

BMBF-Verbundvorhaben:

## **Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen**

A. Hampel<sup>1)</sup>, U. Heemann<sup>2)</sup>, O. Schulze<sup>2)</sup>, F. Zetsche<sup>2)</sup>, A. Pudewills<sup>3)</sup>, R. Günther<sup>4)</sup>, W. Minkley<sup>4)</sup>, K. Salzer<sup>4)</sup>, Z. Hou<sup>5)</sup>, R. Wolters<sup>5)</sup>, U. Düsterloh<sup>5)</sup>, R. Rokahr<sup>6)</sup>, D. Zapf<sup>6)</sup>

- 1) Am Fasanenweg 4, 55270 Essenheim
- 2) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
- 3) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
- 4) Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Leipzig
- 5) Technische Universität Clausthal, Professur für Deponietechnik und Geomechanik
- 6) Universität Hannover, Institut für Unterirdisches Bauen (IUB)

### **Projekt:**

Dieses vom BMBF geförderte Verbundvorhaben wird in enger Kooperation der oben genannten Projektpartner durchgeführt. Das Vorhaben hat am 01. April 2004 begonnen und wird am 30. November 2006 enden.

### **Einleitung**

Für die Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen muss sowohl die Stabilität einer Untertagedeponie während der Betriebsphase als auch die langfristige Integrität der geologischen Barriere in der Nachbetriebsphase nachgewiesen werden. Dazu werden unter anderem Simulationsrechnungen zum mechanischen Verhalten des Wirtsgesteins durchgeführt. Mit Stoffgesetzen wird dabei das grundsätzliche Verhalten unter verschiedenen Einflüssen beschrieben, während durch charakteristische Kennwerte für die Anpassparameter in den Stoffgesetzen individuelle Unterschiede im Verhalten verschiedener Gesteinstypen berücksichtigt werden.

In den vergangenen Jahrzehnten wurde in Deutschland von verschiedenen Arbeitsgruppen ein umfangreiches experimentelles und theoretisches Know-how zur Salzmechanik erarbeitet. Auf dieser Grundlage sind eine Reihe fortschrittlicher Stoffgesetze und Verfahrensweisen für die Ermittlung charakteristischer Kennwerte und die numerische Behandlung anspruchsvoller Simulationsaufgaben entwickelt und angewendet worden. Im Verbundvorhaben sollen aktuelle Stoffgesetze und Vorgehensweisen der Projektpartner dokumentiert und durch Benchmark-Berechnungen ausgewählter Aufgabenstellungen intensiv überprüft und miteinander verglichen werden. Hieraus sollen sowohl Empfehlungen für die Anwendungen der Stoffgesetze als auch Hinweise für die weitere Stoffgesetzentwicklung abgeleitet werden. Die Arbeiten dienen somit der Erhöhung der Zuverlässigkeit und Akzeptanz der Ergebnisse aus Simulationsrechnungen. Sie sind daher in den FuE-Themenbereich „Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien“ eingeordnet.

Dieses erste Verbundvorhaben zu einem Stoffgesetzvergleich befasst sich ausschließlich mit dem mechanischen Verhalten von Steinsalz, da hierzu bereits eine Vielzahl von Verformungsphänomenen wie transientes und stationäres Kriechen, Dilatanz (Auflockerung) und Schädigung, Bruch und Kriechbruch sowie Nachbruchverhalten und Restfestigkeit unter ver-

schiedenen Einflüssen (Differenzspannung, minimale Hauptspannung, Feuchtigkeit) zu betrachten sind. Diese Phänomene sind zudem physikalisch miteinander gekoppelt, wodurch deren stoffgesetzliche Beschreibung allein schon eine komplexe Aufgabe ist. Sie bildet auch eine wichtige Grundlage für das Verständnis und die Modellierung weiterer wichtiger Phänomene wie den Zusammenhang zwischen Schädigung, Porosität und Permeabilität von Steinsalz, die thermisch-hydraulisch-mechanische Kopplung, den Einfluss von Gas- oder Flüssigkeitsdrücken auf die Öffnung und den Fortschritt von Rissen sowie die Verheilung von Rissen.

Da dieses Vorhaben auf die untertägige Entsorgung chemotoxischer Abfälle im Steinsalz ausgerichtet ist (Förderkennzeichen 02 C 1004 bis 1054), steht das Gesteinsverhalten bei Umgebungstemperaturen im Vordergrund.

Dieser Bericht dokumentiert den Stand des Verbundvorhabens zum Zeitpunkt des 7. Projektstatusgesprächs am 03. und 04. Mai 2006.

## Projektübersicht

Die Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die von den Projektpartnern in dem Vorhaben verwendeten Stoffgesetze und Rechenprogramme. Die Eigenschaften und mathematischen Formulierungen der Stoffgesetze können in diesem Bericht nicht ausgeführt werden. Daher werden im Folgenden nur einige kurze Erläuterungen zu Tabelle 1 gegeben.

Projektpartner	Stoffgesetze	Programmsysteme
BGR Hannover	CDM	JIFE (FEM)
A. Hampel	CDM	FLAC (FDM)
FZK-INE	Trans. + station. Kriechen + FZK-Modell f. Dilatanz	ADINA, MAUS (FEM)
IfG Leipzig	Modell Günther/Salzer, Modell Minkley	FLAC (FDM), UDEC (DE)
TU Clausthal	Modell Hou/Lux	FLAC (FDM), MISES3 (FEM)
Uni Hannover	IUB-MDCF	UT2D (FEM), FLAC (FDM)

*Tabelle 1: Projektpartner, verwendete Stoffgesetze und Rechenprogramme (FEM: Finite-Elemente-Methode, FDM: Finite-Differenzen-Methode, DE: Distinct Element Code)*

Das Composite-Dilatanz-Modell (CDM) wurde von Hampel in enger Kooperation mit der BGR entwickelt. Während die BGR sich mit dem neuen, in der Entwicklung befindlichen FEM-Programm JIFE an dem Vorhaben beteiligt, verwendet Hampel wie eine Reihe anderer Partner das FDM-Programm FLAC-2D. Das FZK-INE benutzt in den beiden FEM-Programmen ADINA und MAUS implementierte Ansätze für das transiente und stationäre Kriechen sowie für die Modellierung der Dilatanzentwicklung das FZK-Modell, ein modifiziertes Heinkorthaus-Modell für Salzversatz. Das IfG Leipzig beteiligt sich mit zwei Stoffgesetzen, zum

einen mit dem erweiterten Dehnungs-Verfestigungs-Ansatz von Günther und Salzer, zum anderen mit einem visko-elasto-plastischen Modell von Minkley. Während die TU Clausthal das in dem beteiligten Institut von Hou und Lux entwickelte Stoffgesetz verwendet, benutzt das IUB der Universität Hannover eine dort modifizierte und weiterentwickelte Version des MDCF-Modells (Multimechanism Deformation Coupled Fracture) der Sandia Labs.

Die Arbeiten im Verbundvorhaben können den in Tabelle 2 skizzierten sechs Projektphasen zugeordnet werden.

In Phase 1 wurde nach dem Schließen einer Kooperationsvereinbarung zwischen den sechs Projektpartnern zunächst ein Start-Workshop durchgeführt, auf dem die von den Partnern jeweils verwendeten Stoffgesetze und Programm-Codes vorgestellt, die in diesem Vorhaben zu behandelnden Verformungsphänomene abgegrenzt und die von jedem Partner in den Benchmark-Modellrechnungen durchzuführenden Simulationen festgelegt wurden. Es zeigte sich, dass trotz der bei den Teilnehmern vorhandenen umfangreichen experimentellen Datenbasis noch spezielle Laborversuche durchzuführen waren, um jedem Partner die Bestimmung von Kennwerten für sein Stoffgesetz und den für Phase 2 ausgewählten Salztyp zu ermöglichen und um bestimmte Eigenschaften der Stoffgesetze durch Nachrechnen dieser Versuche eingehend überprüfen zu können. Als Beispiel sei die Erholung des nach vorheriger Verformung verfestigten Steinsalzes als Folge einer Spannungsreduktion genannt. Diese kommt in der Praxis nach der Auffahrung untertägiger Hohlräume im Steinsalz in deren Umgebung vor und muss daher von den Stoffgesetzen korrekt beschrieben werden.

In den Phasen 2 und 3 wurden die festgelegten Benchmark-Rechnungen von jedem Partner mit dem eigenen Stoffgesetz und Programmsystem durchgeführt. Beispiele für die Ergebnisse dieser Rechnungen werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt.

Gegenstand des ersten Teils der Modellrechnungen in Phase 2 war die Nachrechnung spezieller (spannungsgesteuerter) Kriech- und (dehnungsgesteuerter) Festigkeitsversuche aus dem Labor mit einem experimentell besonders gut untersuchten „Referenz-Steinsalz“, dem Speisesalz von der 800-m-Sohle der Schachanlage Asse II. Das vorhandene Datenmaterial, ergänzt

<p><b>Phase 1:</b> Vorbereitende Arbeiten Durchführung spezieller Laborversuche für Phase 2</p>	<p><b>Phase 2:</b> Kennwertbestimmung für Referenzsalztyp Nachrechnungen von Laborversuchen mit Referenzsalztyp</p>	<p><b>Phase 3:</b> Kennwertbestimmung für Salztyp der UTS Simulationsrechnungen von einfachen Untertagestrukturen</p>
<p><b>Phase 4:</b> Erstellung der Einzelberichte der Projektpartner</p>	<p><b>Phase 5:</b> Vergleich der Rechenergebnisse, Verfahren und Stoffgesetze Ausarbeitung von Empfehlungen</p>	<p><b>Phase 6:</b> Dokumentation und Publikation der Ergebnisse</p>

*Tabelle 2: Übersicht über den Projektablauf*

durch die in Phase 1 noch durchgeführten Versuche, erlaubte jedem Partner zunächst die Bestimmung einheitlicher Kennwerte (Zahlenwerte) der jeweiligen Stoffgesetzparameter für diesen Salztyp. Nach der halb-analytischen (1D-)Nachrechnung verschiedener Versuche wurde in dieser Phase auch eine erste 2D-Modellrechnung zur Ausbauchung einer in einem Festigkeitsversuch unter hoher Endflächenreibung gestauchten zylindrischen Salzprobe aus Speisesalz simuliert.

Phase 3 umfasst den zweiten Teil der Benchmark-Rechnungen. Aufgabe war zum einen, die Spannungs- und Verformungsentwicklung in der Umgebung einer durch In-Situ-Messungen gut dokumentierten Einzelstrecke im Staßfurt-Steinsalz (z2) der Grube Sondershausen zu berechnen. Auch für diesen Salztyp waren anhand von Laborversuchsdaten zunächst die Kennwerte der Stoffgesetzparameter zu bestimmen. Zum anderen war mit den gleichen Kennwerten die Verformung eines fiktiven schlanken Pfeilers in drei verschiedenen Teufenlagen für einen Simulationszeitraum von 100 Jahren zu berechnen. Die Vorgaben waren so gewählt, dass bei diesen Modellrechnungen eine erhebliche Dilatanz und Schädigung bis hin zum (Kontur-)Bruch des Pfeilers auftreten musste. Damit umfasst der Stoffgesetzvergleich auch die Modellierung solcher in einer realistischen Untertagestruktur auftretenden Vorgänge.

Im Anschluss an die Modellrechnungen waren in Phase 4 von jedem Projektpartner das eigene Stoffgesetz, die Kennwertbestimmungen sowie die Durchführungen und die Ergebnisse der Rechnungen in einem Einzelbericht zu dokumentieren. Zum Zeitpunkt des 7. Projektstatusgesprächs am 03. und 04. Mai 2006 (Stand dieses Berichts) dauerte diese Phase noch an. Auf der Basis der Ergebnisse der Benchmark-Rechnungen ist parallel bereits mit der Zusammenstellung und dem Vergleich der Ergebnisse (Phase 5) begonnen worden. Diese Arbeiten werden es erlauben, Empfehlungen zur Nutzung der Vorhabensergebnisse und zur Anwendung der Stoffgesetze bei verschiedenen Berechnungsaufgaben zum Wirtsgestein Steinsalz in der Umgebung untertägiger Grubengebäude zu formulieren.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus diesem Projekt werden in Phase 6 in einem Abschlussbericht zusammengefasst und in einer Veröffentlichung publiziert sowie auf einer für den 08. November 2006 geplanten öffentlichen Abschlussveranstaltung in der BGR Hannover einem interessierten Fachpublikum vorgestellt.

Da der umfangreiche Vergleich der Ergebnisse der sechs Projektpartner zum Zeitpunkt dieses Berichts erst begonnen hat, können in den folgenden Kapiteln nur einige ausgewählte Beispiele für Resultate der Modellrechnungen verschiedener Partner vorgestellt werden. Mit ihnen sollen die durchgeführten Arbeiten veranschaulicht und die Fähigkeiten aktueller Stoffgesetze aus der Salzmechanik demonstriert werden.

## **Ausgewählte Ergebnisse der Benchmark-Rechnungen in Projektphase 2**

Als Beispiele für die Benchmark-Rechnungen in Phase 2 zeigt Abb. 1 Ergebnisse der Nachrechnungen von spannungsgeregelten Kriechversuchen und Abb. 2 solche von verformungsgeregelten Festigkeitsversuchen mit Asse-Speisesalz, die mit dem Composite-Dilatanz-Modell (CDM) von Hampel durchgeführt wurden. Dabei wurden alle Versuche und Belastungsfälle mit einem gemeinsamen Kennwertsatz für diesen Salztyp nachgerechnet. Die Ermittlung eines gemeinsamen Kennwertsatzes für alle Belastungsfälle ist Voraussetzung für Simulationsrechnungen zu komplexen Strukturen mit zeitlich und räumlich veränderlicher Belastungssituation. Dazu sei betont, dass die Beschreibung von (Langzeit-)Kriechversuchen mit zum Teil mehr als 1000 Tagen Versuchsdauer und über 20 % Verformung, die den Übergang zum stationären Kriechen zeigen, ganz andere Anforderungen an ein Stoffgesetz stellt als die Modellierung von Kurzzeitfestigkeitsversuchen, bei denen aufgrund der permanenten Spannungsänderung ständig das transiente Kriechen vorherrscht. Während sich die Kriechversuche

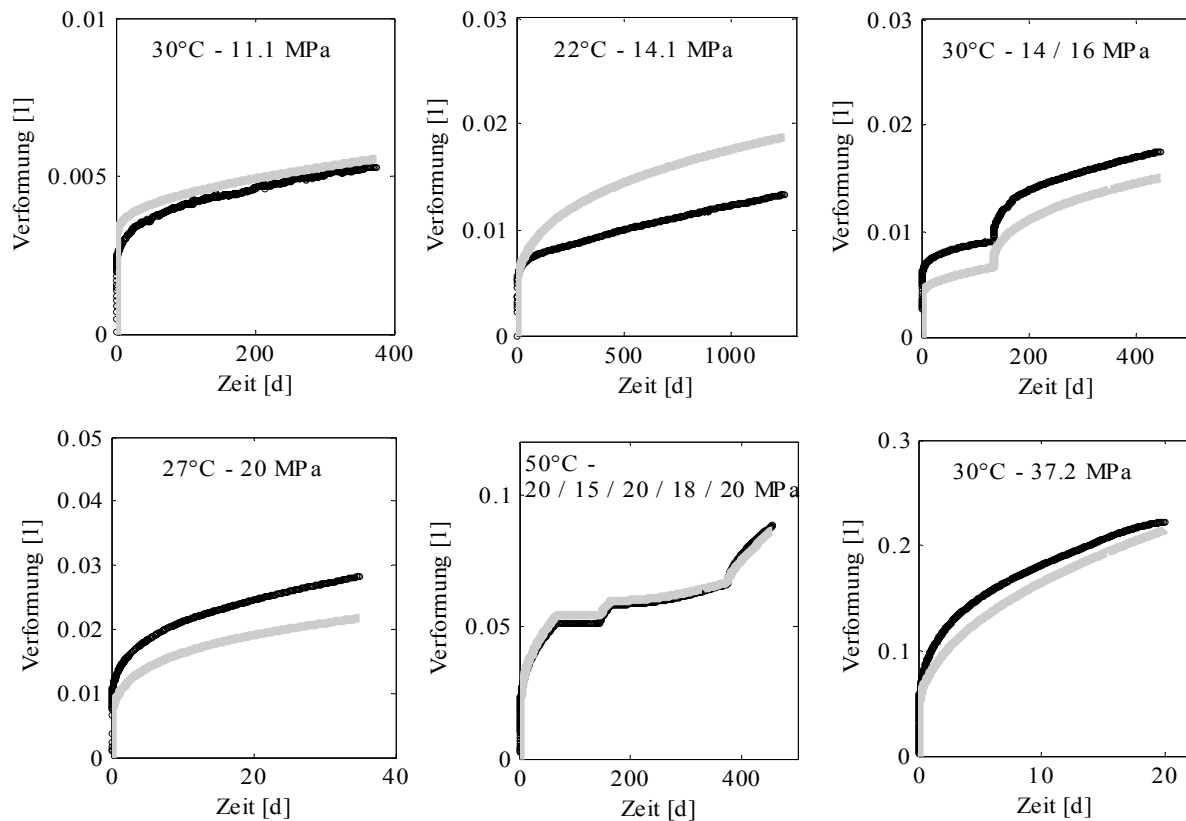


Abb. 1: Ergebnisse der Nachrechnungen (grau) von sechs teilweise mehrstufigen Labor-Kriechversuchen (schwarz) mit dem Referenzsalztyp Asse-Speisesalz, die bei 30 bis 50 °C und Differenzspannungen von 11.1 bis 37.2 MPa durchgeführt worden waren. Die hier als Beispiel gezeigten Ergebnisse wurden von Hampel mit dem Composite-Dilatanz-Modell (CDM) und einheitlichen Kennwerten berechnet, weshalb im Einzelfall geringe Abweichungen zwischen den Modell- und den Messkurven auftreten. Man beachte, dass von dem Stoffgesetz auch die inverse Krümmung der Kriechkurve aufgrund der Erholung nach einer Spannungsreduktion von 20 auf 18 MPa korrekt beschrieben wird (Mitte unten).

in Abb. 1 in der Differenzspannung (11.1 - 37.2 MPa) unterschieden, wurde bei den Festigkeitsversuchen der Manteldruck (0 - 3 MPa) verändert. Als Verformungsphänomen überwiegte in den Kriechversuchen das transiente und stationäre Kriechen, während bei Festigkeitsversuchen nach dem Überschreiten der Dilatanzgrenze stets der Einfluss der Auflockerung, Feuchtigkeit und Schädigung bis zum Bruch und darüber hinaus bis zum Erreichen der Restfestigkeit hinzukommt. Alle diese Vorgänge und Einflüsse mit einem Stoffgesetz und einem einheitlichen Kennwertsatz zutreffend beschreiben zu können, gelingt erst seit wenigen Jahren und demonstriert den hohen Entwicklungsstand heutiger Stoffgesetze der Salzmechanik.

Das Ziel, mit einem Stoffgesetz und einem einheitlichen Kennwertsatz verschiedenartige Laborversuche und Einflüsse zutreffend beschreiben zu können, erklärt auch die Abweichungen einzelner Modell- von den Versuchskurven. Diese sind allerdings nicht als Ergebnis einer misslungenen Anpassung zu bewerten. Auch bei der Wiederholung eines Versuchs wird aufgrund der individuellen Mikrostruktur einer natürlichen Steinsalzprobe im allgemeinen nicht exakt die gleiche Messkurve reproduziert. Die Unterschiede in der Mikrostruktur resultieren dabei aus der geologischen und tektonischen Vorgeschichte des Steinsalzes am Bohrort der Probe. Eine Modellrechnung muss repräsentativ für einen Gesteinsbereich sein. Erst eine systematische Abweichung im Materialverhalten (zum Beispiel zwischen verschiedenen Salztypen) innerhalb einer Lokation macht es notwendig, die Bereiche unterschiedlichen „Homogenbereichen“ zuzuordnen, also unterschiedlichen Bereichen mit in sich ähnlichem Verformungsverhalten, und durch jeweils eigene Kennwertsätze zu beschreiben.

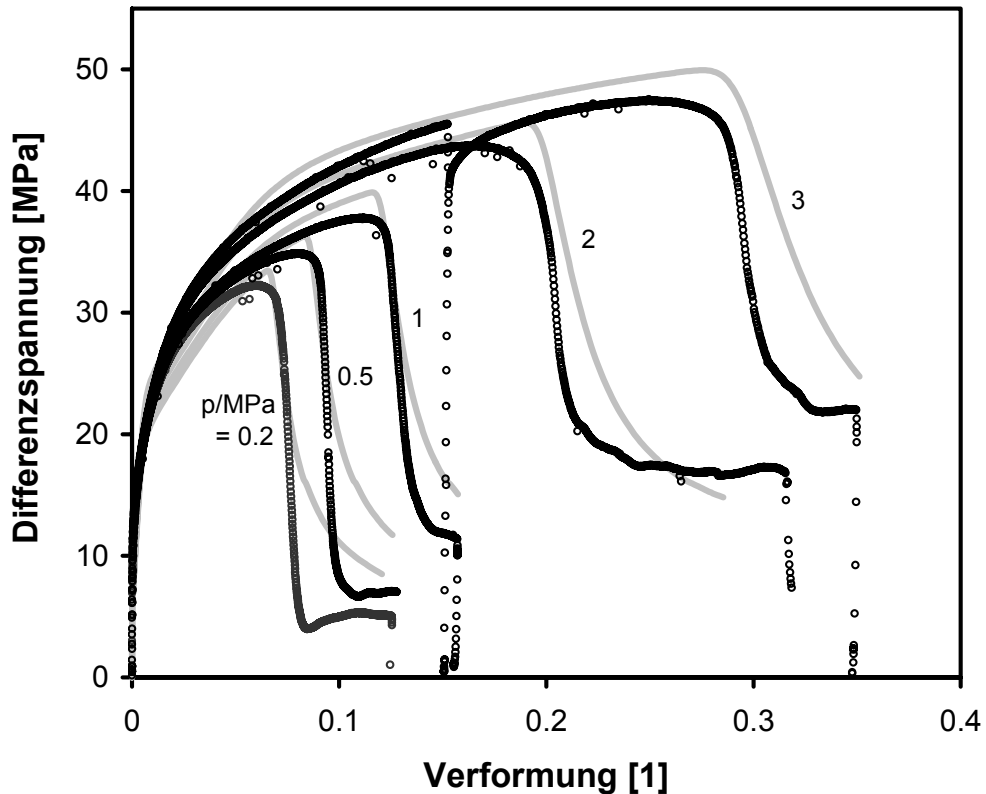


Abb. 2: Ergebnisse der Nachrechnungen (grau) von fünf Labor-Festigkeitsversuchen (schwarz) mit dem Referenzsalztyp Asse-Speisesalz, die bei 30 °C mit einer Verformungsrate von  $1E-5$  1/s und einem Manteldruck  $p = 0.2$  bis 3 MPa durchgeführt worden waren. Die hier als Beispiel gezeigten Ergebnisse wurden von Hampel mit dem Composite-Dilatanz-Modell (CDM) und den gleichen einheitlichen Kennwerten wie diejenigen aus Abb. 1 berechnet.

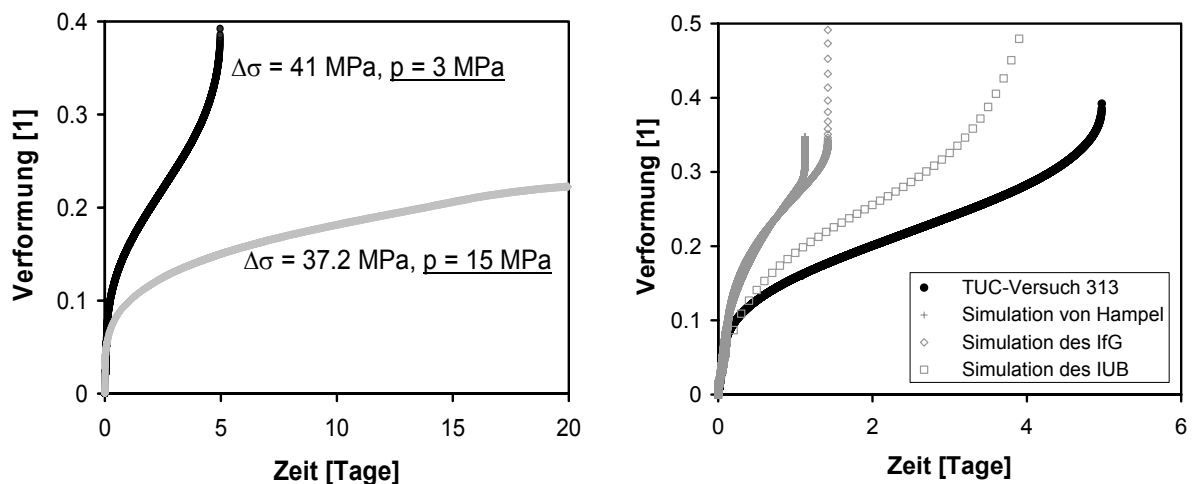


Abb. 3: links: Vergleich zweier gemessener Kriechkurven aus Versuchen mit ähnlicher Differenzspannung  $\Delta\sigma$ , aber sehr unterschiedlichem Manteldruck  $p$ . Bei dem Versuch mit geringem Manteldruck (TUC-313) führte oberhalb der Dilatanzgrenze zunehmende Dilatanz und Schädigung schließlich zum Kriechbruch, welches auch von den Stoffgesetzen beschrieben wird (rechts), wobei die Abweichungen aus unterschiedlich gesetzten Schwerpunkten bei der Bestimmung der jeweils einheitlichen Kennwertsätze für Asse-Speisesalz resultieren. Bei dem anderen Versuch im linken Bild mit  $p = 15$  MPa trat aufgrund seiner Lage unterhalb der Dilatanzgrenze nahezu ausschließlich volumentreues Kriechen auf.

Mit den aus den Nachrechnungen der Kriech- und Festigkeitsversuche bestimmten Kennwerten wurde auch der an der TU Clausthal für dieses Vorhaben durchgeführte Versuch TUC-313 nachgerechnet, siehe Abb. 3. Mit ihm, der aufgrund sehr hoher Differenzspannung (41 MPa) und geringem Manteldruck (3 MPa) im Spannungsraum weit oberhalb der Dilatanzgrenze lag, wurden die verschiedenen Stoffgesetze hinsichtlich der Fähigkeit zur Modellierung der Dilatanz- und Schädigungsentwicklung bis zum Kriechbruch überprüft. Die Kurve des zum Vergleich im linken Bild der Abb. 3 zusätzlich eingetragenen Versuchs mit ähnlich hoher Differenzspannung, aber 15 MPa Manteldruck zeigt, wie die Verformung nur aufgrund des Kriechens verläuft, wenn Dilatanz und Schädigung durch einen hohen Manteldruck unterdrückt werden. Im unteren rechten Bild in Abb. 1 war bereits gezeigt worden, dass auch dieser Versuch mit den gleichen Kennwerten zutreffend beschrieben wird.

Zur Vorbereitung der 2D-Simulationsrechnungen untertägiger Strukturen in Phase 3 wurde die Ausbauchung einer in einem Festigkeitsversuch gestauchten Zylinderprobe modelliert. In Abb. 4 ist links eine typische Probe aus Asse-Speisesalz mit einer Höhe von 25 cm und einem Durchmesser von 10 cm im Ausgangszustand vor dem Versuch gezeigt. In der Simulation wurde nur die rechte Hälfte eines vertikalen Schnittes durch die Probe (gestrichelt umrandet) unter Ausnutzung der Rotationssymmetrie berechnet. In der Bildmitte ist die mit dem CDM berechnete Effektivspannungsverteilung nach einer (wahren) Stauchung der Probe um 13.1 % gezeigt. Die Spannung ist im Zentrum der Probe höher, während sie bei den Stirnflächen sowie nahe der ausgebauchten Seitenfläche niedriger ist. Der Versuch war bei dieser Verformung kurz vor dem zu erwartenden Bruch beendet worden, um die Probenform nach Versuchsende vermessen zu können. Das Resultat zeigt das rechte Diagramm als Verhältnis des in verschiedenen Probenhöhen gemessenen Durchmessers zum Endflächendurchmesser (schwarz). Grau ist das Ergebnis der CDM-Simulation von Hampel eingetragen, wobei bei der Rechnung zur Vereinfachung angenommen wurde, dass die Probe an den nicht explizit

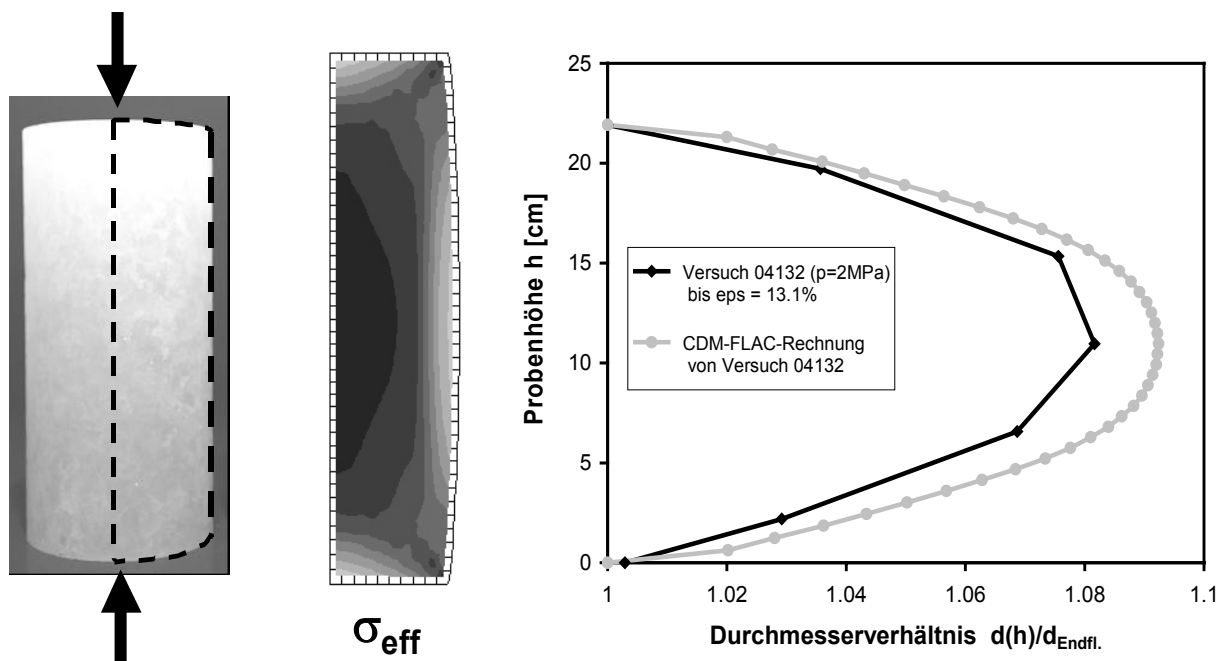


Abb. 4: In einer 2D-Simulation wurde die Ausbauchung einer in einem Festigkeitsversuch gestauchten Zylinderprobe aus Asse-Speisesalz (links: Ausgangszustand) berechnet. Das mittlere Bild zeigt die Effektivspannungsverteilung in dem rotationssymmetrisch berechneten 2D-Modell eines Schnittes durch die rechte Probenhälfte (links gestrichelt umrandet). Das mit dem CDM und den einheitlichen Kennwerten für Speisesalz von Hampel berechnete Verhältnis des Probendurchmessers in verschiedenen Höhen kurz vor dem Bruch (nach 13.1 % Verformung) zum Durchmesser an den Stirnflächen stimmt gut mit den Messdaten überein.

mit modellierten Druckstempeln haftete (kein Rutschen auf den Stahlstempeln). Die Übereinstimmung ist sehr gut, wenn man bedenkt, dass wiederum mit den einheitlichen Kennwerten für Asse-Speisesalz und nicht mit einer individuellen Anpassung des Stoffgesetzes an diesen Versuch gerechnet wurde.

Dass die Verwendung unterschiedlicher Stoffgesetze nicht immer zu den gleichen Ergebnissen führt, demonstriert Abb. 5. Hier ist das Resultat der gleichen Simulation wie in Abb. 4 dargestellt, die mit dem IUB-MDCF von der Uni Hannover durchgeführt worden war. Die Ursache dafür, dass mit dem CDM eine Spannungskonzentration, mit dem IUB-MDCF hingegen zwei Spannungsmaxima ober- und unterhalb der Probenmitte errechnet werden, die entsprechend zwei Maxima in der Probenausbauchung hervorrufen, muss noch analysiert werden. Der Betrag der größten Ausbauchung stimmt aber auch hier sehr gut mit dem in Probenmitte gemessenen Maximalwert überein.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass mit den Modellrechnungen in Phase 2 die Modellierung unterschiedlicher Belastungsarten, Verformungsphänomene und Einflüsse mit den verschiedenen Stoffgesetzen gezielt untersucht wurde. Dazu ist das Nachrechnen speziell durchgeführter Laborversuche besser geeignet als die Simulation untertägiger Strukturen im Steinsalz, weil sich bei letzteren die verschiedenen Phänomene und Einflüsse komplex überlagern. Es hat sich gezeigt, dass mit den aktuellen Stoffgesetzen sowohl das transiente Verhalten bei sich permanent ändernder Differenzspannung (im Festigkeitsversuch) oder nach Spannungsreduktionen mit den gleichen Kennwerten beschrieben werden kann wie die Langzeitverformung bis in den Bereich des stationären Kriechens im Kriechversuch. Dies gilt für einen großen Bereich der Differenzspannungen ebenso wie für den Einfluss verschiedener Manteldrücke. Neben dem Kriechen wird die Dilatanz- und Schädigungsentwicklung sowie der Bruch bzw. Kriechbruch und das Nachbruchverhalten bis zum Erreichen der Restfestigkeit korrekt beschrieben. Nach dieser gesonderten Überprüfung diverser Stoffgesetzfähigkeiten wurden in der nächsten Phase einfache Untertagestrukturen im Steinsalz berechnet.

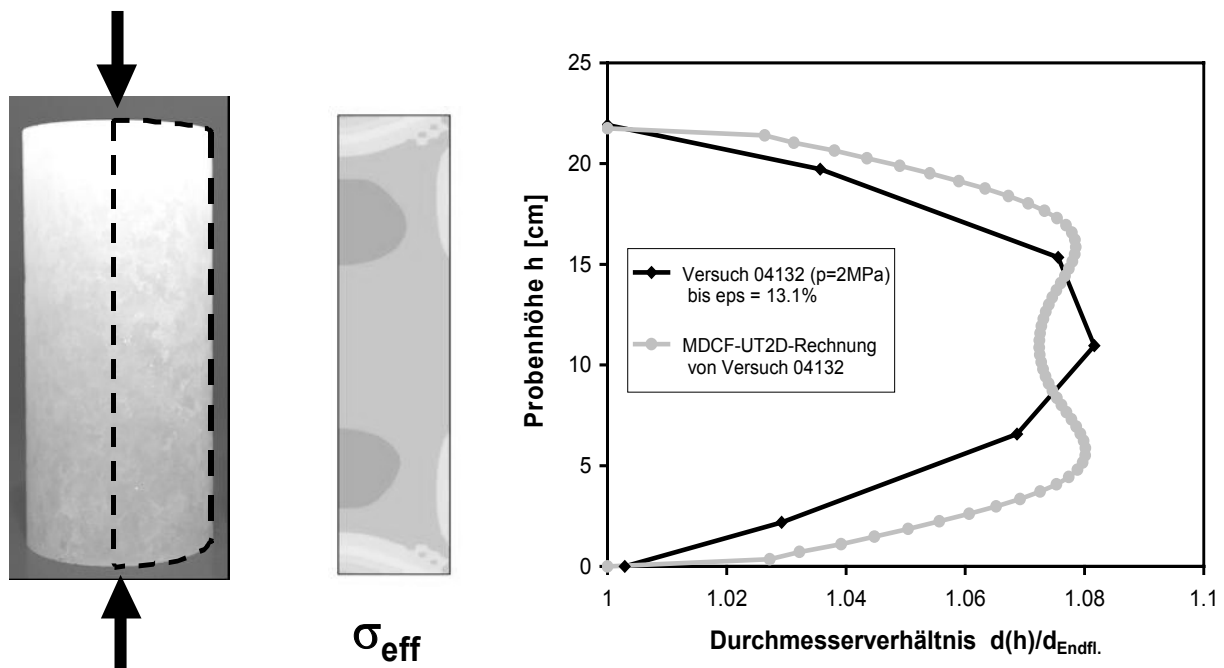


Abb. 5: Ergebnis der analogen Simulation wie in Abb. 4, hier allerdings von dem IUB der Uni Hannover mit dem IUB-MDCF durchgeführt. Die zwei oberhalb und unterhalb des Probenzentrums errechneten Maxima der Effektivspannung führen zu einer zweifachen Ausbauchung der Probe, wobei der Betrag der Ausbauchung sehr gut mit den Messwerten übereinstimmt. Die Ursache der mit dem CDM (Abb. 4) und dem IUB-MDCF (Abb. 5) erhaltenen Unterschiede der Ergebnisse muss noch analysiert werden.



### **Ausgewählte Ergebnisse der Benchmark-Rechnungen in Projektphase 3**

In diesem zweiten Teil der Benchmark-Modellrechnungen wurden zwei einfache Untertagestrukturen im Staßfurt-Steinsalz (z2) der Grube Sondershausen als typische Beispielanwendungen berechnet. Es wurden einfache Strukturen ausgewählt, um eine möglichst einfache Erstellung der geometrischen Modelle und gut bekannte Randbedingungen zu erreichen. Damit sollten sich mögliche Unterschiede in den Berechnungsergebnissen der Projektpartner besser auf die Stoffgesetze zurückführen lassen und nicht durch unterschiedliche geometrischen Modelle oder Randbedingungen hervorgerufen werden.

Diese Phase 3 bestand selbst aus drei Teilen: Zunächst mussten anhand von Laborkriech- und -festigkeitsversuchen wiederum einheitliche Kennwerte der Stoffgesetzparameter für diesen Salztyp bestimmt werden. Die Festigkeitsversuche umfassten hier sogar einen Manteldruckbereich von 0 bis 20 MPa. Abb. 6 zeigt als Beispiel Ergebnisse der Anpassungen des Partners IfG, die er mit dem Günther-Salzer-Modell berechnet hat. Wiederum wird die Spannungsentwicklung bis in den Nachbruchbereich hinein sehr gut wiedergegeben. Bei diesen Versuchen war die Entwicklung der volumetrischen Verformung (Dilatanz) gemessen worden (Abb. 7). Auch sie wird von dem Günther-Salzer-Stoffgesetz mit den gleichen einheitlichen Kennwerten in guter Übereinstimmung beschrieben. Die korrekte Modellierung der Dilatanzentwicklung ist wichtig für die Beschreibung der Auflockerungszone (ALZ) in der Umgebung untertägiger Hohlräume im Steinsalz. Sie bildet auch eine Grundlage für die Modellierung der Permeabilitätsentwicklung in der ALZ und wird zum Beispiel bei der Berechnung von Schacht- und Streckenverschlüssen angewendet. Dieser Aspekt, das heißt der Zusammenhang zwischen der Dilatanz und Schädigung mit der Porosität und Permeabilität in der ALZ, wurde bei dem Stoffgesetzvergleich in diesem Vorhaben allerdings aus Zeitgründen noch nicht einbezogen.

Nach der Bestimmung der Kennwerte wurde im zweiten Teil der Phase 3 die Spannungs- und Verformungsentwicklung in der Umgebung einer durch In-situ-Messungen gut dokumentierten Einzelstrecke im Staßfurt-Steinsalz (z2) der Grube Sondershausen berechnet, siehe Abb. 8. Aus den oben genannten Gründen wurde die im Jahre 1963 aufgefahren, relativ isoliert liegende Blindstrecke zum Versuchsverschlussbauwerk im Bereich der Maschinenstrecke EU1 ausgewählt, an der 1998/99 für ca. 150 Tage Extensiometermessungen im Stoß und in der Firste sowie durch das IfG Frac-Spannungsmessungen im Stoß vorgenommen worden waren. Als Simulationszeitraum wurden daher die 35 Jahre ab der Auffahrung gewählt und am Ende das Berechnungsergebnis mit den In-situ-Messdaten verglichen.

Die Strecke liegt in 715 m Teufe und hat einen kreisrunden Querschnitt mit einem Durchmesser von 3 m. Aus Symmetriegründen wurde von allen Partnern wiederum nur die rechte Hälfte eines vertikalen Schnittes durch die Umgebung der Strecke modelliert, als Beispiel zeigt Abb. 9 das FLAC-Modell von Hampel.

Der Streckenteufe entsprechend wurde am oberen Modellrand eine Auflast von 15.7 MPa aufgeprägt, die Vertikalspannung betrug am unteren Modellrand aufgrund des durch das Eigengewicht des Salzes hervorgerufenen Gradienten 20.1 MPa. Die Berechnung erfolgte bei den meisten Partnern unter der Annahme großer Verzerrungen.

Abb. 10 zeigt die mit dem CDM von Hampel berechnete Verteilung der Effektivspannung 35 Jahre nach der Auffahrung der Strecke. In der Gesamtansicht des FLAC-Modells wird sichtbar, dass der Modellrand weit genug von dem durch die Strecke modifizierten Bereich der Verteilung entfernt ist und diese daher nicht beeinflusst. Am Streckenrand steigt die die Verformung hervorrufende Effektivspannung auf 13.8 MPa an, während sie in den von der Strecke entfernten Modellbereichen nahezu Null (unter 0.1 MPa) beträgt.

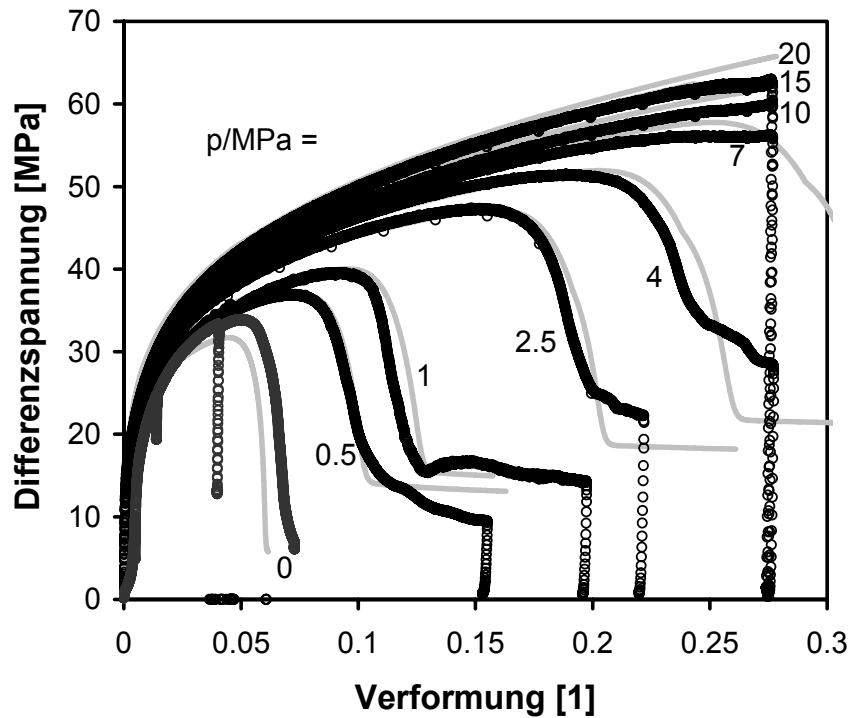


Abb. 6: Ergebnisse der Nachrechnungen (grau) von neun Labor-Festigkeitsversuchen (schwarz) mit Staßfurt-Steinsalz aus der Grube Sondershausen, die bei 30 °C mit einer Verformungsrate von  $1E-5$  1/s und einem Manteldruck  $p = 0$  bis 20 MPa durchgeführt worden waren. Die hier als Beispiel gezeigten Ergebnisse wurden vom IfG mit dem Günther-Salzer-Modell und einheitlichen Kennwerten berechnet.

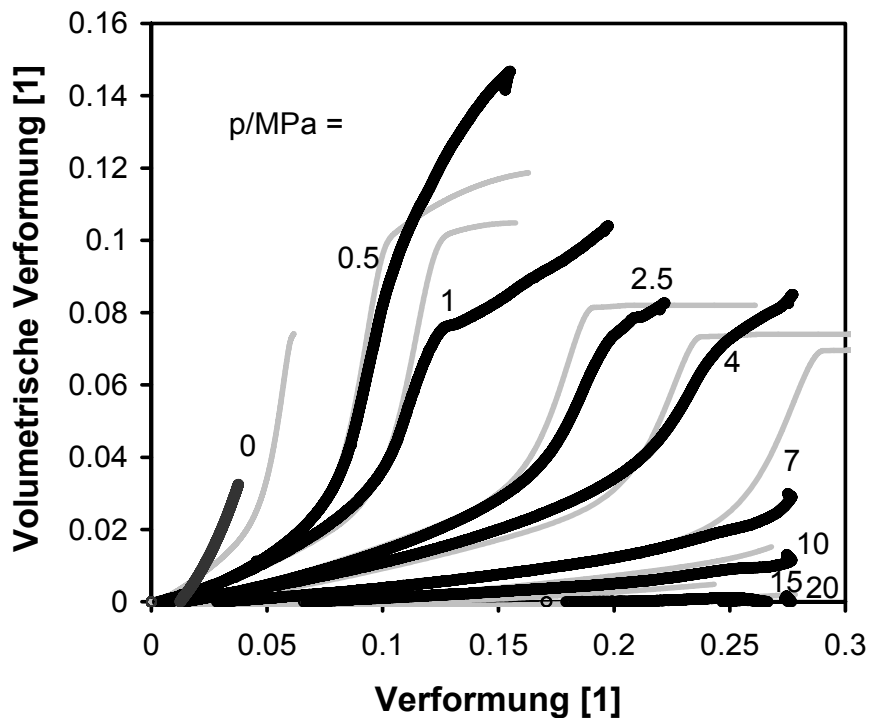


Abb. 7: Mit dem Günther-Salzer-Modell und den einheitlichen Kennwerten vom IfG berechnete Dilatanzentwicklung (grau) im Vergleich mit den Messdaten (schwarz) aus den Versuchen aus Abb. 6.

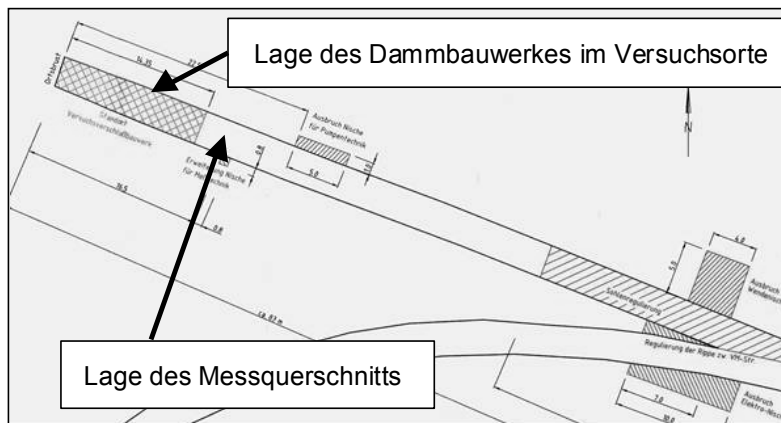
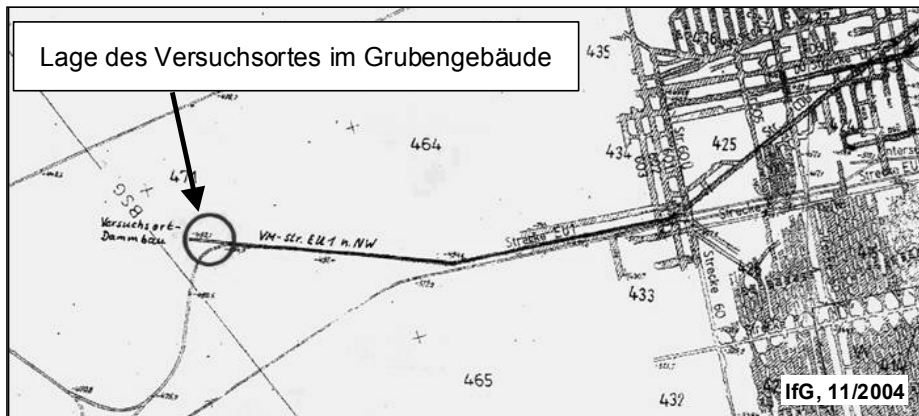


Abb. 8: oben: Lage der in Phase 3 modellierten Untertagestrecke im Bereich der Maschinenstrecke EU1 der Grube Sondershausen. Unten: Ausschnittsvergrößerung der modellierten Blindstrecke vor dem Versuchsverschlussbauwerk.

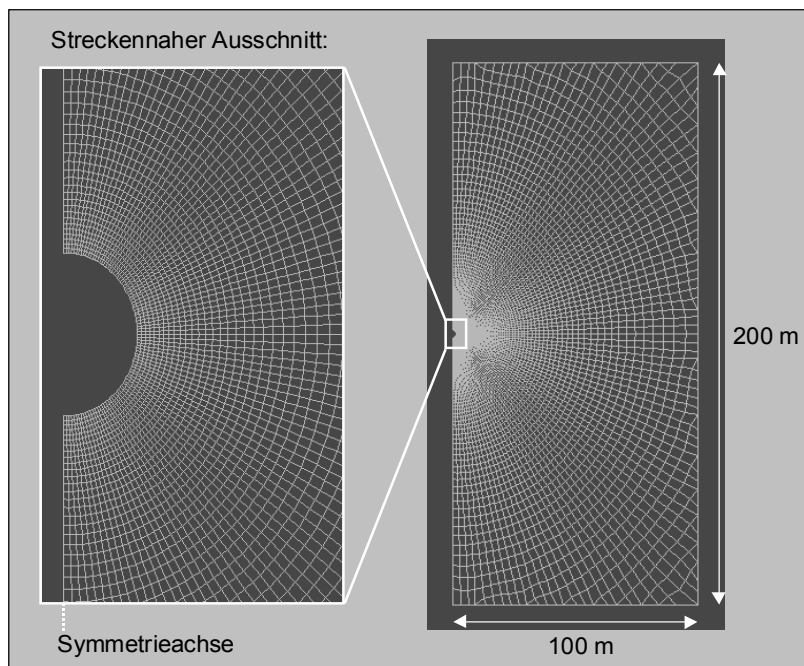


Abb. 9: FLAC-Modell der rechten Hälfte eines senkrechten Schnittes durch die Umgebung der Blindstrecke aus Abb. 8 von Hampel. Die Strecke hat einen Durchmesser von 3 m. Die Dimensionen des Modells wurden so groß gewählt, damit die Spannungs- und Verformungsverteilung nach der Auffahrung der Strecke unbeeinflusst von den Randbedingungen bleibt.

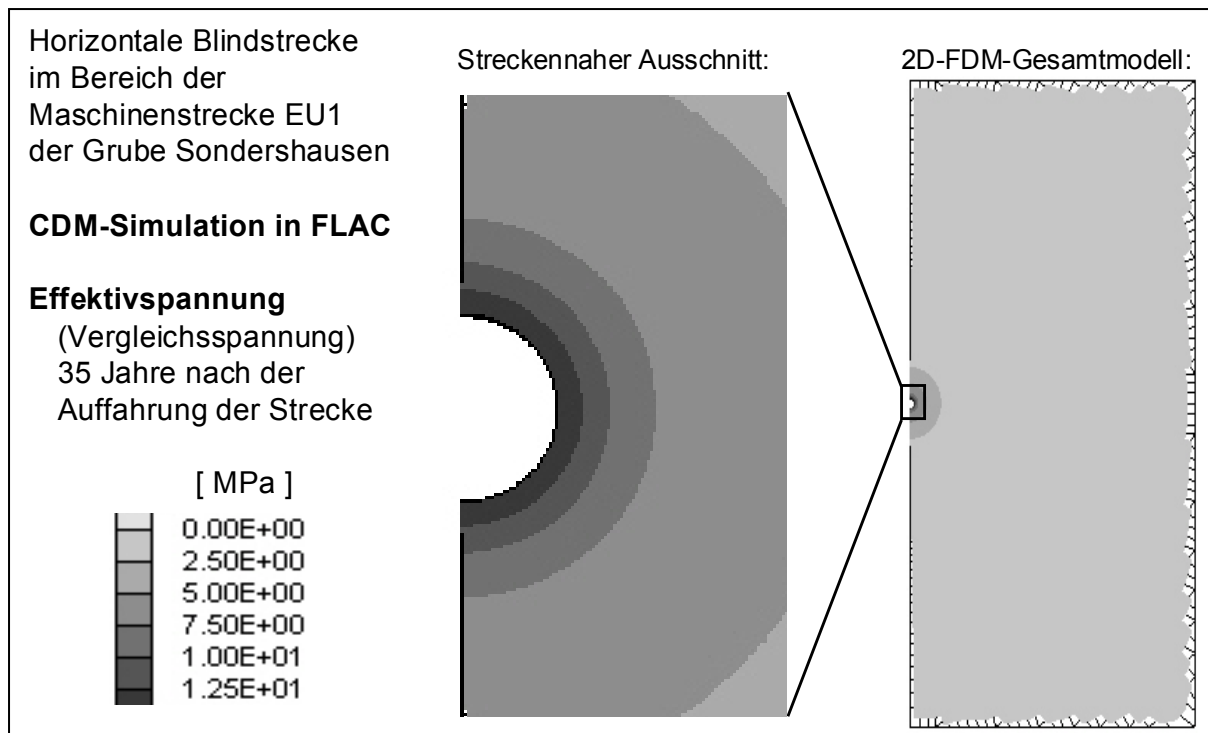


Abb. 10: Mit dem CDM von Hampel berechnete Effektivspannung 35 Jahre nach der Auffahrung der horizontalen Blindstrecke im Bereich der Maschinenstrecke EU1 der Grube Sondershausen, siehe Abb. 8 und 9.

Die Verteilung der minimalen Hauptspannung zeigt Abb. 11. Aufgrund der freien Oberfläche ist diese Spannung am Streckenrand Null und nimmt mit zunehmendem Abstand zu ihm betragsmäßig zu (das negative Vorzeichen bedeutet Druckspannungen). Die von drei Projektpartnern berechneten Verläufe der minimalen Hauptspannung vom Stoß horizontal in das Steinsalz hinein (Pfeil in Abb. 11) werden in Abb. 12 miteinander und mit dem Ergebnis der Frac-Messungen verglichen. Die für den Zeitpunkt 35 Jahre nach der Auffahrung berechnete Minimalspannung gibt den gemessenen Verlauf gut wieder. Dies ist nicht selbstverständlich, wenn man bedenkt, dass die verwendeten Kennwerte für diesen Salztyp aus Laborversuchen bestimmt wurden, die nur 200 Tage (Kriechversuche) bzw. maximal 0.28 Tage (Festigkeitsversuche) gedauert hatten.

Eine zum Beispiel für die Berechnung und Konstruktion von Dammbauwerken wichtige Frage ist die Ausdehnung der Auflockerungszone um eine Strecke herum in das Steinsalz hinein. Für das vorliegende Beispiel zeigt Abb. 13 die Berechnungsergebnisse der TU Clausthal und des IfG Leipzig 1 Jahr und 35 Jahre nach der Auffahrung. Die von beiden Partnern für den Zeitpunkt 35 Jahre nach der Auffahrung berechneten Ergebnisse in Abb. 13 stimmen hinsichtlich der volumetrische Verformung am Stoß (ca. 0.28 %) sowie in der Reichweite der Auflockerungszone (ALZ) in das Gebirge hinein (ca. 20 cm) überein. Unterschiede zeigen sich dagegen in den Verläufen innerhalb der ALZ, die allerdings innerhalb der gleichen Größenordnung bleiben.

Schließlich ist in Abb. 14 das IfG-Ergebnis zur Extensiomterverformung über der Firste  $E_F$  sowie im Stoß  $E_S$  der Strecke aufgetragen. Leider begann die In-situ-Messung erst 35 Jahre nach der Auffahrung und dauerte nur 150 Tage. Die berechnete Verformungsrate stimmt im Messzeitraum sehr gut mit dem Ergebnis der In-situ-Messung überein. Der kleine Unterschied zwischen den Messergebnissen für  $E_F$  und  $E_S$  zeigt sich in der Rechnung aufgrund der einfachen Annahmen (homogenes Steinsalz, Vernachlässigung einer kleinen Anhydritschicht unterhalb der Strecke) nicht.

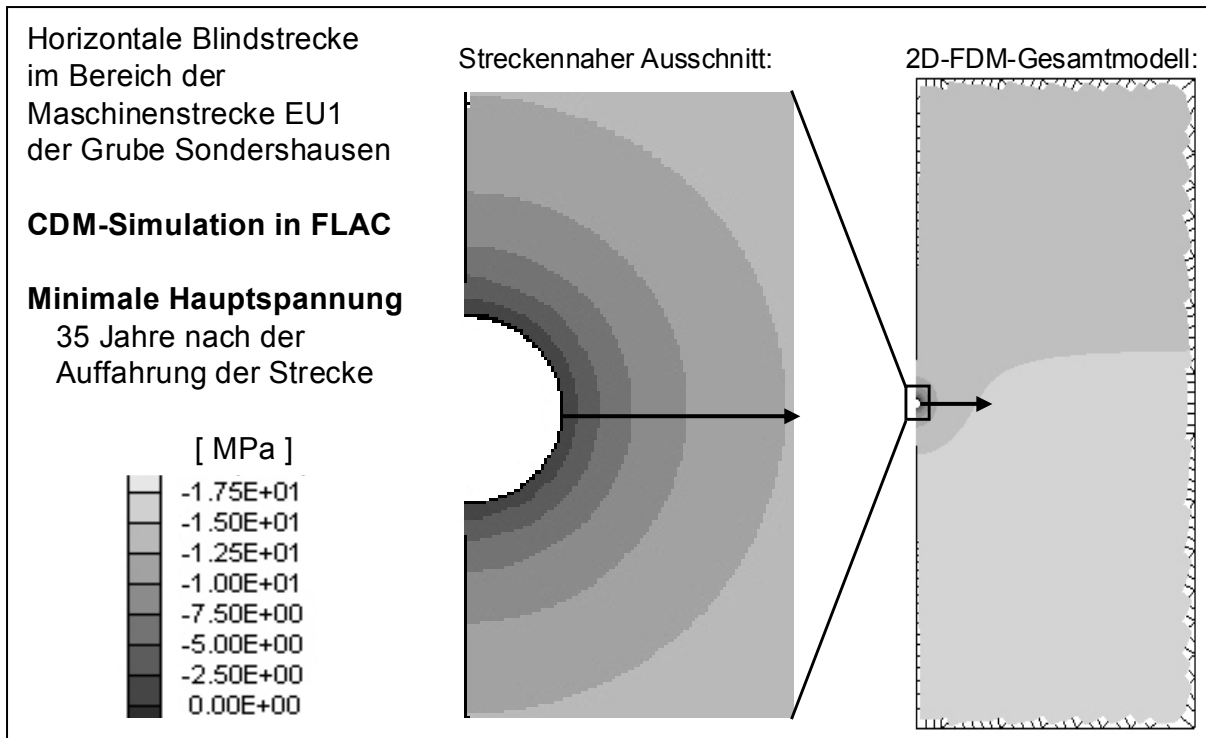


Abb. 11: Mit dem CDM von Hampel berechnete minimale Hauptspannung 35 Jahre nach der Auffahrung der horizontalen Strecke im Bereich der Maschinenstrecke EU1 der Grube Sondershausen, siehe Abb. 8 bis 10. Der Pfeil kennzeichnet den Pfad der in Abb. 12 gezeigten Verläufe der minimalen Hauptspannung.

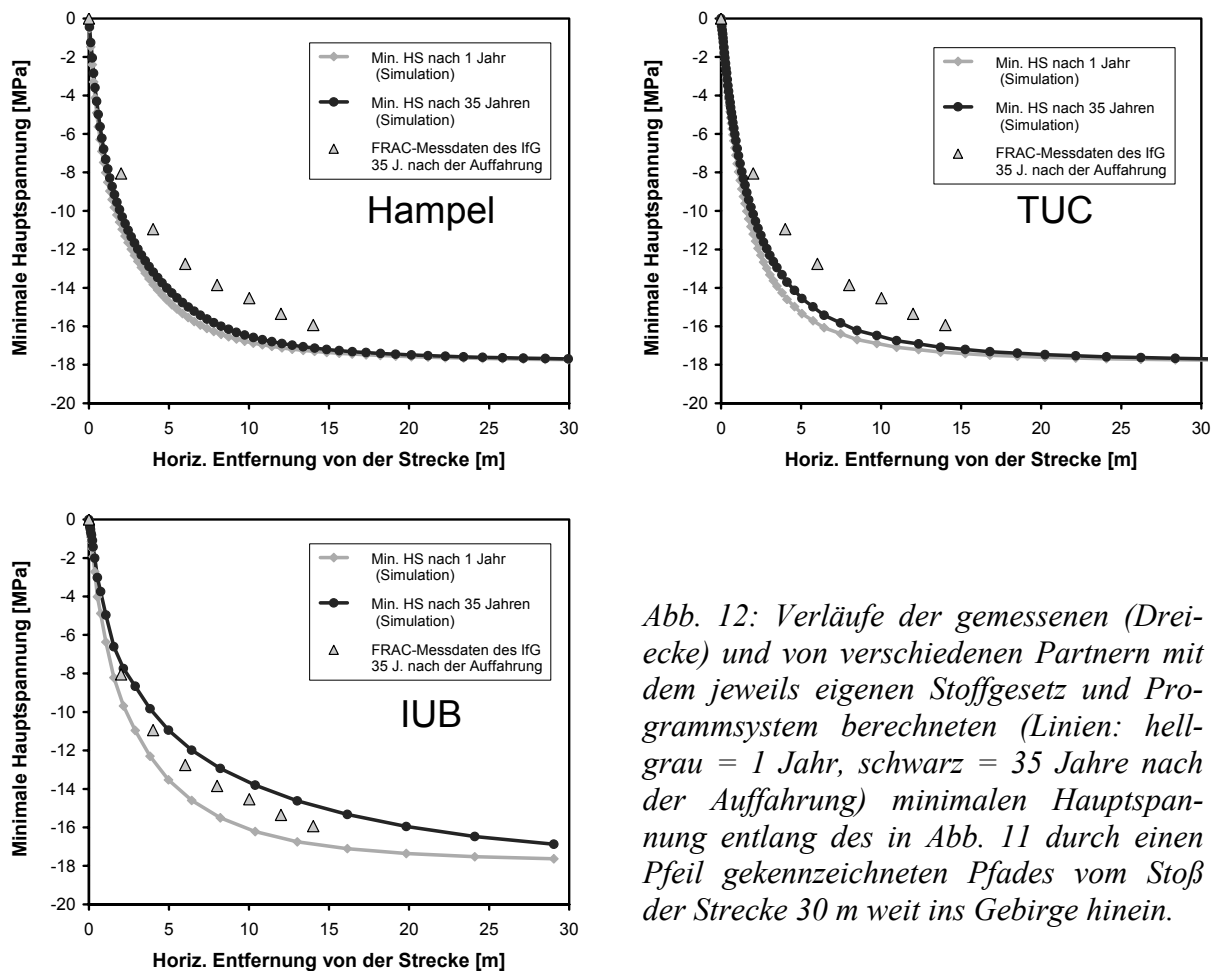


Abb. 12: Verläufe der gemessenen (Dreiecke) und von verschiedenen Partnern mit dem jeweils eigenen Stoffgesetz und Programmsystem berechneten (Linien: hellgrau = 1 Jahr, schwarz = 35 Jahre nach der Auffahrung) minimalen Hauptspannung entlang des in Abb. 11 durch einen Pfeil gekennzeichneten Pfades vom Stoß der Strecke 30 m weit ins Gebirge hinein.

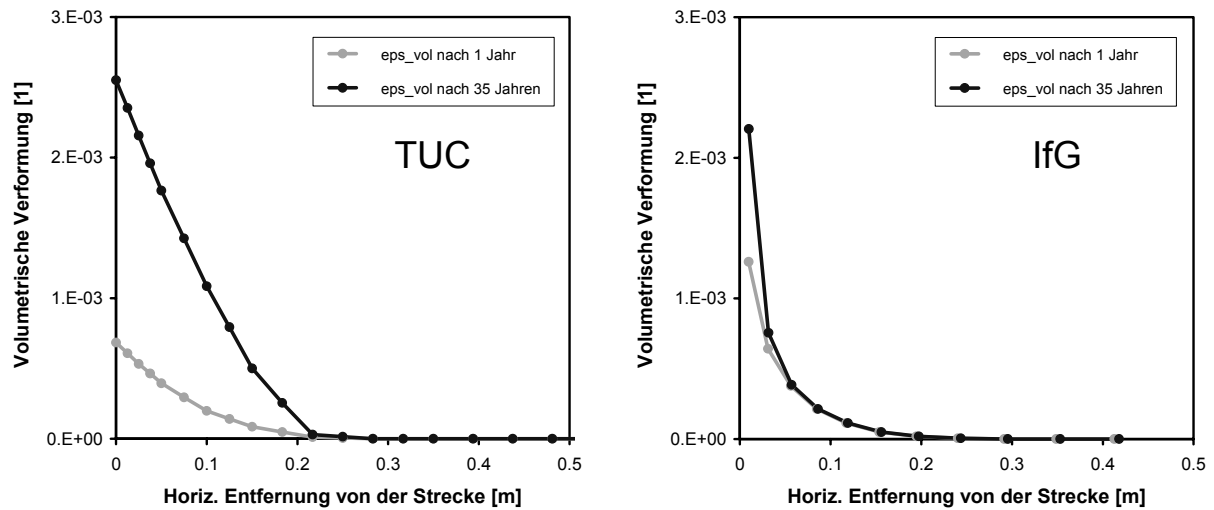


Abb. 13: Von der TU Clausthal mit dem Modell How/Lux und von dem IfG Leipzig mit dem Modell Günther/Salzer berechnete Verläufe der volumetrischen Verformung (Dilatanz) für den Zeitpunkt 1 (hellgrau) und 35 Jahre (schwarz) nach der Auffahrung der Blindstrecke im Bereich der Maschinenstrecke EU1 der Grube Sondershausen. Beide Rechnungen ergaben, dass die volumetrische Verformung am Stoß nach 35 Jahren etwa 0.28 % beträgt und dass die Auflockerungszone nur etwa 20 cm ins Gebirge hinein reicht.

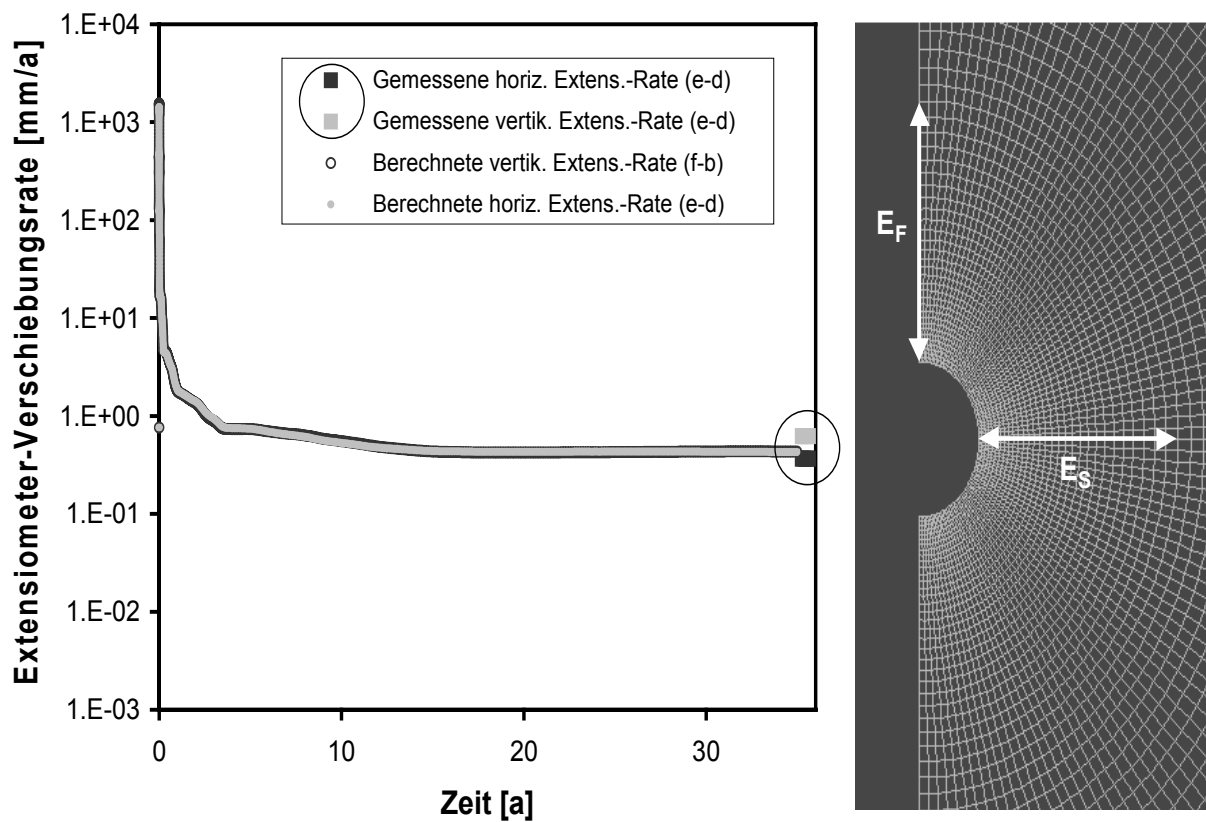


Abb. 14: Mit dem Günther-Salzer-Stoffgesetz des IfG ab dem Zeitpunkt der Auffahrung der modellierten Blindstrecke berechnete Extensiomterverformungsrate in der Firste  $E_F$  und im Stoß  $E_S$ . Die Messung erfolgte 35 Jahre nach der Auffahrung für 150 Tage, die Extensiomterlänge betrug jeweils 5 m.

Als zweites Anwendungsbeispiel wurde im dritten Teil der Projektphase 3 mit den gleichen Kennwerten, das heißt im gleichen Staßfurt-Steinsalz der Grube Sondershausen, ein fiktiver schlanker Pfeiler (Höhe/Breite = 20 m/20 m = 1) mit drei verschiedenen Auflasten, die drei unterschiedliche Teufen von etwa 320, 550 und 770 m nachbilden sollten, für einen Simulationszeitraum von 100 Jahren von allen Partnern berechnet. Das Ziel dieser Simulationen war die Modellierung starker Dilatanz und Schädigung bis hin zum (Kontur-)Bruch eines schlanken Pfeilers und, sofern mit dem Stoffgesetz möglich, darüber hinaus.

Abb. 15 zeigt, dass aufgrund der Symmetrie wiederum nur die rechte Hälfte eines senkrechten Schnitts durch den Pfeiler, die benachbarte Kammer und die darunter und darüber liegenden Salzsichten modelliert wurde. Auch diese Berechnungen erfolgten bei den meisten Partnern unter der Annahme großer Verzerrungen.

Aus der Vielzahl der Berechnungsergebnisse zu verschiedenen Schnitten durch das Modell und zu verschiedenen Zeitpunkten können hier wiederum nur einige wenige Beispiele gezeigt werden. In Abb. 16 ist die Effektivspannung am Ende der Berechnung, das heißt 100 Jahre nach der fiktiven Auffahrung der dem Pfeiler benachbarten Kammern, dargestellt, die mit dem CDM von Hampel in der Simulation mit der geringsten Auflast von 7 MPa auf die Modelloberkante berechnet wurde (die Teufe entspricht einer „flachen Lagerung“). Man erkennt, dass sich die Spannung auf einen x-förmigen Bereich im Pfeiler konzentriert, in dem Abb. 17 zufolge auch die Effektivverformung am größten ist. Dieses ist demnach der für die Tragfähigkeit des Pfeilers entscheidende Teil der Struktur. In der (hier nur leicht) ausbauchenden Pfeilerflanke ist die Effektivspannung dagegen erheblich geringer. Qualitativ entspricht dieses Bild für die Effektivspannung demjenigen für die in der Querdehnung behinderte Zylinderprobe in Abb. 4.

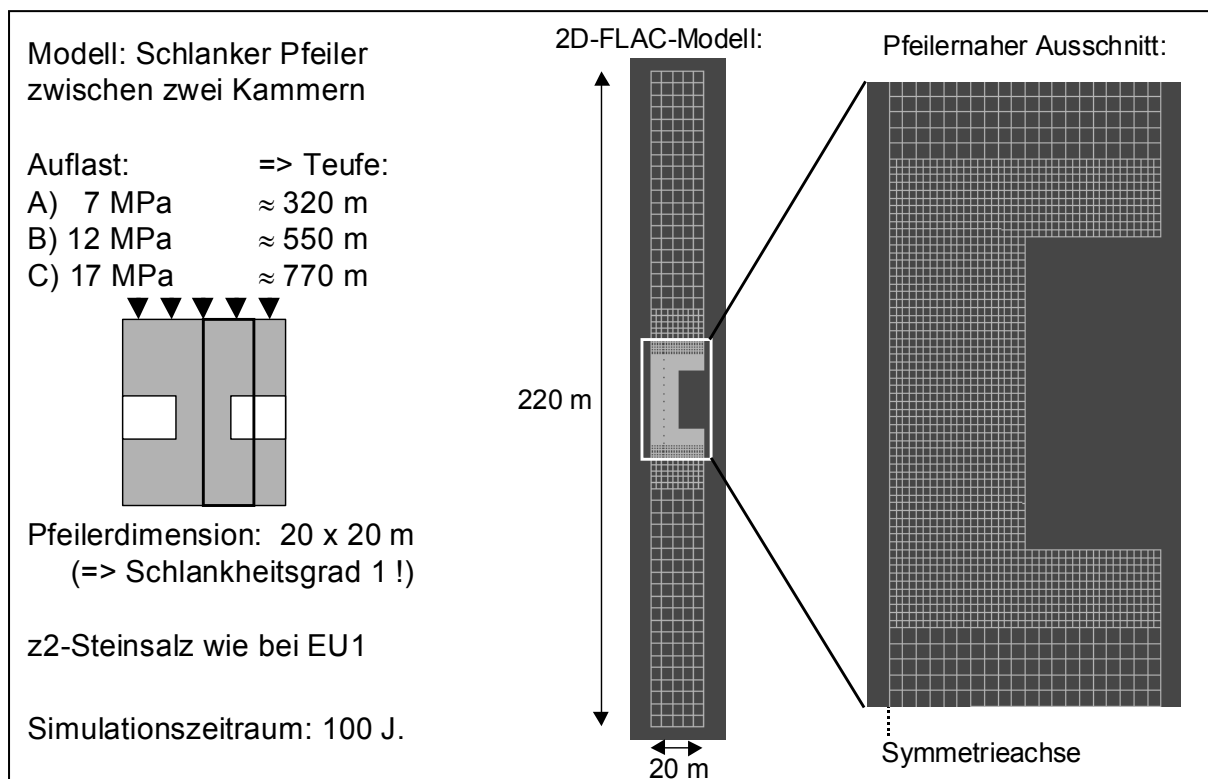


Abb. 15: Modell des fiktiven schlanken Pfeilers im z2-Steinsalz der Grube Sondershausen, der in drei unterschiedlichen angenommenen Teufen für einen Simulationszeitraum von 100 Jahren von den Projektpartnern mit dem jeweils eigenen Stoffgesetz und Programmsystem berechnet wurde. Das geometrische Modell (im Bild: FLAC-Modell von Hampel) bildet den in der linken Skizze schwarz umrandeten Bereich ab.

Für die Pfeilerstabilität ist es daher nicht unmittelbar entscheidend, wie groß die Auflockerung (Dilatanz) an der Pfeilerflanke wird. Dieses bestätigt sich besonders eindrucksvoll an dem IfG-Ergebnis aus der Simulation mit der höchsten Auflast in Abb. 18. Der Pfeiler mit dem Schlankheitsgrad  $h/b = 1$  zeigt nach 77,5 Tagen einen Konturbruch, nachdem in einem ringförmigen Bereich um den Stoß herum die Dilatanz und Schädigung immer weiter zugenommen hatte. Dieser Konturbruch führt auch zu einem nahezu schlagartigen Versatz der Stoßmitte in die Kammer hinein. Anschließend ist der von dem Bogen umschlossene Bereich insgesamt stark aufgelockert und ohne nennenswerte Tragfähigkeit. Dennoch versagt der Pfeiler nicht, weil der x-förmige Bereich mit der höchsten Effektivspannung nach wie vor kaum volumetrische Verformung (und damit kaum Schädigung) aufweist. Während in der FLAC-Rechnung die stark dilatante Konturzone im Modell belassen wurde, würde dieser Bereich in der Realität herausbrechen.

Die Berechnung derartiger Vorgänge stellt nicht nur erhebliche Anforderungen an das Stoffgesetz, sondern auch an die numerische Behandlung der Simulation und eine sorgsame Prüfung auf Plausibilität der Ergebnisse.

Die gezeigten Beispiele demonstrieren die Leistungsfähigkeit moderner Stoffgesetze der Salzmechanik.

### **Weitere Arbeiten im Projekt**

In dem sich an das 7. Projektstatusgespräch anschließenden Zeitraum werden die hier exemplarisch vorgestellten sowie zahlreiche weitere Ergebnisse der Benchmark-Rechnungen der sechs Projektpartner in jeweiligen Einzelberichten dargestellt und miteinander verglichen. Ebenso werden die verwendeten Stoffgesetze und die Methoden, die bei der Bestimmung der salzspezifischen Kennwerte der Stoffgesetzparameter angewendet wurden, in den Vergleich einbezogen. Auf der Basis dieses Materials werden Empfehlungen zur Nutzung der Vorhabensergebnisse und zur Anwendung der Stoffgesetze bei verschiedenen Berechnungsaufgaben zum Wirtsgestein Steinsalz in der Umgebung untertägiger Grubengebäude ausgearbeitet.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus diesem Projekt werden in Phase 6 in einem Abschlussbericht zusammengefasst und in einer Veröffentlichung publiziert sowie auf einem für den 08. November 2006 geplanten öffentlichen Abschluss-Workshop in der BGR Hannover einem interessierten Fachpublikum vorgestellt.



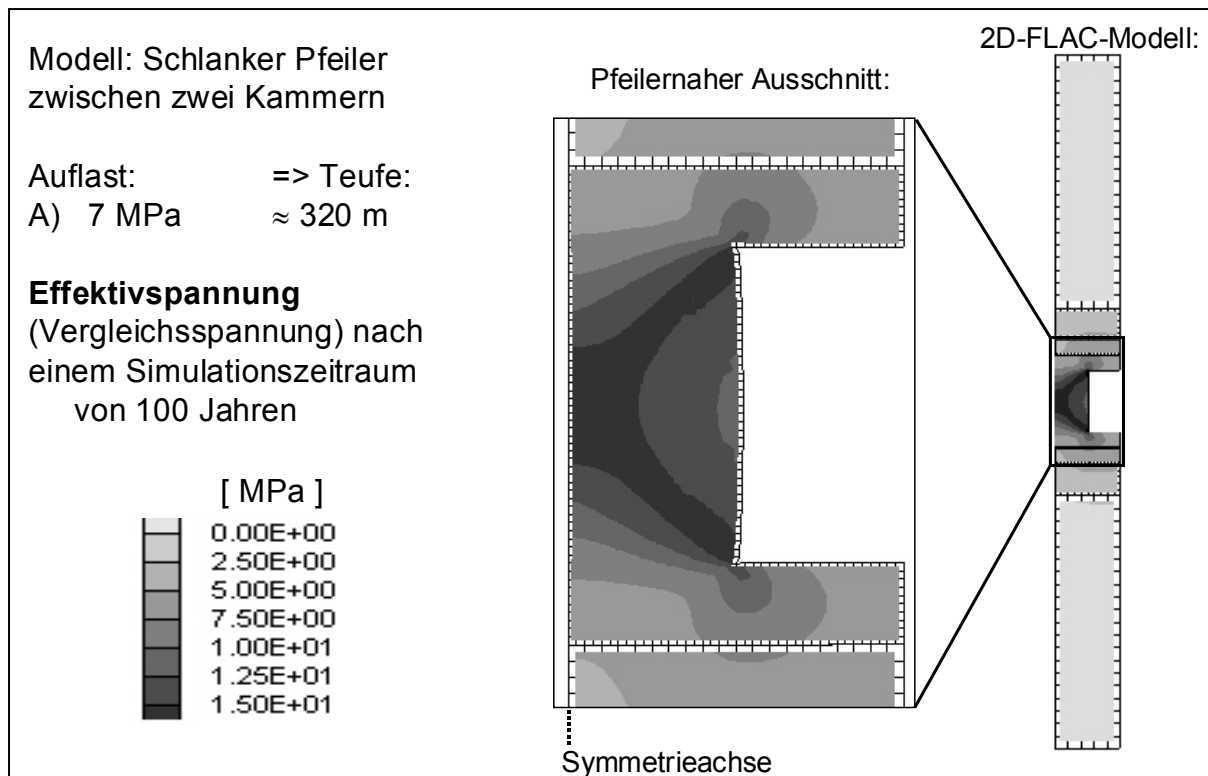


Abb. 16: Mit dem CDM von Hampel in der Simulation des fiktiven schlanken Pfeilers mit der geringsten Auflast berechnete Effektivspannung 100 Jahre nach der Auffahrung der Kammern in der Grube Sondershausen, siehe Abb. 14.

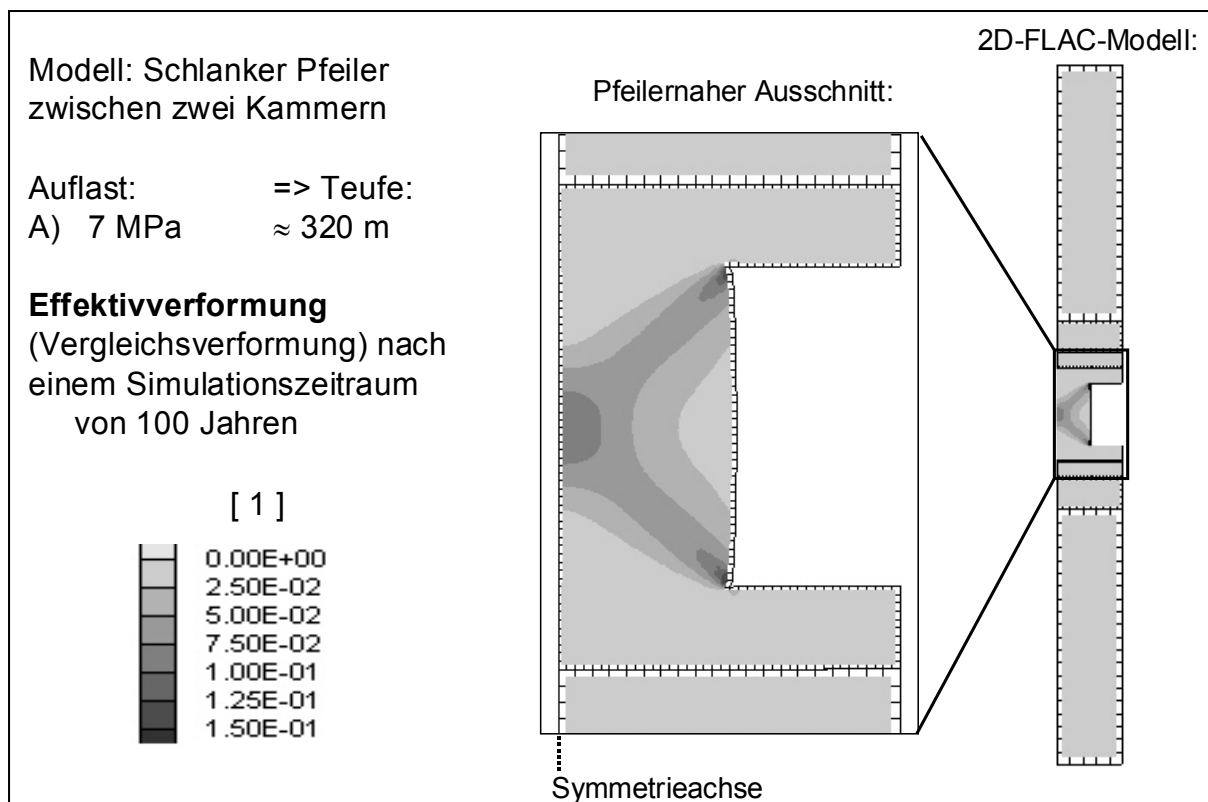


Abb. 17: Mit dem CDM von Hampel in der Simulation mit der geringsten Auflast berechnete Effektivverformung 100 Jahre nach der fiktiven Auffahrung der Kammern in der Grube Sondershausen, siehe Abb. 14 und 15.

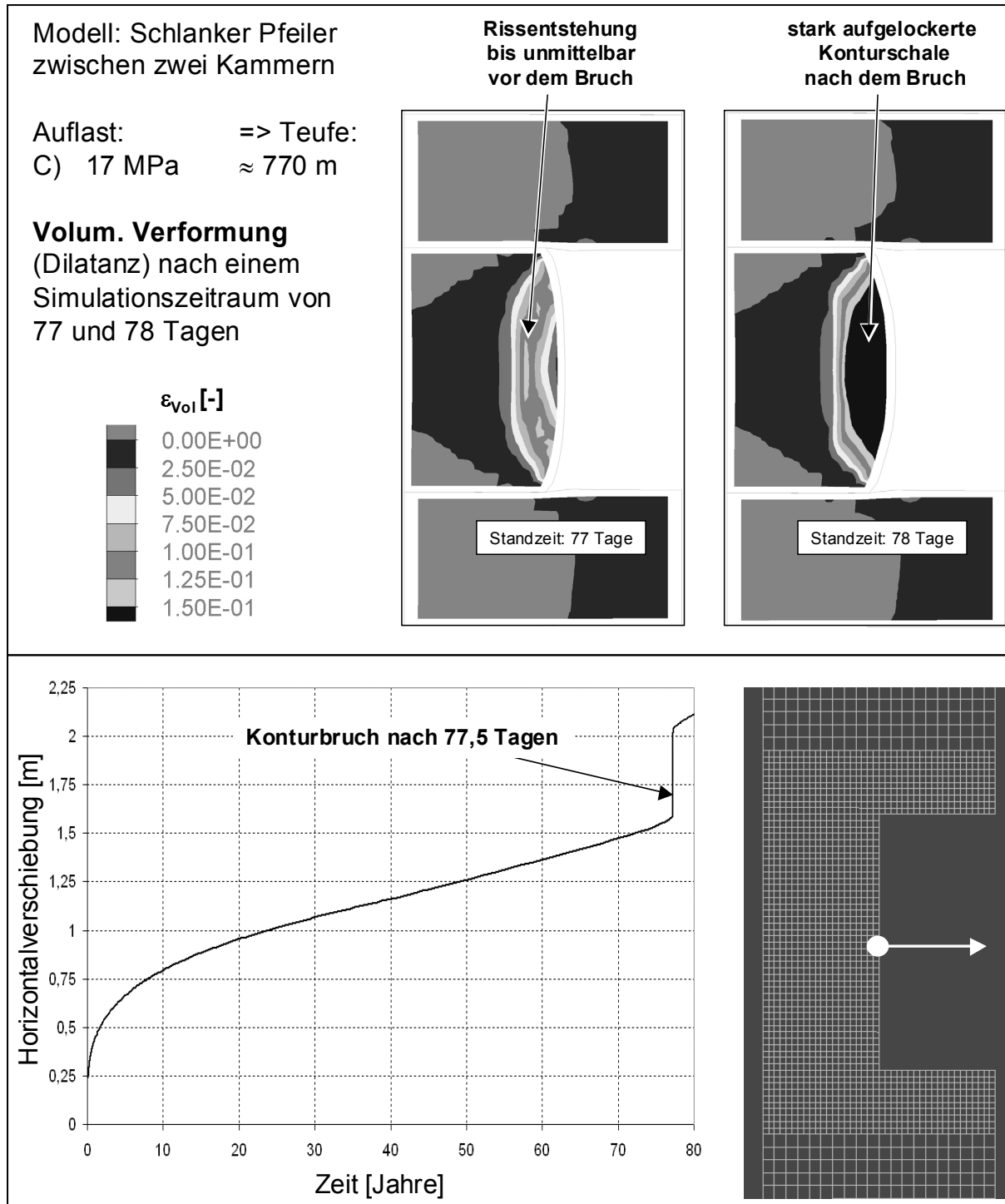


Abb. 18: Mit dem IfG-Stoffgesetz von Günther und Salzer in der Simulation mit der höchsten Auflast berechnete volumetrische Verformung (Dilatanz). Oben: Bis 77 Tage nach der Auf-führung der dem Pfeiler benachbarten Kammern hat sich in einem Bogen um die Stoßmitte herum eine stärker dilatante (geschädigte) Zone gebildet. Einen Simulationstag später ist der gesamte von ihr umschlossene Stoßbereich schlagartig extrem aufgelockert (Intervall: Dila-tanz > 15 %) und hat seine Tragfähigkeit verloren. In der Realität würde dieser Stoßbereich herausgebrochen sein, der Konturbruch am Stoß ist im unteren Diagramm gut an der Bewe-gung der Stoßmitte in die Kammer hinein zu erkennen. Der Pfeiler trägt trotz des erheblich geringeren tragenden Querschnitts weiterhin, weil der dafür entscheidende x-förmige Be-reich der Struktur (siehe Abb. 16 und 17) kaum geschädigt ist (Intervall: 0 bis 2.5 % Dilatanz im oberen Diagramm).

## Zusammenfassung

In diesem vom BMBF geförderten Verbundvorhaben „Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ arbeiten die folgenden sechs Partner zusammen:

- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover
- Dr. Andreas Hampel, Essenheim
- Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Nukleare Entsorgung (INE)
- Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), Leipzig
- Technische Universität Clausthal (TUC), Professur für Deponietechnik und Geomechanik, Clausthal-Zellerfeld
- Universität Hannover, Institut für Unterirdisches Bauen (IUB).

Das Vorhaben hat zum Ziel,

- den aktuellen Stand der von den Partnern entwickelten und verwendeten Stoffgesetze auf dem Gebiet der Salzmechanik sowie die Verfahren zur Bestimmung von Kennwerten zur Charakterisierung einzelner Salztypen zu dokumentieren,
- die Stoffgesetze und Verfahren in Benchmark-Rechnungen zu überprüfen und miteinander zu vergleichen,
- Empfehlungen für die Anwendungen der Stoffgesetze ableiten zu können,
- Hinweise für die weitere Stoffgesetzentwicklung zu liefern,
- die Zuverlässigkeit und Akzeptanz der Ergebnisse der mit den Stoffgesetzen durchgeführten Simulationsrechnungen zu erhöhen und dadurch
- einen Beitrag zur Verbesserung von Instrumentarien für die Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien zu liefern.

Die folgenden, von den meisten Stoffgesetzen bei einem Salztyp mit einem einheitlichen Kennwertsatz beschriebenen Phänomene sind in diesen Vergleich einbezogen worden:

- transientes Kriechen nach Spannungserhöhungen und -reduktionen,
- stationäres Kriechen,
- Entwicklung der volumetrische Verformung (Auflockerung / Dilatanz),
- Entwicklung von Schädigung,
- Bruch und Kriechbruch,
- Nachbruchverhalten und Restfestigkeit,
- Einfluss verschiedener Differenzspannungen (Auflasten),
- Einfluss des Manteldrucks (in Laborversuchen) / der minimalen Hauptspannung (unter Tage),
- Einfluss von Dilatanz und Schädigung sowie
- Einfluss von Feuchtigkeit auf die Verformung.

Die Benchmark-Rechnungen umfassten das Nachrechnen von spannungsgeregelten Kriechversuchen und verformungsgeregelten Festigkeitsversuchen aus dem Labor sowie von einfachen Untertagestrukturen. Mit der Modellierung der Laborversuche wurde die stoffgesetzliche Beschreibung bestimmter Phänomene und Einflüsse, die sich im Steinsalz in der Umgebung

untertägiger Hohlräume vielfältig überlagern, gesondert untersucht und überprüft. Dabei zeigte sich, dass die meisten Stoffgesetze in der Lage sind, mit einem einheitlichen Kennwertsatz für einen Salztyp die Vielzahl der Phänomene und Einflüsse korrekt zu beschreiben.

Mit den aus Laborversuchsdaten ermittelten Kennwerten wurde als ein Anwendungsbeispiel die Spannungs- und Verformungsentwicklung in der Umgebung einer gut dokumentierten Strecke im Bereich der Maschinenstrecke EU1 der Grube Sondershausen über einen Zeitraum von 35 Jahren seit der Auffahrung simuliert. Die Berechnungsergebnisse stimmen gut mit den in situ gemessenen Spannungs- und Extensiometerdaten überein. Anschließend wurde mit den gleichen Kennwerten die Verformung eines fiktiven schlanken Pfeilers (Schlankheitsgrad 1) in drei verschiedenen Teufen (ca. 320, 550 und 770 m) simuliert, um auch die Modellierung starker Dilatanz und Schädigung bis zum (Kontur-)Bruch des Pfeilers mit den verschiedenen Stoffgesetzen vergleichen zu können.

Die Einzelergebnisse der Projektpartner, von denen hier nur einige wenige Beispiele dargestellt werden konnten, liegen mittlerweile vor. Es hat sich gezeigt, dass die in dieses Vorhaben einbezogenen Stoffgesetze in der Lage sind, die vielfältigen Phänomene und Einflüsse in guter Übereinstimmung mit experimentellen Befunden zu beschreiben. Die Berechnungsergebnisse waren grundsätzlich ähnlich, im Detail zeigten sich aber auch Unterschiede, die es in der verbleibenden Projektlaufzeit zu analysieren gilt.

Gegenwärtig (Stand: 03./04. Mai 2006) haben dem Zeitplan entsprechend die Vergleiche der Ergebnisse, Stoffgesetze und Verfahren begonnen, aus denen die Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur Anwendung der Stoffgesetze, soweit sie auf der Basis der durchgeführten Arbeiten gegeben werden können, erarbeitet werden. Die Ergebnisse dieses Vorhabens werden in einem Abschlussbericht und mindestens einer Veröffentlichung dokumentiert sowie auf der für den 08. November 2006 in der BGR Hannover geplanten öffentlichen Abschlussveranstaltung einem interessierten Fachpublikum vorgestellt.

## **Ausblick**

Nach der guten und erfolgreichen Zusammenarbeit in diesem Vorhaben beabsichtigen die Projektpartner, den Verbund aufrecht zu erhalten und den Stoffgesetz- und Verfahrensvergleich auf komplexere und realistischere Untertagesituationen zu erweitern. Dabei sollen auch weitere Verformungsphänomene mit einbezogen werden, wie die Verheilung und die Kopplung von Schädigung, Porosität und Permeabilität in dilatantem Steinsalz. Diese Arbeiten würden eine noch realitätsnähere Einschätzung der Stoffgesetzfähigkeiten erlauben und damit eine verbesserte Basis für Empfehlungen zu deren Anwendung liefern. Auch ein solches Folgeprojekt würde damit den Zielen des Förderschwerpunktes „Verbesserte Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien“ dienen.

## **Literatur**

Hampel, A. & Hunsche, U. (2002): Extrapolation of creep of rock salt with the composite model. - In: Basic and Applied Salt Mechanics, Proc. of the 5<sup>th</sup> Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Bucharest 1999; Hrsg.: N. D. Cristescu, H. R. Hardy, Jr., & R. O. Simionescu; A. A. Balkema Publishers, Lisse, S. 193-202.

Hauck, R. (2001): Tragverhalten tiefliegender Salzkavernen bei atmosphärischem Innendruck. - In: Forschungsergebnisse aus dem Tunnel- und Kavernenbau, Universität Hannover, Bd. 21; zugl.: Dissertation, Inst. f. Unterirdisches Bauen, Universität Hannover; 138 S.

Minkley, W., Menzel, W., Konietzky, H., Te Kamp, L. (2001): A visco-elasto-plastic model and its application for solving static and dynamic stability problems in potash mining. Proc. 2nd Int. FLAC-Symposium Lyon, 29.-31. Oktober, S. 21-27.

Pudewills, A. (2006): Modelling of the hydro-mechanical processes around excavations in rock salt.- Proc. of EUROCK 2006, Liege/Belgien 2006; Hrsg.: A. Van Cotthem et al.; Taylor & Francis Group, London, S. 527-530.