständig durchgebrochen (es existieren nur noch äußere Schwebenringe wie im Bild 5) und die Pfeiler sind von einer Vielzahl von Rissen (siehe Bild 6) durchzogen.



Bild 6: Typischer Riss in den Pfeilerkernen der Südflanke (Breite ca. 8 cm), Foto mit Bohrlochkamera aus dem Jahr 2000

4. Mechanische Eigenschaften des Steinsalzes und der Deckgebirgsschichten

Zur Ermittlung der Materialparameter für den visko-elasto-plastischen Stoffansatz des Steinsalzes waren spezielle Laborversuche bis in den dilatanten Entfestigungsbereich notwendig. Dabei musste geklärt werden, ob es nach Überschreitung des Festigkeitsmaximums zu einer fortschreitenden Entfestigung kommt oder ob sich ein Restfestigkeitsplateau einstellt.

In Bild 7 sind ausgewählte Versuchskurven ($\sigma_3 = 0,2$ bis 10 MPa) für die Abhängigkeit der Differenzspannung von der Axialdeformation und der Volumenverformung von der Axialdeformation dargestellt. Die Differenzspannung repräsentiert die Differenz zwischen Axialspannung σ_1 und Manteldruck σ_3 . Die Verformungsgeschwindigkeit betrug $\dot{\epsilon}_1 = 5 \cdot 10^{-4} \% / s$.

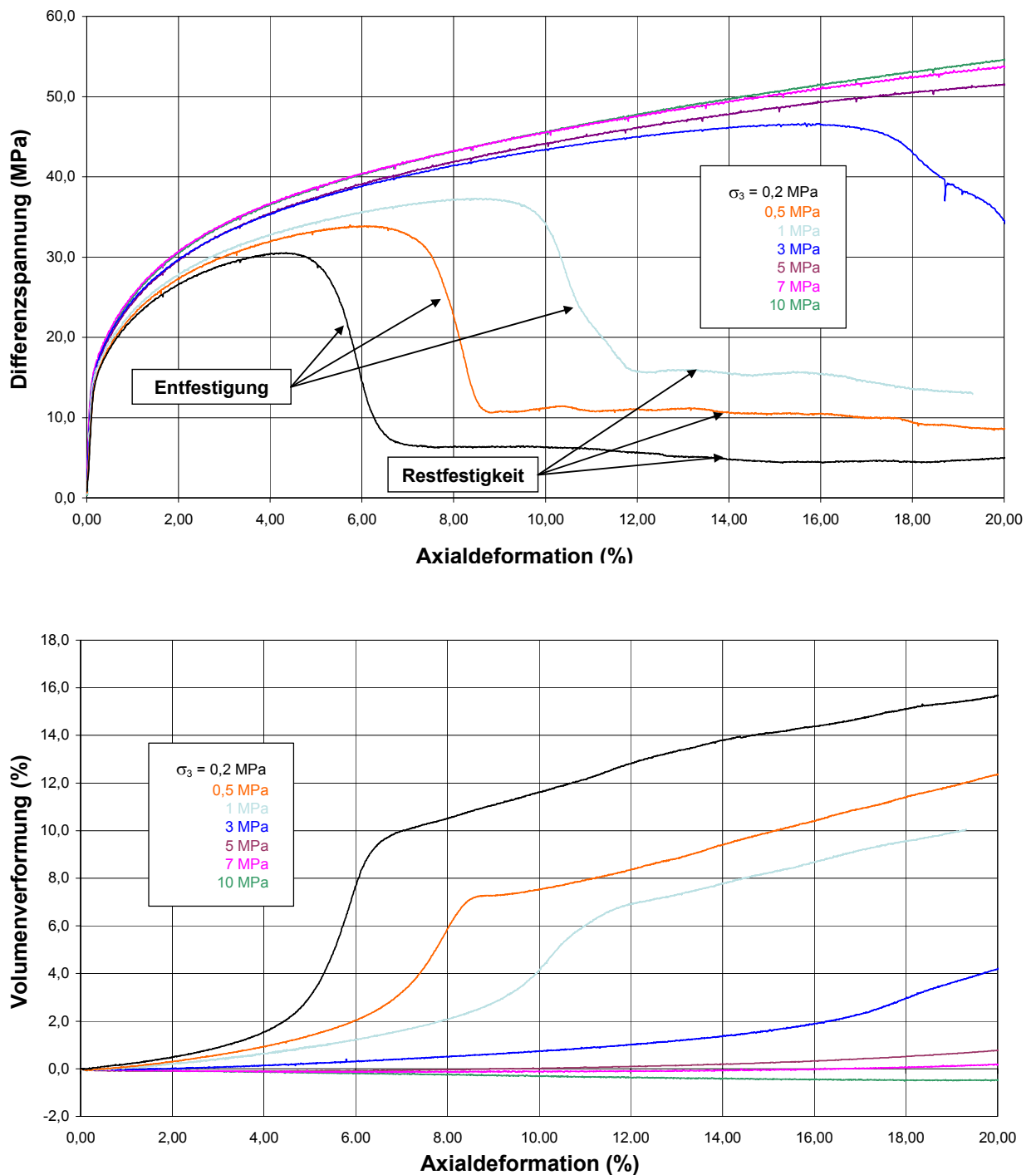


Bild 7: Festigkeitskurven (Differenz aus aufnehmbarer Axialspannung und konstantem Manteldruck, oben) und Verlauf der Auflockerung (positive Volumenverformung oder Dilatanz, unten) von Steinsalzprüfkörpern bei unterschiedlichen Manteldrücken

Bei Manteldrücken σ_3 bis 3 MPa fällt nach Überschreitung des Lastmaximums bei weiterer Verformung die aufnehmbare Spannung wieder ab (Entfestigung), wobei die Dilatanzkurven in der Versuchsphase des stärksten Festigkeitsverlustes steil ansteigen. Bis zur vollständigen Ausbildung der Bruchfläche bzw. von Bruchflächenscharen ist dabei noch nahezu das

gesamte Prüfkörpervolumen in die volumetrische Verformung einbezogen. Erreicht die Spannung das Restfestigkeitsniveau, „knickt“ die Dilatanzkurve ab und setzt sich mit einem nahezu konstanten Anstieg fort. Das bedeutet, dass die Auflockerung im Material zwar weiter zunimmt, diese aber an die Bruchfläche als ausgeprägte Scherzone gebunden ist, die nunmehr das Volumenverformungsverhalten bestimmt. In Bild 8 sind an den ausgebauten Proben nach den Festigkeitsversuchen die Bruchflächen zu sehen. Solche Brüche sind in einer Vielzahl von Pfeilern sichtbar und die geringen minimalen Druckeinspannungen wurden mit Spannungssondierungen nachgewiesen.



Bild 8: Prüfkörper Steinsalz Asse nach den Festigkeitsversuchen

Bei allen Triaxialversuchen, bei denen sich Restfestigkeitsplateaus ausbildeten ($\sigma_3 < 3$ MPa), waren diese über einen größeren Verformungsbereich nahezu konstant. Der Betrag der Restfestigkeit und der erreichte Verformungsbereich sind dabei abhängig vom Manteldruck. Die ausgewiesenen Restfestigkeitsplateaus bis zu Verformungen von 20 %, auch bei geringen Manteldrücken von 0,2 MPa, besitzen eine wesentliche Bedeutung für die Tragfähigkeitsprognose bis zum Ende der Betriebsphase.

Die beschriebenen Laborversuche lieferten, einschließlich der hier nicht diskutierten Kriechversuche, die Parameterbasis für das verwendete visko-elasto-plastische Stoffmodell.

Die Modellierung des Deckgebirges erfolgte auf Basis der von der GSF bereitgestellten geologischen Befunde. Die Kerne der übertägigen ingenieurgeologischen Erkundungsbohrungen des Deckgebirges zeigten insbesondere in den Schichten des Oberen Buntsandsteins und Muschelkalks eine starke Klüftigkeit (lokal > 50 Klüfte/m) sowie mineralisierte und offene Schichtfugen und es kam mehrmals zu Spülungsverlusten beim Bohren.

Gemäß diesem Befund wurden mit einer in der Felsmechanik üblichen Methode die an den intakten Gesteinsproben im Labor ermittelten Festigkeiten auf die Festigkeiten des geklüfteten Gebirges abgemindert. Im Rechenmodell wird dementsprechend für die geklüfteten Deckgebirgsbereiche ein Festigkeitskriterium mit reduzierten Parametern verwendet. Weiterhin wurden im Rechenmodell die Festigkeitsanisotropien parallel und quer zum Schichteinfallen sowie die Großklüfte (siehe Bild 1) berücksichtigt.

Die ersten Modellrechnungen mit diesen Parametern erbrachten trotzdem eine zu hohe Steifigkeit des Deckgebirges und lieferten eine nur unbefriedigende Übereinstimmung mit den querschlägigen Stauchungen des Abbaufeldes an der Südflanke, deren Anteile zu etwa 90 % aus südlicher Richtung (siehe Bild 10) stammen. Neben dem hohen Zerlegungsgrad wird deshalb die in situ gegebene erhöhte Deckgebirgsmobilität mit einem zusätzlichen Festigkeitsverlust infolge mechanisch-hydraulischer Wechselwirkungen in den hydraulisch angeschlossenen Trennflächen begründet. Es wird davon ausgegangen, dass sich mit dem Lastabtrag auf das unmittelbare Deckgebirge und der Verringerung der minimalen Druckeinspannung die Trennflächen schrittweise öffnen und es dadurch zu einem Aufbau von Deckgebirgslösungsdrücken in Abhängigkeit vom hydraulisch wirksamen Zerlegungsgrad kommt. Diese Modellvorstellung, die sich aus den In-situ-Befunden ableiten lässt, führt zu einem komplexen Tragsystem des Abbaufeldes an der Südflanke und unmittelbaren Deckgebirges mit gebirgsmechanischen Wechselwirkungen und impliziert, dass bei einer nachlassenden Tragfähigkeit im Abbaufeld auch von einer unmittelbaren Verschiebungsaktivierung im Deckgebirge ausgegangen werden muss.

5. 3D-Modellrechnung und gebirgsmechanische Bewertung

Wie im Kapitel 2 ausgeführt, wurden für die Modellierung der bergbaulichen Entwicklung und die nachfolgende Bewertung großräumige 2D- und 3D-Rechenmodelle verwendet. Im Folgenden wird nur auf die 3D-Rechnungen mit dem Programm FLAC^{3D} der Firma ITASCA (Minneapolis, USA) Bezug genommen. Dieses Programm kommt weltweit zur Bearbeitung geotechnischer und gebirgsmechanischer Problemstellungen zum Einsatz. Das visko-elastoplastische Stoffgesetz mit Entfestigung kann über eine spezielle Schnittstelle implementiert werden.

Das Rechenmodell in Bild 9 repräsentiert eine querschlägige Vertikalsektion in streichender Bergwerksmitte. Das Modell ist 6,3 km breit und etwa 2,5 km hoch und umfasst die wichtigsten Gebirgsschichten, Großklüfte und Auffahrungen im Bergwerk. Es besteht aus 180 000 Elementen mit Abmessungen von ca. 1 m im Konturbereich der Hohlräume. Im Bild sind die Konturen der Abbaue in den beiden Steinsalzbaufeldern sowie die Umhüllende des Carnallitbaufeldes zu erkennen. Die streichende Erstreckung von 36 m ergibt sich aus einer halben Pfeilerbreite von 6 m und halben Kammerlänge von 30 m des Feldes an der Südflanke. Die großen Modellabmessungen sind notwendig, um die gebirgsmechanischen Überzugswirkungen des Baufeldes an der Südflanke auf das Deckgebirge erfassen zu können. Die vertikalen Modellränder und die Basis sind normal zum Rand fixiert und die Modelloberfläche ist frei beweglich.

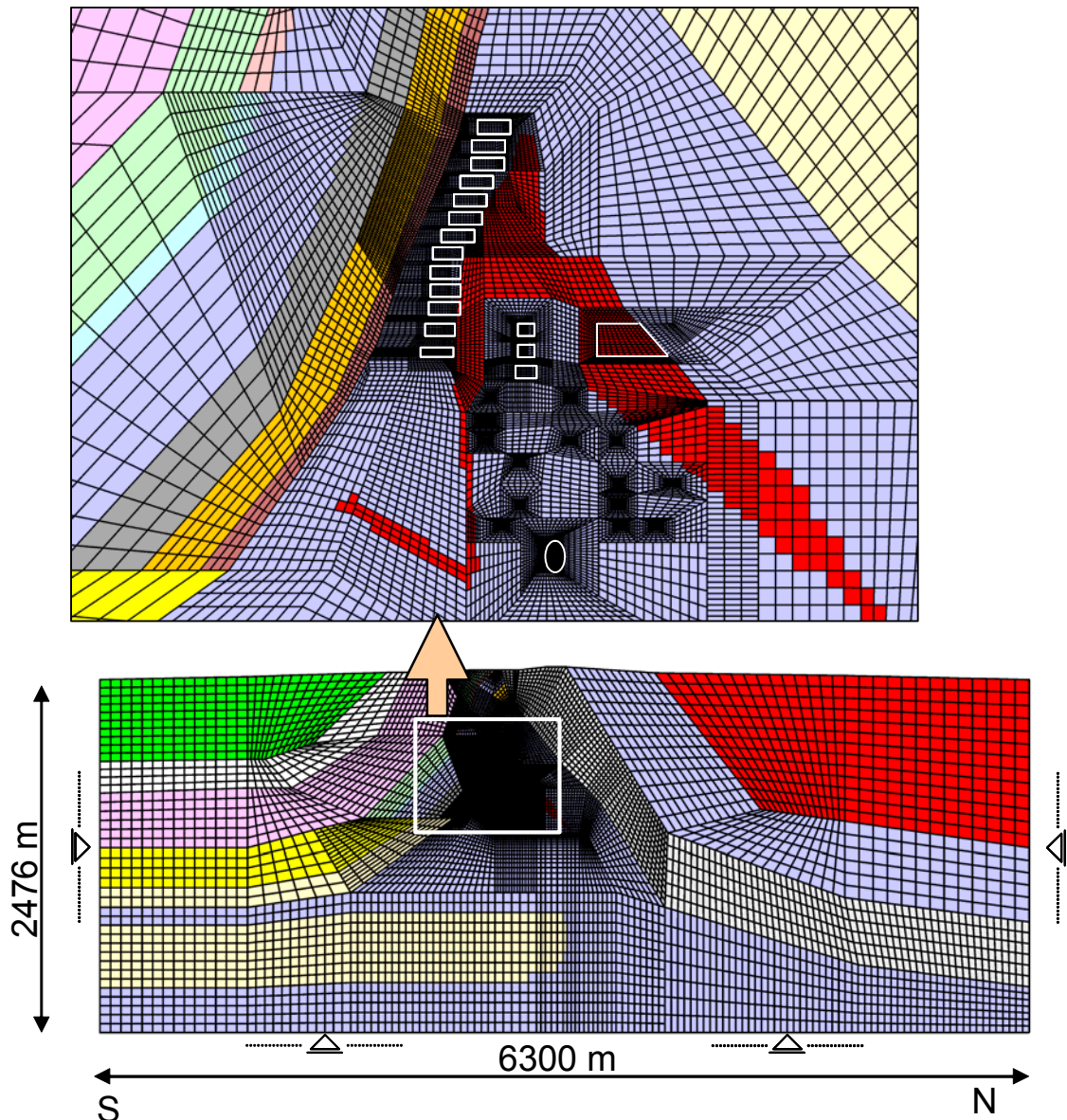


Bild 9: 3D-Modell in der Gesamtansicht (unten) und im Detail (oben) gemäß Bild 1, die W-E-Abmessung beträgt 36 m

Für die Abbauhoriizonte kam der visko-elasto-plastische Stoffansatz nach Minkley zur Anwendung. Die Simulation des Versatzdruckverhaltens erfolgte im Carnallititbaufeld mit einem Kompaktionsansatz und in den Steinsalzbaufeldern mit Randlasten. Die Deckgebirgsschichten wurden mit einem elasto-plastischen Stoffgesetz mit Festigkeitsanisotropie berücksichtigt. Die Modellierung erfolgte in den Schritten:

- Berechnung des primären Spannungszustandes vor der Bergwerksauffahrung
- Zeitliche Modellierung der Sohlenauffahrungen
- Modellierung des Versatzeinbringens
- Rechnung bis zur Gegenwart

In mehrjähriger Arbeit gelang es mit dem beschriebenen Rechenmodell, die Entfestigungs- und Bruchprozesse im Bergwerk (speziell an der Südflanke) sowie die Gebirgsspannungumlagerungen auf das südliche Deckgebirge mit dort folgender Festigkeitsüberschreitung so nachzubilden, dass die Ergebnisse der Standortüberwachung (Verschiebungs- und Spannungsmessungen, Mikroseismik, visuelle Befunde) bestätigt wurden. Als Beleg für die gute Übereinstimmung sind in Bild 10 die berechneten und gemessenen Verschiebungen des südlichen und nördlichen Abbaustoßes auf der 553-m-Sohle gegenübergestellt.

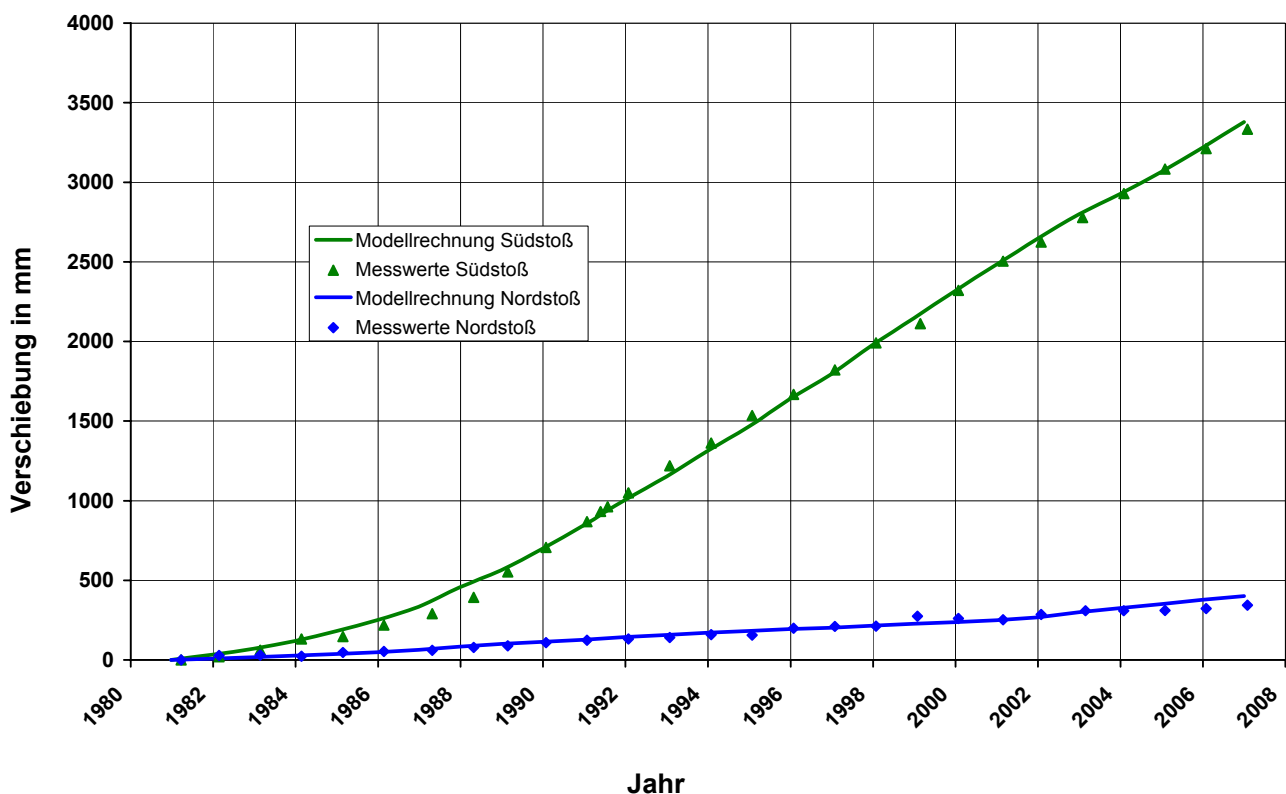


Bild 10: Vergleich der berechneten (Kurve) mit den gemessenen (Symbole) Verschiebungen des südlichen und nördlichen Abbaustoßes der 553-m-Sohle

Bis zur Gegenwart ist es an der Südflanke zu umfangreichen Schwebenbrüchen gekommen, wobei jedoch in den meisten Fällen die noch existierenden Schwebenringe weiterhin eine Stützwirkung auf die Pfeiler ausüben. In Bild 11 ist eine solche berechnete und typische Situation im Teufenniveau der 574-m-Sohle dargestellt. Das Bild zeigt einen Ausschnitt aus der Südflanke, dessen Oberfläche einem Horizontalschnitt in halber Kammerhöhe der 574-m-Sohle entspricht und dessen Basis in halber Schwebenhöhe zur 595-m-Sohle liegt. Die Abbaureihe befindet sich in der streichenden Baufeldmitte und damit dem Verschiebungsmaximum der Südflanke. Die Versatzwirkung in Höhe des Eigengewichtes wird mit Randlasten simuliert. Die Elemente des Schwebenkerns wurden in Folge der zu großen plastischen Deformationen mit einhergehender vollständiger Entfestigung entfernt. Eine weitere Zone großer plastischer Scherdeformation $> 21\%$ mit Entfestigung der Maximalspannung auf < 3 MPa bildet sich im Pfeilerkonturbereich in halber Kammerhöhe aus. Dieses Ergebnis entspricht den in situ beobachteten Rissflächen und Aufblätterungen in den Konturzonen der Tragelemente.

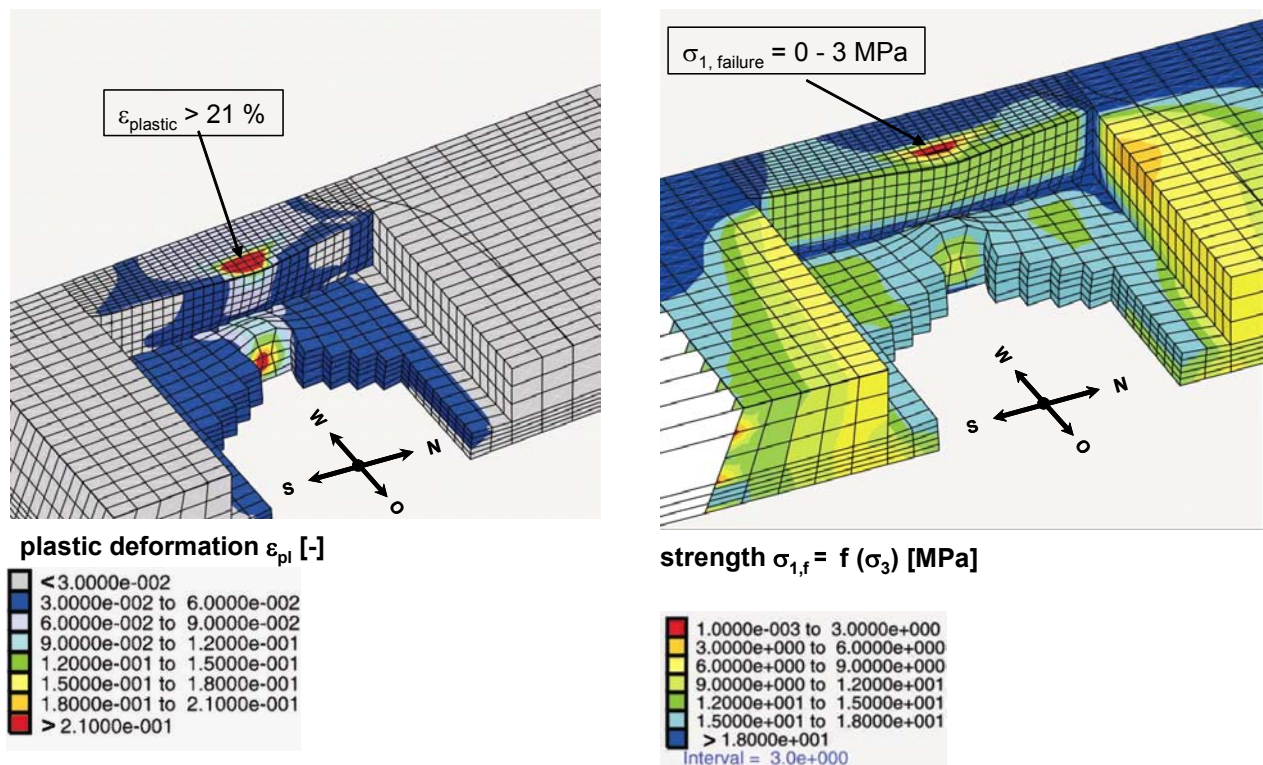


Bild 11: Gegenwärtige plastische Scherdeformation (links) und Festigkeit (rechts) in der Teufe der 574-m-Sohle

Da mit den weiteren Deckgebirgsverschiebungen, auch wenn die Raten infolge der Versatzwirkung degressiv sind, die Schädigungen in den Pfeilern und Schwebenringen zunehmen werden, ist ein Verlust der Stützwirkung durch einen vollständigen Bruch der Schwebenreste nicht auszuschließen. Zur Untersuchung der gebirgsmechanischen Konsequenzen wurden in

zwei Fallstudien die Tragwiderstände im Abbausystem der Südflanke mit und ohne Schwebenringe berechnet. Im Bild 12 wird für den Teufenbereich der 553-m-Sohle gezeigt, dass nach einem im Modell angesetzten vollständigen Bruch der Schwebenringe im Jahr 1995 (hypothetischer Zeitpunkt in einer Fallstudie) innerhalb weniger Jahre ein Tragwiderstandsabfall auf etwa 30 % zu erwarten ist.

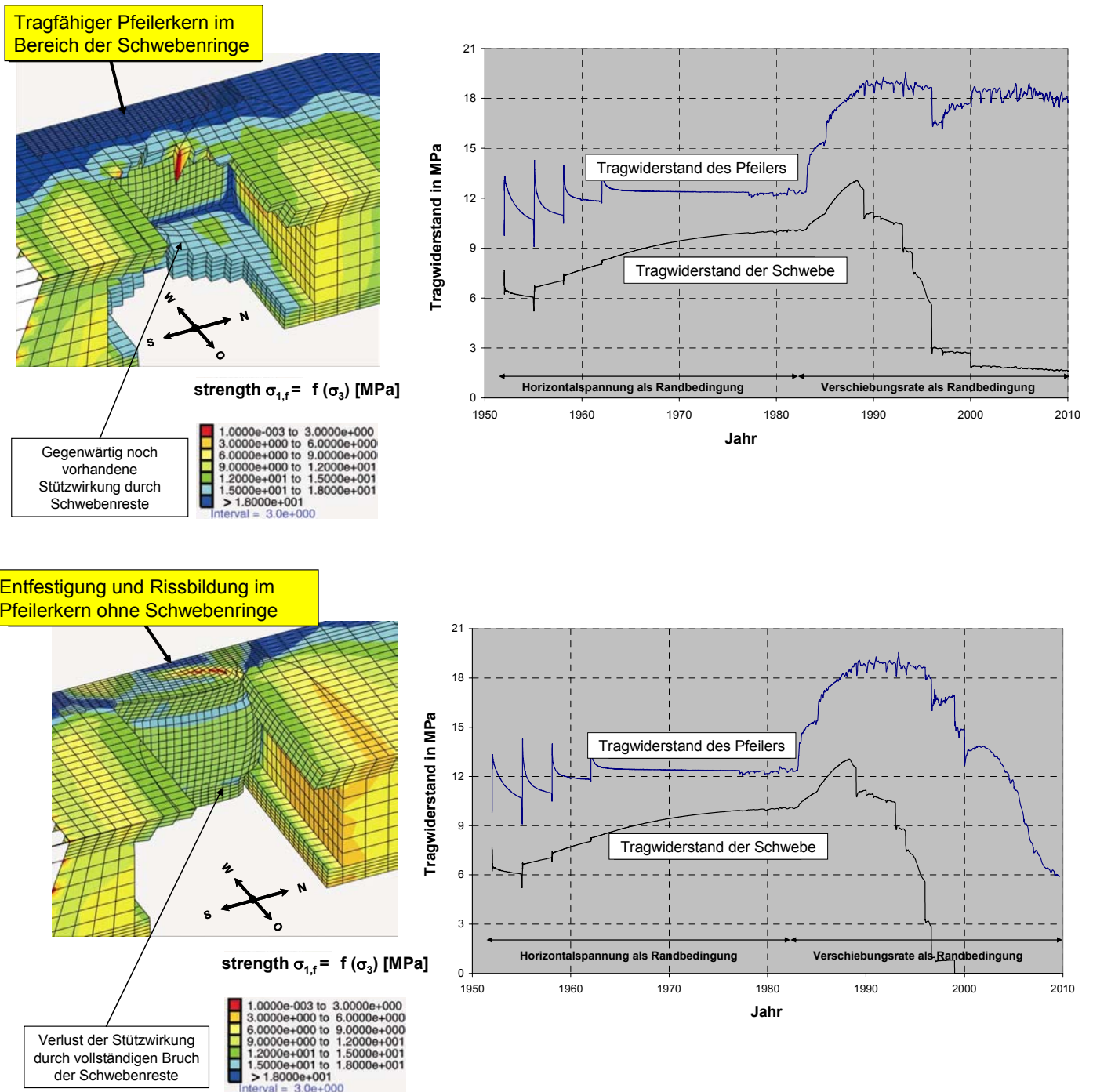


Bild 12: Berechnung der Tragwiderstände an der Südflanke mit Schwebenringen (gegenwärtiger Zustand im Bergwerk, oben) und ohne Schwebenringe (nicht ausschließende Entwicklung, unten) für den Teufenbereich der 553 mS

Während im oberen Teil in Bild 12 die noch verbleibenden Schwebenreste den Pfeiler seitlich stützen und damit in Höhe der Schweben einen tragfähigen Pfeilerkern erhalten, breiten sich im unteren Teil in Bild 12 Entfestigung und Rissbildung auch im vormaligen Stützbereich der Schwebenringe aus und erfassen den gesamten Pfeilerquerschnitt. Die Resttragfähigkeit verringert sich sukzessive und es kommt zu einer integralen Verringerung der Pfeilertragfähigkeit. Diese Rechnung zeigt die hohe Sensitivität des Tragsystems, dessen Resttragwiderstand, zumindest in den am höchsten beanspruchten mittleren Bereichen der Südflanke, entscheidend von der Stützwirkung gebrochener Schwebenringe und der Dämmwirkung des Versatzes abhängt.

Anhand der Messwerte der Spannungsmonitorstationen sind an den ersten Pfeilern derartige Verringerungen der Pfeilertragfähigkeit festzustellen. Die Spannungsverläufe weisen aus, dass Pfeilerabschnitte im Verschiebungsmaximum der Südflanke bis an ihre Festigkeitsgrenze beansprucht sind und mittels Bruchprozessen unter der Beanspruchung nachgeben. Die nicht mehr ertragenen Gebirgsspannungen müssen von benachbarten Bereichen aufgenommen werden und der jetzt schon existierende Tragfähigkeitsverlust wird weitere Pfeiler erfassen. 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), ist nur noch ein Systemtragverhalten in Höhe der Restfestigkeit ableitbar. Solange sich keine wesentlichen Versatzdrücke aufbauen, ist von einer zunehmenden Instabilität auszugehen.

Die Entfestigung der Pfeiler und Schweben an der Südflanke führt zu den bereits beschriebenen Überzugswirkungen auf die unmittelbar angrenzenden Deckgebirgsschichten. In Bild 13 sind die sich ausbildenden Scherbänder im Buntsandstein sowie der Steinsalzbarriere zum Deckgebirge dargestellt. Die Scherbänder im Deckgebirge orientieren sich an den geologischen Großklüften und am Verschiebungsfeld in Richtung Grubengebäude und ihre Lokation stimmt sehr gut mit den Resultaten der mikroseismischen Ortung (siehe Bild 4) überein. Weiterhin korrespondieren die Scherdeformationen im oberen Bereich der Steinsalzbarriere an der Südflanke mit den plastischen Volumendeformationen, die eine Dilatanz und Schädigung anzeigen. In diesem Teufenbereich zwischen 511 und 553 m liegt auch nachweislich die Zutrittsstelle für die Deckgebirgslösung.

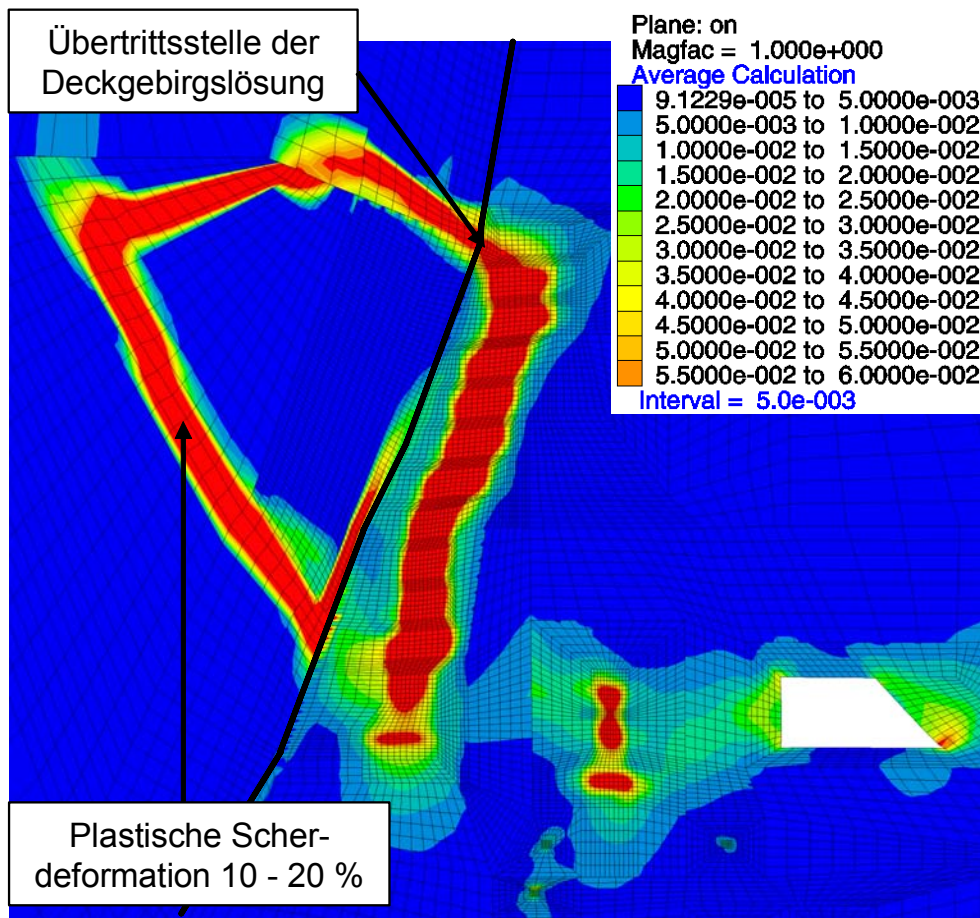


Bild 13: Berechnete gegenwärtige plastische Deformation im Deckgebirge und Bergwerk

Im Ergebnis der umfassenden gebirgsmechanischen Untersuchungen lässt sich für das Steinsalzbaufeld an der Südflanke folgende gebirgsmechanische Zustandsanalyse ableiten:

- Das Tragsystem befindet sich in einem Grenzzustand der dilatanten Entfestigung mit Überzugswirkungen auf das unmittelbare Deckgebirge, die auch dort zu lokalen Bruchprozessen führen.
- Trotz der noch bestehenden Stützwirkung durch die Schwebenringe und der Versatzwirkung, die mit einer gegenwärtig geringen Stützkraft zur Konturstabilisierung beiträgt und das Resttragniveau der Pfeiler aufrecht erhält, werden sich mit den weiteren Deckgebirgsverschiebungen die Bruchprozesse fortsetzen. Bei brechenden Schwebenringen könnte sich der Resttragwiderstand entscheidend verringern.
- Auf Grund der nur noch begrenzten Resttragfähigkeit im mittleren Bereich der Südflanke sowie des Gefährdungspotentials der Zuflussteyerung wird eine schnellstmögliche Schließung des Bergwerkes empfohlen.

6. Prognose der zukünftigen Entwicklung mit und ohne Schließungsmaßnahmen

Zur Einleitung einer gesättigten $MgCl_2$ - Lösung als Schutzfluid wird im Rahmen der Schließungsmaßnahmen keine Alternative gesehen. Damit kommt es in der Nachbetriebsphase zu keiner zusätzlichen Hohlrumschaffung infolge Carnallitersetzung durch die zutretende Deckgebirgslösung und die stabilisierende Wirkung des hydrostatischen Innendruckes behindert den weiter voranschreitenden Entfestigungsprozess im Tragsystem und Deckgebirge. Nur mit dem Schutzfluid kann ein langfristig stabiler Endverwahrungszustand mit harmonisch degressiven und prognostizierbaren Konvergenzen erreicht werden, deren Simulation in den Fluidausbreitungsrechnungen für die Nachbetriebsphase eine wesentliche Grundlage für die Analyse der Langzeitsicherheit (Erreichung des Schützzieles) bildet.

Während der Schutzfluideinleitung ist im entfestigten Tragsystem der Südflanke mit einem Feuchtekriechen, verstärkten Bruchprozessen, Versatzdruckabfall und erhöhten Deckgebirgsverschiebungsraten zu rechnen. Zum Ende der Betriebsphase erreicht das Tragsystem auf Grund des vollen hydrostatischen Stützdruckes jedoch einen stabilen Zustand.

Eine mögliche temporäre Aktivierung der Gebirgsbewegungen in der Einleitungsphase könnte Auswirkungen auf die Zuflusssituationen besitzen. Um solche Auswirkungen zu vermeiden, müssen an die Schließungsmaßnahmen folgende Anforderungen gestellt werden:

- Gleichbleibender bzw. degressiver Verlauf der Deckgebirgsverschiebungsraten und
- Blockierung dynamischer Reaktionen.

Die Einhaltung ist mittels markscheiderischer Messungen und permanenter Standortüberwachung nachzuweisen und die Schließungsmaßnahmen sind bei Bedarf anzupassen.

Die Bewertung unterschiedlicher Varianten des Schließungskonzeptes mit differenzierten Zeitabläufen, Einleitraten des Schutzfluides und zusätzlicher Stabilisierung der Versatzkörper mit Pumpversatz führte zu dem Ergebnis, dass der Aufbau eines pneumatischen Stützdruckes von 10 bar vor Beginn der letzten Phase der Schutzfluideinleitung von der 679- bis zur 490-m-Sohle (Zeitraum 2011 bis 2014) die Einhaltung der oben genannten Kriterien gewährleistet. Für einen Druckluftaufbau müssen die Schächte druckdicht verschlossen sein und die Grubenbelegschaft ist bei der damit notwendigen weiteren mannlosen Fluideinleitung keinen bergbausicherheitlichen Gefahren durch beschleunigte Deformations- und Bruchprozesse mehr ausgesetzt.

Von der GSF wurde Anfang 2006 ein neuer Zeitplan für die Schließung erarbeitet, der die wesentlichen Elemente einschließlich der Druckluftherzeugung weiter beinhaltet, jedoch die Schutzfluideinleitung von der 679- bis zur 490-m-Sohle 2,5 Jahre später im Zeitraum 2014 bis 2016 vorsieht. Mit dreidimensionalen gebirgsmechanischen Modellrechnungen wurde vom IfG Leipzig nachgewiesen, dass auch der nunmehr im Jahr 2014 aufgebaute pneumatische Stützdruck von 10 bar eine Eskalation der Deckgebirgsverschiebungsraten sowie Auslösung dynamischer Reaktionen verhindern kann. Dieser Nachweis war für den verlängerten Zeitplan unabdingbar, da eine spätere Schutzfluideinleitung in einem Tragsystem stattfindet, welches durch größere Entfestigung und Rissbildung im Bergwerk und höhere plastische Deformationen im Deckgebirge gekennzeichnet ist. Der Versatzdruck ist zwar zu einem späteren Zeitpunkt geringfügig höher, da aber bei der Einleitung von einem nahezu vollständigen Versatzdruckabfall ausgegangen werden muss, ist die Systemanregung entsprechend stärker.

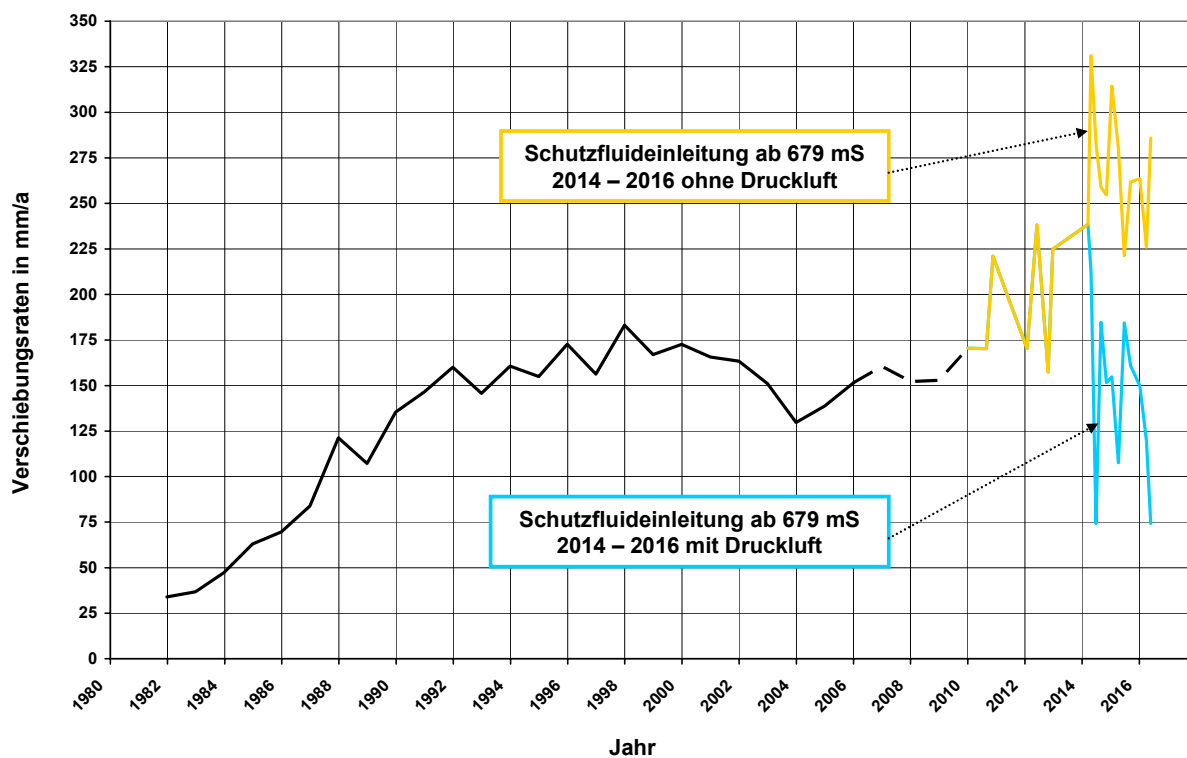


Bild 14: Horizontale Verschiebungsraten des südlichen Deckgebirges in Teufe 553 m ohne und mit pneumatischem Stützdruck während der Schutzfluideinleitung

In Bild 14 sind die Ergebnisse der 3D-Prognoserechnungen für das aktuelle Schließungskonzept ohne und mit pneumatischem Stützdruck für das Teufenniveau der 553-m-Sohle dargestellt. Die aufgeführten Jahreszahlen bezeichnen die geplante Schutzfluideinleitung auf der 679-m-Sohle bis in die höchstgelegenen Bereiche der Südflanke. Die Einleitung auf den tieferen Sohlen ab dem Teufenniveau 775 m erfolgt bereits ab 2010 vor der Druckluftherzeugung.

gung. Die Deckgebirgsverschiebungsraten sind bei der Einleitung zum späteren Zeitpunkt höher, der stabilisierende Luftdruck kompensiert aber diese Reaktion und bewirkt die Einhaltung der Größenordnung der bisherigen Verschiebungsraten. Die Prognoserechnungen enden mit dem Anstieg des Lösungsspiegels bis zur 490-m-Sohle. Diese Darstellungen zeigen, dass auch im dreidimensionalen Modell die Notwendigkeit eines pneumatischen Stützdrukkes nachgewiesen wird. Dies gilt umso mehr für eine verlängerte Betriebsphase bis zur Einleitung.

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

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

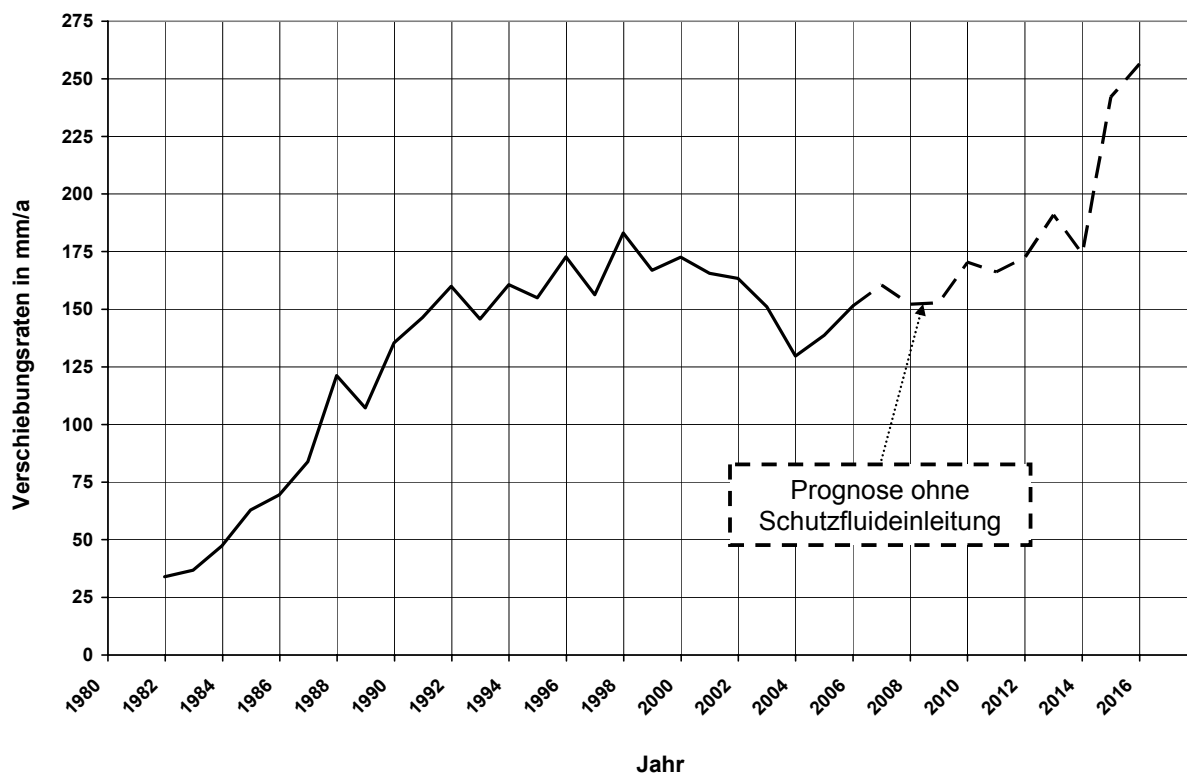


Bild 15: Horizontale Verschiebungsraten des südlichen Deckgebirges in Teufe 553 m ohne Schließungsmaßnahmen (Prognose der weiteren Entwicklung)

- Das großräumige Rechenmodell bzw. alle gebirgsmechanischen Modelle müssen im Rahmen der zukünftigen begleitenden Begutachtung mit In-situ-Messwerten überprüft und ggf. korrigiert werden. Eine Verbesserung und Erweiterung der Prognosefähigkeit ist deshalb entscheidend von den Daten der Standortüberwachung abhängig.
- Da die Zuverlässigkeit mit steigendem Prognosezeitraum bis zum Ende der Betriebsphase grundsätzlich abnimmt, empfiehlt das IfG im Rahmen der begleitenden Begutachtung der Schließungsmaßnahmen, die Tragfähigkeit anhand der fortgeschriebenen Standortdaten und geplanten technischen Maßnahmen aktualisiert zu bewerten.

7. Zusammenfassung

7.1 Gebirgsmechanische Zustandsanalyse

Die Abbaufelder im Steinsalz und Carnallitit waren für die vorgesehenen Betriebszeiten von Jahrzehnten ohne zusätzliche Stützmaßnahmen (Versatz) nicht standsicher dimensioniert. Solche nachgiebigen Tragsysteme reagieren mit Kriechverformungen, dilatanter Entfestigung sowie lokalen Bruchprozessen auf die eingetragene Gebirgsspannung. Von den Entfestigungsprozessen werden zunächst die Pfeiler- und Schwebenkonturen erfasst und die nicht mehr aufnehmbaren Spannungen müssen von den besser gestützten Kernzonen aufgenommen werden. Wenn infolge Entfestigung und lokaler Risse auch die Pfeiler- und Schwebenkerne an Tragfähigkeit verlieren, erfolgt ein weiterer Lastabtrag auf benachbarte Pfeiler und schließlich auf die Baufeldränder. Die über Jahrzehnte langsam ablaufenden Spannungsumlagerungsprozesse sind sehr komplex, nur mit umfangreichen In-situ-Messungen nachzuweisen und nur mit speziellen Stoffgesetzen nachzubilden. Mit Laborversuchen am Steinsalz konnte gezeigt werden, dass auch bei den geringen minimalen Druckeinspannungen in den Tragelementen der Südflanke nach Überschreitung der maximalen Festigkeit keine vollständige Entfestigung eintritt, sondern sich Restfestigkeitsplateaus ausbilden, die bei den relevanten Verformungsraten bis zum Ende der Betriebsphase prognostiziert werden können und demzufolge eine wesentliche Bedeutung für die Tragfähigkeitsprognose besitzen. Zur Modellierung und Bewertung dieser Erscheinungen sind die üblichen, in der Salzmechanik zur Analyse der Stabilität und Barrierewirkung des Gebirges gebräuchlichen Modelle und Kriterien nicht mehr anwendbar. Es wurde ein am IfG Leipzig entwickelter Stoffansatz verwendet, mit dem der zeitabhängige Entfestigungsprozess abgebildet werden kann.

Die Pfeilerkonturabschalungen und Schwebenaufblätterungen wurden im Bergwerk schon in den 1960er Jahren beobachtet, aber damals als normal für den Salzbergbau und für das Systemtragverhalten als unbedenklich angesehen. Man ging davon aus, dass in der steilen

Lagerung ein Lastabtrag über das südlich und nördlich benachbarte Gebirge stattfindet und dort auch bei einem hohen Durchbauungsgrad keine Stabilitätsprobleme entstehen.

Tatsächlich konnte diese seitliche Stützwirkung am Standort Asse II nicht zum Tragen kommen, da die oberen Sohlen der Südflanke einen zu geringen Abstand zum südlichen, gering festen und stark geklüfteten Deckgebirge aufweisen. Es kam auch dort infolge der aus dem Bergwerk umverlagerten Spannungen zu Festigkeitsüberschreitungen mit nachfolgenden Rückwirkungen auf die Südflanke. Gegenwärtig sind insbesondere im Bereich des horizontalen Verschiebungsmaximums der Südflanke die meisten Schweben vollständig durchgebrochen (es existieren nur noch äußere Schwebenringe) und die Pfeiler sind von einer Vielzahl von Rissen durchzogen.

Bzgl. der gemessenen querschlägigen Horizontalstauchung der Pfeiler an der Südflanke dominiert ein Verschiebungsanteil aus südlicher Richtung mit ca. 90 %. Diese durch Verschiebungsmessungen nachgewiesene erhöhte Deckgebirgsmobilität konnte neben dem hohen Zerlegungsgrad und der abgeminderten Gebirgsfestigkeit nur mit einem zusätzlichen Festigkeitsverlust infolge mechanisch-hydraulischer Wechselwirkungen in den hydraulisch angeschlossenen Trennflächen begründet werden. Eine solche Modellvorstellung, die sich aus den In-situ-Befunden ableiten lässt, führt zu einem komplexen Tragsystem des Abbaufeldes an der Südflanke und unmittelbaren Deckgebirges mit gebirgsmechanischen Wechselwirkungen und impliziert, dass bei einer nachlassenden Tragfähigkeit im Abbaufeld auch von einer unmittelbaren Verschiebungsaktivierung im Deckgebirge ausgegangen werden muss.

Das Tragsystem der Südflanke befindet sich in einem Grenzzustand der dilatanten Entfestigung mit Überzugswirkungen auf das unmittelbare Deckgebirge, die auch dort zu lokalen Bruchprozessen führen. Trotz der noch bestehenden Stützwirkung durch die Schwebenringe und der Versatzwirkung werden sich mit den weiteren Deckgebirgsverschiebungen die Bruchprozesse fortsetzen. Bei brechenden Schwebenringen könnte sich der Resttragwiderstand entscheidend verringern. Auf Grund der nur noch begrenzten Resttragfähigkeit im mittleren Bereich der Südflanke sowie des Gefährdungspotentials der Zuflussteigerung wird eine schnellstmögliche Schließung des Bergwerkes empfohlen.

7.2 Prognose der gebirgsmechanischen Entwicklung

Zur Einleitung einer gesättigten $MgCl_2$ - Lösung als Schutzfluid wird im Rahmen der Schließungsmaßnahmen keine Alternative gesehen. Damit kommt es in der Nachbetriebsphase zu keiner zusätzlichen Hohlrumschaffung infolge Carnallitizersetzung, die stabilisierende Wir-

kung des hydrostatischen Innendruckes behindert den weiter voranschreitenden Entfestigungsprozess und nur mit dem Schutzfluid werden harmonisch degressive Konvergenzraten erreicht, deren Simulation in den Fluidausbreitungsrechnungen für die Nachbetriebsphase eine wesentliche Grundlage für die Analyse der Langzeitsicherheit (Erreichung des Schutzzieles) bildet.

Mit der Schutzfluideinleitung ist im entfestigten Tragsystem der Südflanke jedoch mit einem Feuchtekriechen, verstärkten Bruchprozessen, Versatzdruckabfall und erhöhten Deckgebirgsverschiebungsraten zu rechnen. Bevor das Tragsystem am Ende der Betriebsphase auf Grund des vollen hydrostatischen Stützdruckes einen stabilen Zustand erreicht, könnte eine temporäre Aktivierung der Gebirgsbewegungen in der Einleitungsphase zu lokal begrenzten Bruchvorgängen mit Auswirkungen auf die Zuflusssituationen führen. Um solche Auswirkungen zu vermeiden, müssen an die Schließungsmaßnahmen die Anforderungen degressiver oder zumindest gleich bleibender Deckgebirgsverschiebungsraten sowie der Blockierung dynamischer Reaktionen gestellt werden. Die Einhaltung ist mittels markscheiderischer Messungen und permanenter Standortüberwachung nachzuweisen.

Bzgl. der vom Auftraggeber geplanten Schließungsmaßnahmen konnte die gebirgsmechanische Zulässigkeit (Einhaltung der Anforderungen) auf Grund des hohen Schädigungszustandes im Tragsystem sowie der Deckgebirgsmobilität nur mit einem pneumatischen Stützdruck in der letzten Phase der Schutzfluideinleitung ab der 679-m-Sohle nachgewiesen werden. Dieser Nachweis konnte auch für einen verlängerten Zeitplan (Schutzfluideinleitung in der Südflanke bis 2016) geliefert werden, bei dem die Einleitung in einem Tragsystem stattfindet, welches durch größere Entfestigung und Rissbildung im Bergwerk und höhere plastische Deformationen im Deckgebirge gekennzeichnet ist. Der Versatzdruck ist zwar zu einem späteren Zeitpunkt geringfügig höher, da aber bei der Einleitung von einem nahezu vollständigen Versatzdruckabfall ausgegangen werden muss, ist die Systemanregung entsprechend stärker. Für die bis zur Schließung verbleibende Standzeit kann eine Resttragfähigkeit prognostiziert werden, solange wie die den Prognosemodellen zugrunde liegenden Systembedingungen, wie Zuflussentwicklung und dynamische Anregungen, nicht eskalieren.

In einer Modellrechnung ohne Schließungsmaßnahmen (Prognose ohne jegliche Eingriffe) wurde gezeigt, dass es infolge der seit Jahrzehnten andauernden Entfestigungs- und Bruchprozesse ab 2014 zu einem zunehmenden Tragfähigkeitsverlust und damit einer Erhöhung der Deckgebirgsverschiebungsraten kommen kann. Unmittelbar nach diesem Jahr ist aber kein Zusammenbruch des Abbaufeldes abzuleiten, sondern die Rechnung belegt unter der Zielstellung eines degressiven Verformungsprozesses die gegenwärtig begrenzte Prognosefähigkeit.

Das dieser Rechnung zugrunde liegende 3D-Modell ist im zeitlichen Verlauf der weiteren Betriebsphase anhand der Daten der Standortüberwachung zu überprüfen und anzupassen. So wurde z. B. die in den Bildern 14 und 15 dargestellte Erhöhung der Verschiebungsraten ab 2005 bisher nicht festgestellt. Dies kann auf höhere Versatzdrücke oder auf einen verstärkten horizontalen Lastabtrag über die Baufeldränder zurückzuführen sein. Mit einem weiteren Anstieg der Versatzdrücke und dem Nachweis durch In-situ-Messungen werden die Modellrechnungen so angepasst, dass sich die Übereinstimmung mit den Messwerten und damit die Prognosegenauigkeit erhöhen.

Aber auch wenn anhand zukünftiger Modellrechnungen mit geringfügig höheren Versatzdrücken die gegenwärtige Degressivität der Verschiebungsraten der Südflanke und Pfeilerstauchungsraten nachvollziehbar sein wird und eine integrale Systemfestigung im Modell entsprechend später eintritt, wäre aus folgenden Gründen keine andere Empfehlung als eine schnellstmögliche Schließung zu geben:

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

Glossar

Auflockerung:	Volumenvergrößerung infolge innerer Schädigung, Mikro- bis Makrorissbildung, Dilatanz.
Elastisch:	Materialeigenschaft entsprechend einer elastischen Feder, zeitunabhängig.
Entfestigung:	Festigkeitsverringerung infolge innerer Schädigung.
Fremdversatz:	Versatzmaterial von einer Steinsalzhalde in Niedersachsen, welches nach Aufmahlen und Trocknung in die Abbaue eingebracht wurde.
Hauptspannungen:	Im dreidimensionalen Raum wirken drei senkrecht aufeinander stehende Hauptspannungen (exakter Hauptnormalspannungen), in deren Richtung keine Scherspannungen auftreten.
Kriechen:	In der Materialphysik bleibende bruchlose und weitgehend rissfreie Formänderung eines Festkörpers (auch Fließen) unter einer angreifenden Spannung. In der Salzmechanik Begriffsanwendung auf Übergangskriechen nach Spannungswechsel oder -aufgabe (primär), stationäres bruch- und rissfreies Kriechen (sekundär) und beschleunigtes Kriechen im Bruchzustand (tertiär).
Magnitude:	Maßzahl für die Energie seismischer Ereignisse (Verwendung des Logarithmus der Energie). Die im Bergwerk Asse II gemessenen Magnituden repräsentieren Bruchvorgänge mit geringer Energie, die nur mit empfindlichen Messgeräten aufgezeichnet werden können.
Manteldruck:	Im üblichen Festigkeitsversuch in einer Prüfwelle auf die Mantelfläche eines zylindrischen Prüfkörpers wirkender Stützdruck (meist Öldruck). Der Prüfkörper repräsentiert ein Volumenelement im Tragpfeiler, bei dem der Stützdruck der minimalen Druckeinspannung (kurz Einspannung) entspricht.
Mikroseismik:	Die Seismik ist ein Fachgebiet der angewandten Geophysik. Im Bergwerk Asse II werden im Rahmen der Standortüberwachung die bei Bruchprozessen ausgesandten seismischen Wellen erfasst, analysiert und bewertet. Der Vorsatz „Mikro“ bedeutet, dass es sich um seismische Wellen deutlich unter der menschlichen Wahrnehmungsgrenze handelt.
Lastfaktor:	In einer definierten Systemfläche Verhältnis der gesamten Systemfläche zur nicht abgebauten Lagerstättenfläche (Tragelemente), Maß für die Belastung der Tragelemente, Kehrwert der Abbauverluste.

Plastisch:	Materialeigenschaft, bleibende Formänderung unter einer Belastung, zeitunabhängig.
Querschlägig:	Richtung senkrecht zum Streichen.
Schwebe:	Horizontale, nicht abgebaute Scheibe aus Salzgestein, die zwei übereinander liegende Abbaue voneinander trennt.
Streichend:	Richtung der Horizontalen auf einer geneigten, ebenen geologischen Fläche.
Teufe:	Bergmännisch für Tiefe.
Überzugswirkung:	Umverlagerung der Spannungen von Gebirgsbereichen, die der Belastung ausweichen (durch Kriechen, Relaxation oder Entfestigung) auf tragfähigere Bereiche.
Versatz:	Material, mit dem die Hohlräume eines Bergwerkes zur Stabilisierung verfüllt werden.
Viskos:	Materialeigenschaft entsprechend einem viskosen Zylinder (Stoßdämpfer), zeitabhängig.
Visko-elasto-plastisch:	Zeitgleiche und sich überlagernde Verknüpfung der drei Materialeigenschaften. Nur in dieser Wechselwirkung ist das komplexe Verhalten der Salzgesteine beschreibbar.
Zerlegungsgrad:	Produkt aus Klüftigkeitsziffer (Anzahl der Klüfte pro Meter) und dem Klufflächenanteil für eine Kluffschar