

KIT SCIENTIFIC REPORTS 7579

Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz

BMBF – Verbundprojekt 02C1597

Einzelbericht zum Teilprojekt 3

Alexandra Pudewills

Alexandra Pudewills

**Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten
eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz**

BMBF – Verbundprojekt 02C1597
Einzelbericht zum Teilprojekt 3

Karlsruhe Institute of Technology
KIT SCIENTIFIC REPORTS 7579

Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz

BMBF – Verbundprojekt 02C1597
Einzelbericht zum Teilprojekt 3

von
Alexandra Pudewills

Institut für Nukleare Entsorgung

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 02C1597 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei dem Autor.

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.ksp.kit.edu

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und nationales
Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft



Diese Veröffentlichung ist im Internet unter folgender Creative Commons-Lizenz
publiziert: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

KIT Scientific Publishing 2011
Print on Demand

Kurzfassung

Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz

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 Rahmen eines BMBF-Verbundvorhabens mit einer Laufzeit vom 01.08.2007 bis 31.07.2010 wurden 3D-Benchmark-Modellberechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung in einem realen, stärker beanspruchten Untertagebauwerk im Steinsalz der Grube Angersdorf bei Halle an der Saale durchgeführt. Dabei wird auch die Permeabilitätsentwicklung in der Auflockerungszone einbezogen. Das Projekt dient einer realitätsnäheren Einschätzung der Stoffgesetzfähigkeiten im Hinblick auf deren Einsatz bei der praktischen Anwendung der Berechnung und Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien im Steinsalz.

Am Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wird das Finite-Element Programmiersystem ADINA zur Untersuchung des Steinsalzverhaltens unter Endlagerbedingungen eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde ein neues viskoplastisches Materialmodell zur Beschreibung der Dilatanz und Schädigung von Steinsalz entwickelt und an repräsentative Laborversuche angepasst. Mit diesem Stoffmodell wurde ein Ausschnitt des Kammersystems in der Grube Angersdorf numerisch simuliert. In dem ersten Rechenschritt wurde der Anfangsspannungszustand im Modell unter Berücksichtigung des Kriechverhaltens von Salz und Salzton berechnet. Anschließend wurde das Auffahren der Haupthohlräume behandelt und die Kriechverformungen über weitere 100 Jahre gerechnet. Die Simulationsergebnisse zum Zeitpunkt 50 Jahre nach dem Auffahren (Ist-Zustand) stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der in situ Messungen überein. Die weitergeführte Simulation bis zum Ende liefert eine Prognose der künftigen Entwicklung. Aus den Rechenergebnissen ergaben sich bereits einige Empfehlungen für die Anwendungen der Stoffgesetze und Hinweise für die weitere Stoffgesetzentwicklung.

Dieser Teilbericht stellt die detaillierten Rechenergebnisse des INE zum Verbundprojekt dar. Ein Vergleich der repräsentativen Rechenergebnisse mit den Ergebnissen von den fünf anderen Projektpartnern soll in einem gemeinsamen Synthesebericht präsentiert und diskutiert werden.

Abstract

Numerical Simulation for Long-term Behaviour of a Real Underground Structure in Rock Salt

In recent decades, a large and detailed experimental and theoretical knowledge base for the geomechanical behavior of rock salt has been compiled by several groups. On this basis, a number of advanced constitutive models and procedures for the determination of characteristic salt specific parameter values and for the handling of numerical simulations have been developed.

Between August 2007 and July 2010, the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) have funded a joint project within its research program "Improvement of tools for the safety assessment of underground repositories". The five project partners performed 3-D benchmark model calculations of a real underground structure in rock salt in the Angersdorf mine near Halle in Germany. The aim of the projects was to test the ability of the models to describe the relevant deformation phenomena in rock salt under various influences, (i.e. transient and steady-state creep, the evolution of dilatancy and damage, short-term failure and long-term creep failure, post-failure behavior and residual strength) and to increase confidence in the results of numerical simulations.

At the Institut für Nukleare Entsorgung (INE), of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) the Finite Element Code ADINA is used to study the geomechanical behavior of rock salt under repository conditions. A new viscoplastic constitutive model for rock salt that can describe the volumetric strain (dilatancy) and the damage of the rock has been proposed and implemented in this FE code. The model parameters for the numerical simulation have been evaluated on the available laboratory experiments. The Angersdorf mine consists of a regular pattern of large rooms and pillars. In the first step of the calculations, the initial state of stress, taking into account the creep behaviour of the rock salt and the clay, has been determined. After excavation of the main room and different galleries the calculations have been continued over a time span of about 100 years. The simulation results at 50 years after excavation represent the actual situation in the underground. The calculated closure rates, stress distribution and the increase of rock permeability were compared with in-situ measurements. Further calculation results provide a prediction of the geo-mechanical phenomena expected in the rock salt barrier. In addition, the work displayed possibilities for the further development and improvement of the constitutive models.

This report presents the results obtained by the INE team within the BMBF joint research project. A comparison of several calculation results with the results from five project partners will be presented in a separate synthesis report elaborated by the project leaders.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Modellierung eines Ausschnitts der Grube Angersdorf	2
3	Beschreibung des Rechenmodells	3
3.1	Numerische Berechnungsverfahren	3
3.2	Stoffmodelle und Materialparameter	4
3.2.1	Stoffmodell von Steinsalz	4
3.2.2	Stoffmodelle andere Schichtformationen	11
4	Berechnung des Anfangsspannungszustandes	12
5	Aufbereitung der Ergebnisse für das Modell Angersdorf	13
6	Rechenergebnisse und Vergleich mit in situ Messung	14
6.1	Verschiebungen	15
6.2	Spannungen und Dehnungen	18
6.3	Porosität und Permeabilität	22
7	Zusammenfassung	24
8	Literatur	25
	TABELLENVERZEICHNIS	26
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	26

1 Einleitung

Vorhandene Hohlräume, wie Abbaufelder in Salzformationen können für die Untertage- Einlagerung von chemo-toxischen Abfällen genutzt werden. Für den Nachweis der Langzeitsicherheit von solchen Untertagedeponien kann aufgrund der langen zu betrachtenden Zeiträume nur in sehr begrenztem Maße auf Erfahrungsdaten und experimentelle Ergebnisse zurückgegriffen werden. Hierfür sind numerische Modelle erforderlich, die imstande sind, die komplexen gebirgsmechanischen Verhältnisse um die Untertagestrukturen rechnerisch zu simulieren.

Im Rahmen dieses BMBF- Forschungsprojekts führte jeder Projektpartner mit seinem Stoffgesetz und Programmsystem 3D-Benchmark-Modellrechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung in einem realen Untertagebauwerk im Steinsalz durch. Dabei wurde die Permeabilitätsentwicklung in der Auflockerungszone einbezogen sowie eine Prognose des weiteren Verhaltens berechnet. Das Projekt diente einer realitätsnäheren Einschätzung der Stoffgesetzfähigkeiten im Hinblick auf deren Einsatz bei der praktischen Anwendung der Berechnung zur Sicherheitsbewertung von Endlagern und Untertagedeponien für chemo-toxische Abfälle im Steinsalz.

Mit dem vorliegenden Bericht wird das BMBF-Verbundprojekt "Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von 3D-Modellberechnungen zum mechanischen Langzeitverhalten von realen Untertagebauwerken im Steinsalz", mit einer Laufzeit vom 01.08.2007 bis 31.07.2010 abgeschlossen. Dieses Vorhaben setzte inhaltlich das Verbundprojekt "Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen" (Laufzeit: 01.04.2004 bis 30.11.2006) fort. Das Gesamtziel des Verbundprojekts bestand darin, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren und dauerhaften Untertage-Einlagerung von gefährlichen Abfällen in Steinsalzformationen zu verbessern.

Das Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) beteiligte sich mit dem Finite-Element Programmsystem ADINA und eigenen Stoffgesetzen von Steinsalz, die bereits im ersten Verbundprojekt entwickelt und getestet wurden. Dieser aktuelle Teilbericht zum Förderkennzeichen 02C1597, stellt die detaillierten Rechenergebnisse des INE zur Grube Angersdorf dar. Abschließend werden allgemeine Schlussfolgerungen bezüglich des mechanischen Verhaltens von Steinsalz gezogen und Vorschläge für zukünftigen Forschungsbedarf aufgeführt. Ein Vergleich der repräsentativen Rechenergebnisse mit den Ergebnissen der fünf anderen Projektpartner soll in einem gemeinsamen Synthesebericht präsentiert und diskutiert werden.

2 Modellierung eines Ausschnitts der Grube Angersdorf

Die gebirgsmechanische Berechnung verlangt die Umsetzung der realen Verhältnisse in einem numerischen Modell, bei dem gewisse Idealisierungen notwendig sind. Das Modell umfasst den geologischen Aufbau der betrachtete Gebirgsstruktur, die Materialmodelle der beteiligten Schichten und den Primärspannungszustand des Gebirges. Zur Durchführung der Benchmark-Rechnungen wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ein 3D-Ausschnitt des relativ symmetrischen und periodischen Abbaukammersystems in der Grube Angersdorf ausgewählt. Der vereinfachte geologische Aufbau des Gebirgsausschnittes zusammen mit der horizontalen Lage der Grube und die Position des Berechnungsmodells sind in Abbildung 1 dargestellt.

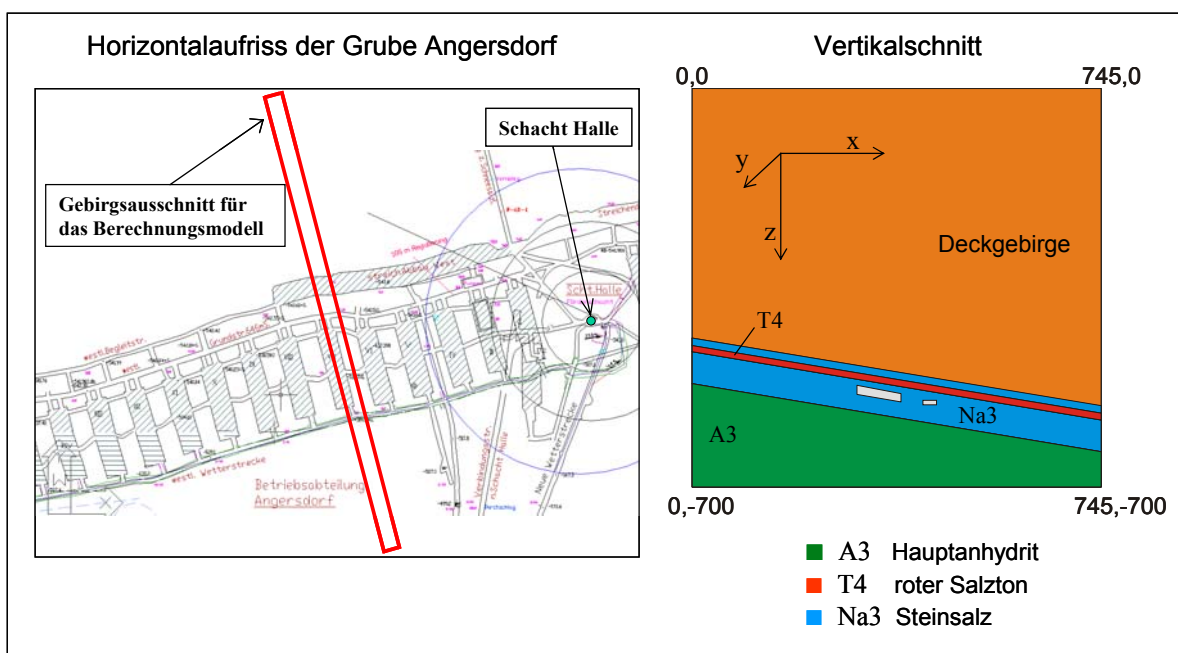


Abb. 1 Aufriss der Grube Angersdorf mit der Lage des Berechnungsmodells und der geologischen Aufbau des Gebirges (Quelle, IfG-Leipzig)

Aus dem geologischen Vertikalprofil (rechts in Abb. 1) ist zu ersehen, wie der Aufbau der geologischen Formation um die Grube Angersdorf eine parallele um 9° nach Norden einfallend Schichtung aufweist. Dies wurde auch bei der Modellauswahl berücksichtigt. Weiterhin wurde die gesamte Geometrie des 3D Gebirgsausschnittes für die Modellerstellung zusammen mit den Abmessungen der Untertagestruktur (d. h. die Koordinaten der Eckpunkte von Abbaukammer, Salzpfeiler und Strecken) von dem IfG Leipzig zur Verfügung gestellt, sie sind in Abbildung 2 dargestellt.

Zum Beginn des Projekts wurden neue Salzproben für die gesteinsmechanischen Laborversuche entnommen und es wurde eine aufwendiges in situ Messprogramm zur Bestimmung der minimalen Hauptspannung und der Porosität / Permeabilität im Pfeiler zwischen zwei Nachbarkammern gestartet.

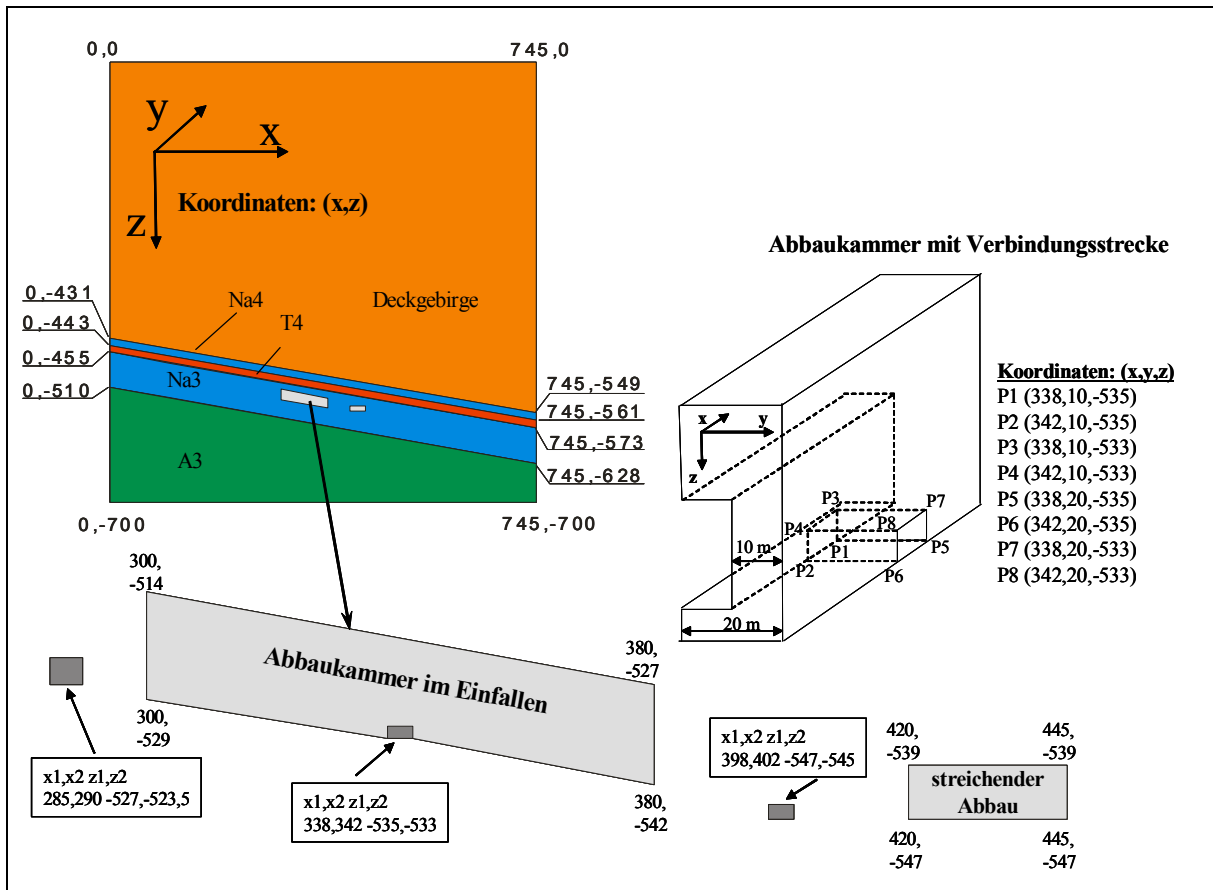


Abb. 2 Abmessungen des betrachteten Grubenausschnitts und die Geometrie der Abbaukammer und der Strecken. Besonderes Augenmerk wurde zu der Verbindungsstrecke zwischen zwei benachbarten Abbaukammern (Bild rechts) gewidmet.

3 Beschreibung des Rechenmodells

Die untersuchten Abbaukammern und Strecken wurden von ca. 50 Jahren im Leine Steinsalz (Na3) aufgefahren. Die tiefer liegenden Kali-Abbauten wurden nicht berücksichtigt, da die Modellierung der Carnallitschicht nicht Gegenstand der Untersuchungen war. Das Rechenmodell berücksichtigt nur die Anhydritschichten in einer Tiefe von 700 m unter NN. In den Simulationsrechnungen wurde vereinfachend ein schlagartiges Auffahren der gesamten Hohlräume angenommen und der Zeitpunkt 50 Jahre nach dem Auffahren wird als Ist-Zustand angesehen. Anschließend werden die Rechnungen weitere 50 Jahre als Prognose der künftigen Entwicklung des Grubenausschnitts weitergeführt.

3.1 Numerische Berechnungsverfahren

Zur 3D Modellierung der in Abb. 2 abgebildeten Struktur und der anschließenden Simulation der gebirgsmechanischen Vorgänge wurde das Finite-Element Programmiersystem ADINA (**A**utomatic **D**ynamic **I**ncremental **N**onlinear **A**nalysis) verwendet. Mit Hilfe eines eigenen Moduls (ADINA-M) auf Parasolidbasis und des Präprozessors (ADINA-AUI) wurde das 3D Modell erzeugt und benetzt (s. Abb. 3).

Die besondere Stärke des Systems liegt in der Berechnung von geometrisch und physikalisch nichtlinearen Problemen. Für eine effiziente Analyse großer Strukturen stehen ein Sparse-matrix- und ein iterativer Gleichungslöser für große Systeme nämlich das Konjugierte Gradientenverfahren zur Verfügung. Diese gewährleisten erhebliche Einsparungen an Rechenzeit und Speicherbedarf. Bei der nichtlinearen Analyse können verschiedene Gleichungslösungsmethoden, die beispielsweise in [BATHE, 2006] ausführlich beschrieben sind, verwendet werden:

- Full Newton-Raphson mit und ohne Line Searching
- BFGS
- Automatische Zeitschrittsteuerung sowie
- Energie-, Kraft- und Verschiebungs-Konvergenzkriterien

Für die Berechnungen steht eine Vielzahl linearer und nichtlinearer, elastischer und plastischer Materialmodelle zur Verfügung. Dabei können auch thermische Einflüsse und Kriechvorgänge berücksichtigt werden. Weiterhin gibt es eine Benutzerschnittstelle um eigene Materialmodelle (wie zum Beispiel das im Rahmen dieses Projekts verwendete Stoffmodell für Steinsalz) zu definieren.

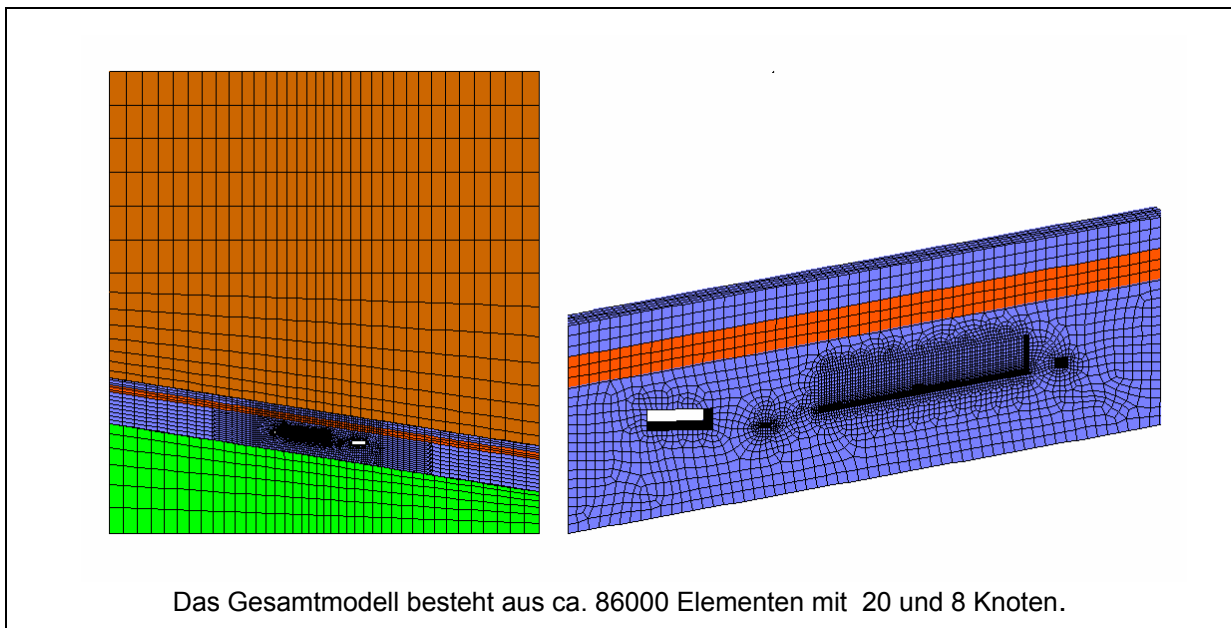


Abb. 3 Seitenansicht des gesamten FE-Modells des Grubenausschnitts Angersdorf (links) und dem Bereich der Hohlräumen (rechts)

3.2 Stoffmodelle und Materialparameter

Numerische Berechnungsverfahren für die 3D Strukturen erfordern Stoffgesetze, die das mechanische Verhalten möglichst gut abbilden. Dazu ist die genaue Kenntnis des Langzeitkriechverhaltens, der Dilatanzentwicklung und Entfestigung sowie des Permeabilitätsverhaltens des Steinsalzes um der Hohlräume erforderlich. Das hier verwendete Stoffmodell wurde im Rahmen des ersten Verbundvorhabens entwickelt und an repräsentative Laborversuche angepasst. Zur Simulation der Grube Angersdorf war es notwendig, eine neue Kalibrierung der Kriechkennwerte an die aktuellen Laborversuche an Steinsalzproben aus Angersdorf vorzunehmen.

3.2.1 Stoffmodell von Steinsalz

Wie allgemein bekannt, zeigt Steinsalz starke elastisch-viskoplastische Eigenschaften und damit das Bestreben, Hohlräume im Untertage wieder zu schließen. Aus Laborversuchen und in situ Messungen ist dieses Verformungsverhalten hinreichend bekannt. Zur numerischen Untersuchung der Dilatanz von Steinsalz wie zum Beispiel in der Auflockerungszone (EDZ) wurde es jedoch notwendig, ein neues viskoplastisches Stoffmodell zu entwickeln und es wurde im Rahmen des früheren Verbundvorhabens getestet und angepasst.

Die Beschränkung auf kleine Dehnungen für Steinsalz erlaubt eine additive Zerlegung der gesamten Verzerrungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}$ als Summe der thermoelastischen Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^{T,e}$ und der viskoplastischen Dehnungsrate, $\dot{\epsilon}_{ij}^{VP}$:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{T,e} + \dot{\epsilon}_{ij}^{VP} \quad (1)$$

Das elastische Materialverhalten

Das linear elastische Verhalten von Steinsalz unterhalb der Fließgrenze wird üblicherweise über das verallgemeinerte Hooke'sche Gesetz bestimmt:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{T,e} = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{ij} - 3 \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \cdot \dot{\sigma}_m + \alpha \cdot \delta_{ij} \dot{T} \quad (2)$$

mit E Elastizitätsmodul

ν Querkontraktionszahl

δ_{ij} Kronecker Symbol (= 1 für $i = j$; = 0 für $i \neq j$)

$\dot{\sigma}_{ij}$ Komponente der Spannungsrate

\dot{T} Temperaturrate

α linearer Wärmeausdehnungskoeffizient.

Die thermoelastischen Stoffeigenschaften von Steinsalz wurden als zeitunabhängig vorausgesetzt.

Das viskoplastische Materialverhalten

Die viskoplastische Dehngeschwindigkeit wurde auf zwei Dehnungsraten in Verbindung mit zwei Fließbedingungen aufgeteilt, was auch physikalisch sinnvoll ist. Das Kriechen bei niedriger Beanspruchung läuft vorwiegend ohne Volumenänderung ab, während bei hoher Last bzw. Belastungsgeschwindigkeit eine Volumenverzerrung des Materials eintritt.

Im Folgenden werden die Grundzüge des viskoplastischen Verhaltens von Steinsalz dargestellt. Zunächst werden die vorhandenen Stoffgleichungen unterhalb der Dilatanzgrenze d. h. beim konstanten Volumen kurz präsentiert, danach werden die neu entwickelten Formulierungen des Stoffmodells zur Beschreibung der volumentrischen Verformungen (Dilatanz) behandelt.

Das viskoplastische Materialverhalten wird durch die Fließbedingung und eine Fließregel angegeben [OWEN, 1980]. Die Fließbedingung F beschreibt den Spannungszustand, bei dem eine irreversible Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ einsetzt. Die Fließregel beschreibt die Geschwindigkeit und Richtung des Fließens und hat folgende allgemeine Form:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F(\sigma)) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \tag{3}$$

$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$	Tensor der viskoplastischen Dehnungsrate		
F	Fließbedingung		
$\langle \Phi(F) \rangle$	Funktion:	$\begin{cases} \langle \Phi(F) \rangle = 0 & \text{für } F \leq 0 \\ \langle \Phi(F) \rangle = \Phi(F) & \text{für } F > 0 \end{cases}$	(4)

Φ ist eine wie folgt definierte skalare Funktion:

$$\Phi(F) = (F - F_0)^m \tag{5}$$

mit

- m Materialkennwert
- F_0 Fließgrenze
- Q Fließfläche, und $\partial Q / \partial \sigma_{ij}$ gibt die Fließrichtung an.
- σ_{ij} Spannungstensor

Der Viskositätsparameter γ ist definiert als

$$\gamma = e_1 \cdot \exp(-e_2 / T) \tag{6}$$

e_1 und e_2 sind Materialparameter und T ist die absolute Temperatur.

In unserem Stoffmodell sind die Funktionen Q und F identisch, d. h. wir verwenden eine assoziierte Fließregel. Für den Fall, bei dem keine Volumenverzerrung stattfindet, wird die viskoplastische Verformung mit Hilfe von mehreren Kriechansätzen beschrieben.

Das sekundäre Kriechen von Steinsalz wird von einem häufig verwendeten Norton-Ansatz definiert wobei die Temperaturabhängigkeit des Kriechverhaltens durch die Arrheniusfunktion ausgedrückt werden kann:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^s = A \cdot \exp(-Q_c / RT) \cdot (F^s)^n \frac{\partial F^s}{\partial \sigma_{ij}} \quad (7)$$

Die angegebenen Zahlenwerte für den Fließfaktor A und die Aktivierungsenergie Q_c sind als Richtwerte anzusehen, die je nach chemischer Zusammensetzung des Steinsalzes variieren können. Zur Beschreibung des Fließbeginns wird die Fließbedingung F^s nach von Mises verwendet:

$$F^s = \sqrt{J_2} - F_0^s \quad (8)$$

Die Fließgrenze für Steinsalz F₀^s wird gleich Null angesetzt, was bedeutet, dass das Material sich bei Belastung immer im viskosen Zustand befindet. Die Fließbedingung F^s ist gleich der Effektivspannung, $\sigma_{\text{eff}} = \sqrt{3J_2}$ gesetzt, wobei J₂ die zweite Invariante des Spannungstensors ist.

Das transiente Kriechen von Steinsalz wurde im Rahmen dieses Projekts mit Hilfe eines Zeitverfestigungsansatzes wie folgt beschrieben:

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{\text{tr}} = a_0 \cdot \sigma_{\text{eff}}^n \cdot \exp(-Q_c / RT) \cdot [1 + a_1 \cdot t^{(a_2-1)}] \quad (9)$$

mit a₀, a₁ und a₂ sind Materialparameter.

Die Temperatur- und die Spannungsabhängigkeit wird analog zum sekundären Kriechen angenommen. Nach sehr langen Kriechzeiten geht diese Formulierung in das bereits beschriebene sekundäre Kriechen der Gleichung (7) über.

Beschreibung der Dilatanz von Steinsalz

Zur Beschreibung der Volumenverformungen des Steinsalzes (Dilatanz) nach dem Überschreiten der Dilatanzgrenze wird ein neues viskoplastisches Stoffmodell verwendet. Dieses Modell basiert auf dem von [HEIN, 1991] entwickelten Stoffmodell für Salzgrus.

Für die viskoplastische Dehnungsrate $\dot{\epsilon}_{ij}^d$ gilt nach dem Ansatz von Hein:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^d = A \cdot \exp(-Q_c / RT) \cdot (F^d)^m \cdot \frac{\partial F^d}{\partial \sigma_{ij}} \quad (10)$$

Die Fließbedingung F^d wird als eine Funktion des hydrostatischen Drucks p und der deviatorischen Spannungsinvariante q beschrieben. Die Definition der Fließbedingung und der Fließrichtung lautet:

$$F^d(p, q) = n_1 \cdot p^2 + n_2 \cdot q^2 \quad (11)$$

$$\frac{\partial F^d}{\partial \sigma_{ij}} = 2 \cdot \left(\frac{1}{3} n_1 \cdot p \cdot \delta_{ij} + n_2 \cdot S_{ij} \right) \quad (12)$$

mit

$$p = -\frac{1}{3} \sigma_{ij} = -\frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (13)$$

$$q = \sqrt{(S_{ij} \cdot S_{ji})} \quad (14)$$

wobei S_{ij} der Deviator des Spannungstensors ist.

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \cdot \sigma_{kk} \quad (15)$$

n_1 und n_2 sind Materialfunktionen abhängig von der Volumendehnung $\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$

$$n_1 = c_1 \cdot \left(\frac{q^2}{p^2} - c_2 \cdot \frac{\eta_0 + \varepsilon_{vol}}{1 + \varepsilon_{vol}} \right) \quad (16)$$

$$n_2 = 1 - c_3 \cdot n_1 \cdot \frac{p^2}{q^2} \quad (17)$$

mit

c_1, c_2, c_3	Materialparameter
η_0	Anfangsporosität von Steinsalz

Die Werte dieser Parameter wurden an früheren IfG - Laborversuchen im dilatant belasteten Steinsalz aus der Grube Angersdorf ermittelt [HAMPEL ET AL., 2007].

Mit Hilfe einer vorläufigen Beziehung zwischen Porosität und Hauptspannungen [POPP, 2002] wird die Permeabilität k des Steinsalzes abgeleitet:

$$k = \frac{k_{tp}}{\left(\frac{\phi}{\phi_{tp}}\right)^{-p_1} + \left(\frac{\phi}{\phi_{tp}}\right)^{-p_2}} \quad (18)$$

$$k_{tp} = a_k \cdot \exp(-p_c \cdot b_k)$$

$$\phi_{tp} = a_\phi \cdot \exp(-p_c \cdot b_\phi)$$

Bruchkriterien und Dilatanzgrenze

Darüber hinaus beinhaltet das vorgestellte Stoffmodell separate Ansätze zur Bewertung der Schädigung, der Dilatanz und des Versagens von Steinsalz nach [HUNSCHE & SCHULZE, 2005].

- **Festigkeitskriterium:** $\tau_{F,eff} = 2.612 (\sigma_m)^{0.78}$ (20)

$\tau_{F,eff}$ Effektive Scherspannung beim Bruch

σ_m Mittlere Normalspannung

- **Versagensgrenze für Zugbelastung:** $\sigma_{z,krit} = 2 \text{ MPa}$ (21)

Die Versagensgrenze von Steinsalz unter Zugbelastung wird erreicht, wenn die maximale Hauptspannung ($\sigma_{p,max}$) oder die kritische Zugspannung ($\sigma_{z,krit}$) überschritten wird. Dieses Versagen aufgrund zu hoher Zugbelastung kann auch dann auftreten, wenn die Festigkeitsgrenze nach Gleichung (20) nicht überschritten wird.

- **Dilatanzkriterium:** $\tau_{D,eff} = 0.899 \sigma_m - 0.0167 \sigma_m^2$ (22)

Diese Formulierung wurde von CRISTESCU UND HUNSCHE, 1996 ausführlich beschrieben und beruht auf Laborversuchen an Steinsalzproben aus der Asse- bzw. Gorleben-Salzformation. Unterhalb der Dilatanzgrenze befindet sich der Kompressionbereich (Kontraktanz), bei dem die Volumendehnung gleich null ist. Erreicht der Spannungszustand die Dilatanzgrenze, $\tau_{D,eff}$ kann die Dilatanz des Materials eintreten.

Die Zahlenwerte von den vorgestellten Stoffmodellen sind in der nachstehenden Tabelle zusammen mit den entsprechenden Gleichungen aufgeführt:

Tab. 1 Physikalische Eigenschaften von Steinsalz verwendet in der ADINA- Analyse

Eigenschaft	Gleichung	Parameter
Thermo-elastische Verformungsrate	$\dot{\epsilon}_{ij}^{T,e} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \dot{\sigma}_{ij} - 3 \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \cdot \dot{\sigma}_m + \alpha \cdot \delta_{ij} \dot{T}$	E = 24 GPa; ν = 0.25; α = 4.2E-05 1/K
Transientes / sekundäres Kriechen	$\dot{\epsilon}_{ij}^{tr} = a_0 \cdot \sigma_{\text{eff}}^n \cdot \exp(-Qc/RT) \cdot [1 + a_1 \cdot t^{(a_2-1)}]$	a ₀ = 0.015 1/d; a ₁ = 240; a ₂ = 0.112; Qc/RT = 6495
Dilatanz und Schädigung	$\dot{\epsilon}_{ij}^d = A \cdot \exp(-Qc/RT) \cdot (F^d)^m \cdot \frac{\partial F^d}{\partial \sigma_{ij}}$ $F^d(p,q) = n_1 \cdot p^2 + n_2 \cdot q^2$ $n_1 = c_1 \cdot \left(\frac{q^2}{p^2} - c_2 \cdot \frac{\eta_0 + \epsilon_{vol}}{1 + \epsilon_{vol}} \right)$ $n_2 = 1 - c_3 \cdot n_1 \cdot \frac{p^2}{q^2}$	m = 2.25; c ₁ = 0.3; c ₂ = 400; c ₃ = 2; η ₀ = 0.02%
Permeabilität	$k = \frac{k_{tp}}{\left(\frac{\phi}{\phi_{tp}} \right)^{-p_1} + \left(\frac{\phi}{\phi_{tp}} \right)^{-p_2}}$ $k_{tp} = a_k \cdot \exp(-p_c \cdot b_k)$ $\phi_{tp} = a_\phi \cdot \exp(-p_c \cdot b_\phi)$	p ₁ = 4; p ₂ = 1; a _k = 4.27E-14; b _k = 1.26; a _φ = 0.0263; b _φ = 0.3093

3. 2. 2 Stoffmodelle und Parameter von nichtsalinaren Schichten

Um diese Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse zu gewährleisten, wurden die Stoffgesetze und Parameterwerte zur Modellierung der nichtsalinaren Gesteinsschichten sowie die Konstanten des elastischen Verhaltens des Steinsalzes von allen Partnern einheitlich vorgegeben, siehe Tab. 2. Diese Werte basieren auf gesteinsmechanischen Laborversuchen, die das IfG in einem früheren Forschungsprojekt zum Langzeitsicherheitsnachweis der Grube Angersdorf durchgeführt hat [IFG, 2006].

Tab. 2 Zusammenstellung der Stoffmodelle und Zahlenwerte der verschiedenen nichtsalinaren Gesteinsschichten

Schicht	Modell	ρ	K	G	E	ν	c	ϕ	σ_z	A	n
		[t/m ³]	[GPa]	[GPa]	[GPa]	[-]	[MPa]	[°]	[MPa]	[d ⁻¹]	
Deckgebirge	MC	2,80	5,9	2,3	6,0	0,33	0,5	30	0		
roter Salzton	T4 Norton	2,30	7,5	4,0	10,2	0,27				1,60E-06	1
Hauptanhydrit	A3 Elastisch	2,90	40,0	24,0	60,0	0,25					
Steinsalz	Na3-Na4	2,15	16,7	10,0	25,0	0,25					

Mit Hilfe dieser Stoffmodelle und der elastischen Kennwerte wurde der Primärspannungszustand im Gesamtmodell berechnet.

4 Berechnung des Anfangsspannungszustandes

Der im Gebirge vorliegende Primärspannungszustand ist neben der Teufenlage von verschiedenen anderen Einflussfaktoren abhängig. Dies sind die Einflüsse aus dem Deckgebirge und den verschiedenen Gesteinsschichten, Schichtneigung sowie vorhandene Hohlräume und deren Alter. Deshalb können die berechneten Spannungen nur eine Abschätzung des tatsächlich vorhandenen Spannungszustands liefern. Aus diesem Grund wurde auch eine einheitliche Definition des Grundspannungszustands vorgegeben:

$$\sigma_{zz} = \rho \cdot g \cdot z$$

$$\text{mit } \rho : \text{Dichte [kg / m}^3\text{]}, g : 9,81 \text{ m/s}^2, z : \text{Teufe [m]}$$

im Salinar :

$$\sigma_{zz} = \sigma_{yy} = \sigma_{xx}$$

im Deckgeb. :

$$\sigma_{yy} = \sigma_{xx} = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_{zz}$$

Zuerst wurde mit dem Programm ADINA der Primärspannungszustand für elastisches Materialverhalten aus Tabelle 2 berechnet. Da keine Initialisierung des Anfangsspannungszustandes für das kriechfähige Steinsalz bzw. roter Salzton vorgenommen werden kann, wurde in der folgenden Berechnungsphase über ca. 10000 Jahre der Spannungsausgleich zwischen den kriechfähigen Schichten und dem elasto-plastischen Deckgebirge simuliert.

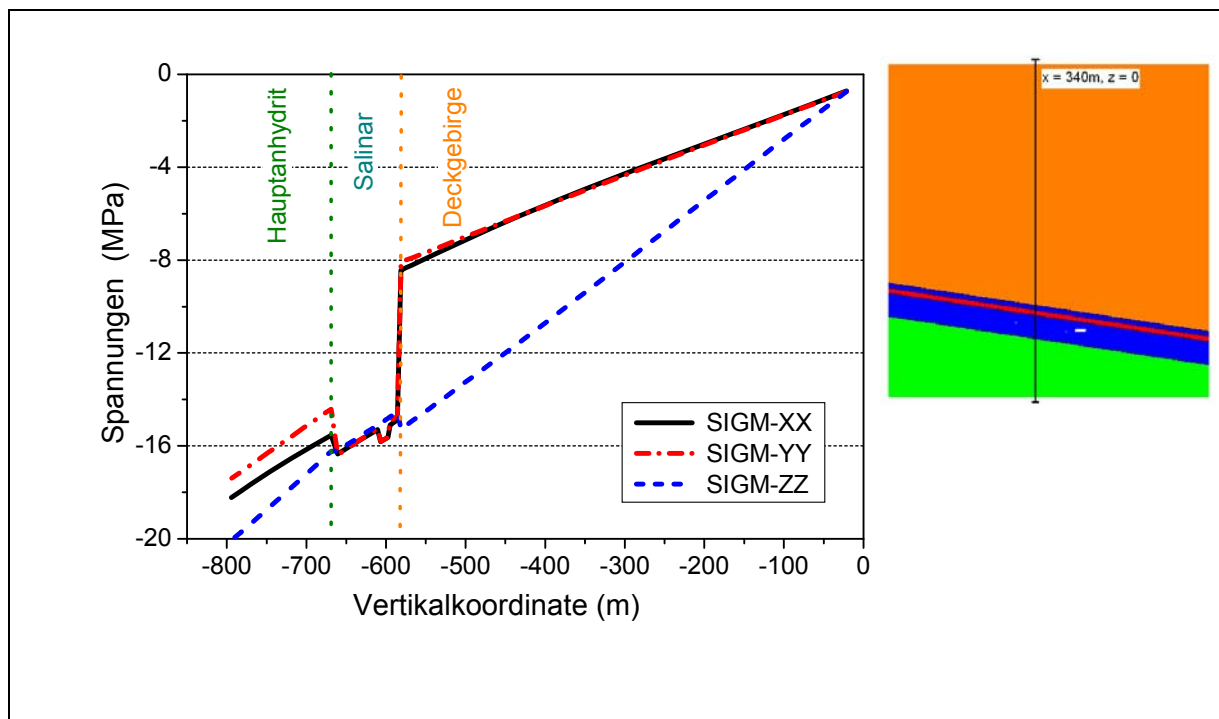


Abb. 4 Berechnung des Anfangsspannungszustandes im Modell Angersdorf vor dem Auffahren der Hohlräume; hier sind die drei Normalspannungen (σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz}) dargestellt.

Abbildung 4 zeigt den Vertikalverlauf der Normalspannungen entlang einer Traverse durch die Mittelebene des Modells Angersdorf. Im Salinar sind bereits nach ca. 3000 Jahre lithostatische Verhältnisse erreicht. Zur Illustration werden in Abbildung 5 die Verteilungen der Vertikalverschiebung sowie der maximalen Hauptspannung im Modell ca. 3000 Jahre vor dem Auffahren der Hohlräume dargestellt.

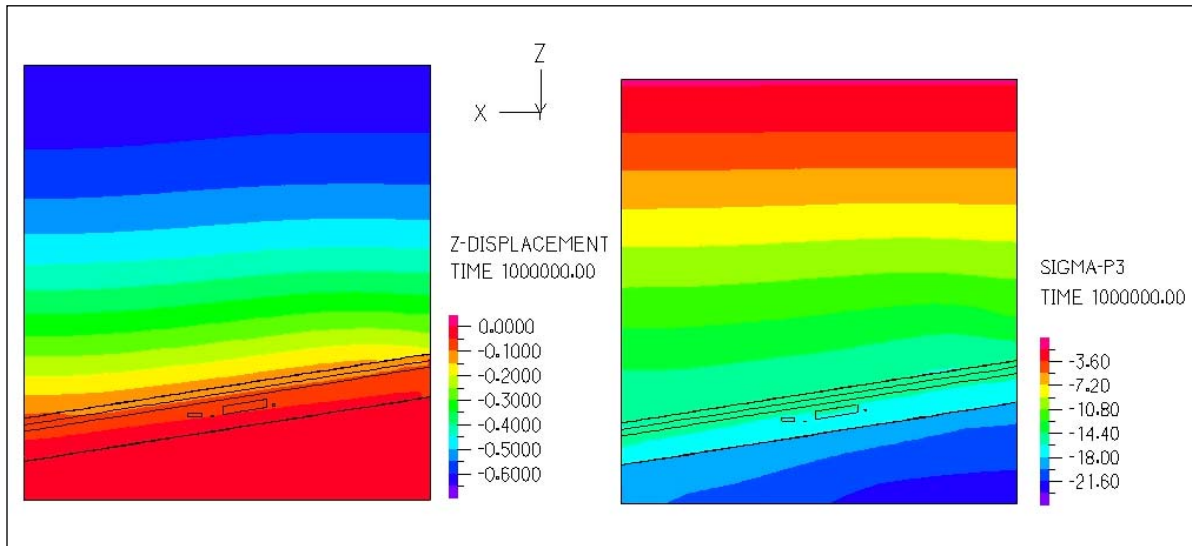


Abb. 5 Berechnete Verteilung der Vertikalverschiebung und der min. Hauptspannung nach ca 3000 Jahren Kriechverformung

Die Berechnung des Anfangspannungszustandes gilt als abgeschlossen, sobald sich ein ausgeglichener Spannungszustand eingestellt hat und nahezu konstante deviatorische Spannungen herrschen.

5 Aufbereitung der Ergebnisse für das Modell Angersdorf

Da sich eine große Menge an auszuwertenden Zahlenwerten ergibt, werden die Rechenergebnisse an gewählten Orten im Modell Angersdorf betrachtet. Um eine gemeinsame Basis zum Vergleich der von den fünf verschiedenen Projektpartnern erhaltenen Rechenergebnisse zu finden und zu einer erfolgreichen Bewertung der verwendeten Modelle, wurden einheitliche Positionen im Modell für die Ergebnisausgaben festgelegt. Es sind Punkte und Traversen in der Umgebung der Abbaukammer und Verbindungsstrecke sowie in der Nähe von Messbohrungen des IfG an denen die zeitliche Entwicklung der Verschiebungen, Spannungen und Verzerrungen miteinander verglichen werden soll. Ein Vergleich mit den erhaltenen Messdaten in der Grube soll ebenfalls vorgenommen werden. In Abbildung 6 sind diese Bereiche mit den entsprechenden Punkten (a - h) und die Spuren $\alpha-1$, $\alpha-2$, β , δ und γ eingetragen.

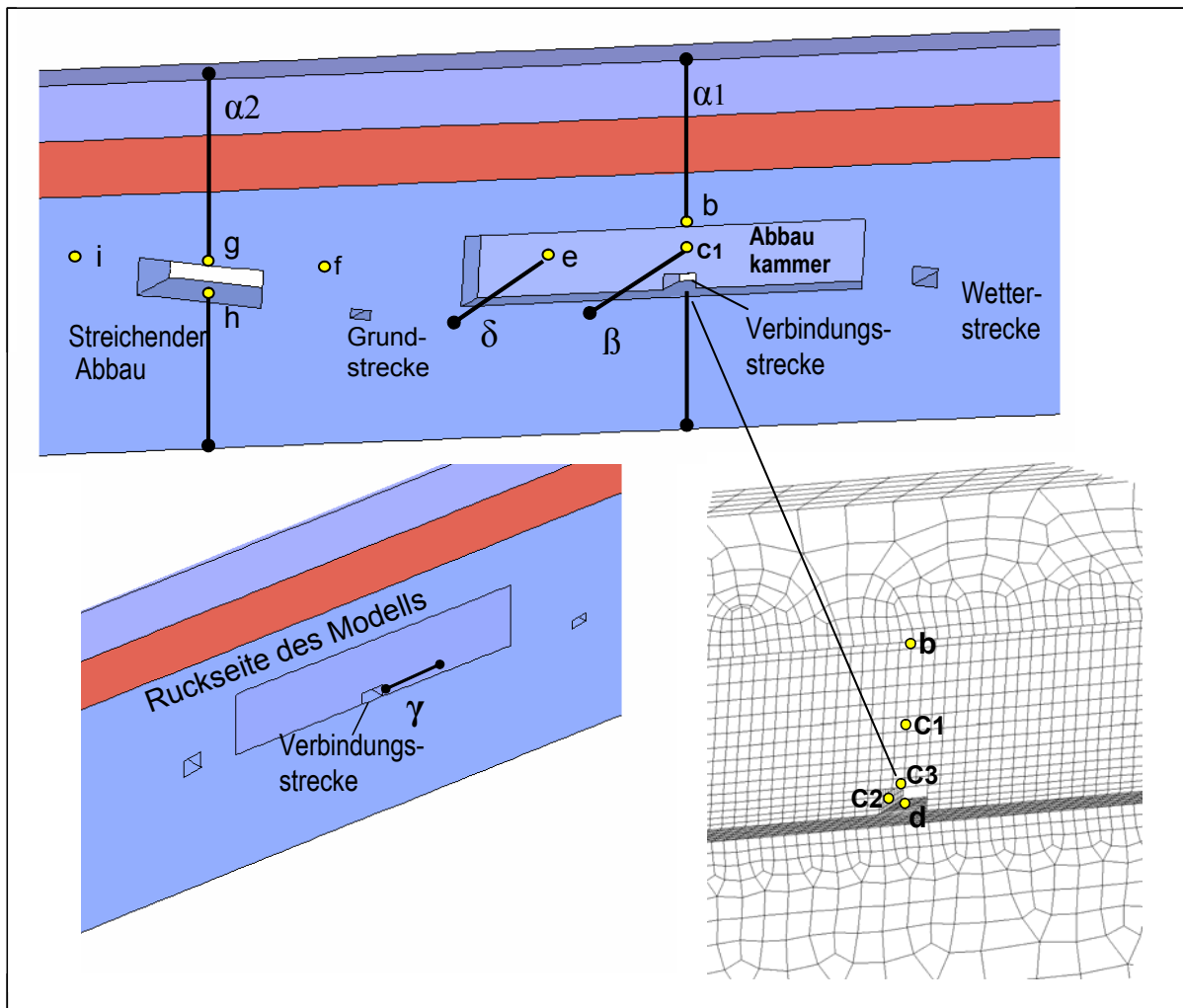


Abb. 6 Ausgabepunkte und Spuren im Modell Angersdorf zur Darstellung und zum Vergleich der Rechenergebnisse aus den 3D Simulationsrechnungen. Der Punkt a befindet sich an Tagesoberfläche über der Abbaukammermitte.

6 Rechenergebnisse und Vergleich mit in situ Messung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der numerischen Analyse nach dem Auffahren aller Hohlräume im Salzgebirge über ca. 100 Jahre beschrieben. Von besonderem Interesse sind die Entwicklungen von Verschiebungen bzw. Konvergenzen der verschiedenen Strecken und der Kammer VIII sowie von Spannungen und Verzerrungen (Kriechen und Dilatanz) im Salzpfiler im Nahbereich der Hohlräume. Die Rechenergebnisse zum Zeitpunkt 50 Jahre (Ist-Zustand) wurden nicht nur mit denen der anderen Partner sondern auch mit den vorhandenen in situ Messungen verglichen. Die weitere Rechnung bis zum Zeitpunkt 100 Jahre stellt eine Prognose der zu erwartenden gebirgsmechanischen Situation im Modellbereich dar.

6.1 Verschiebungen

Im ersten Untersuchungsschritt erfolgte die Rückrechnung des Ist-Zustandes, um einen Vergleich der berechneten Top-Senkung mit dem vermessenen Senkungsverlauf des topografischen Punktes P 1025 durchzuführen. Dadurch soll eine Kalibrierung der verwendeten Kriechparameter erreicht werden. In Abbildung 7 sind die berechneten und gemessenen Verschiebungen (Senkung) des Punktes a und die gemessene Tagesoberflächensenkung am Punkt P1025 zusammen dargestellt. Die Übereinstimmung ist bemerkenswert, nachdem die Kriechparameter angepasst wurden. Alle anderen Kennwerte bleiben unverändert.

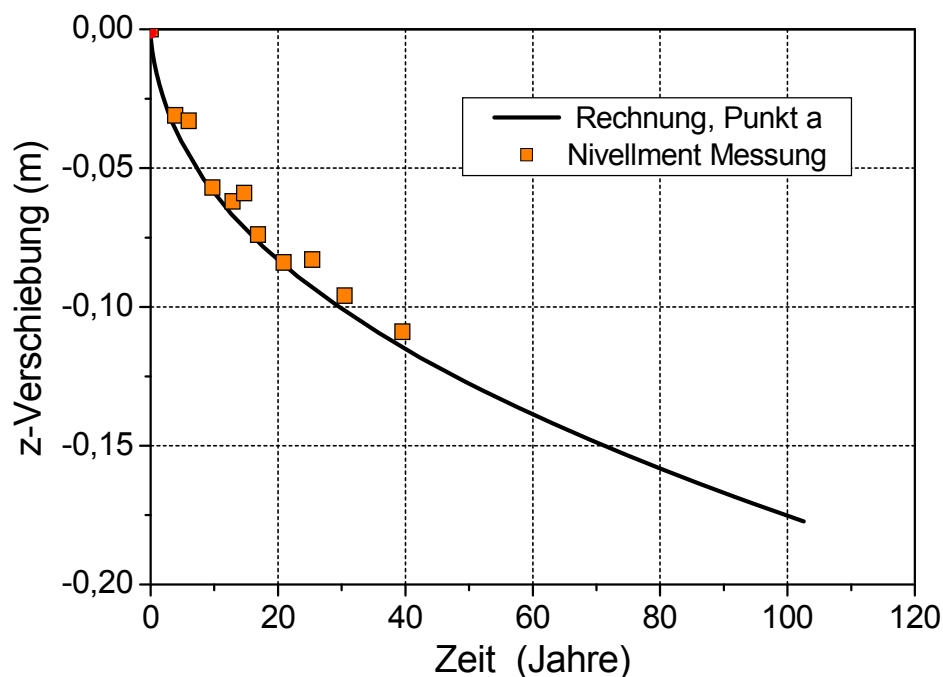


Abb. 7 Vergleich der berechnete mit gemessenen Verschiebungen des Punkts a und des Vermessungspunkts P1025 an der Tagesoberfläche.

In Abbildung 8 sind die berechneten zeitlichen Entwicklungen der Verschiebungen an allen vorgegebenen Punkten von a – h dargestellt. Die Entwicklung der Horizontalverschiebungen um die Verbindungsstrecke und um Punkt e am Kammerstoß sind in Abbildung 9 dargestellt. Die Abbildungen 10 - 11 zeigen die berechneten Verschiebungen entlang verschiedener Spuren nach 50 und 100 Jahren. Abbildung 12 stellt den Flächenplot der Verschiebung zum Zeitpunkt $t = 102$ Jahre nach der Hohlraumerstellung dar.

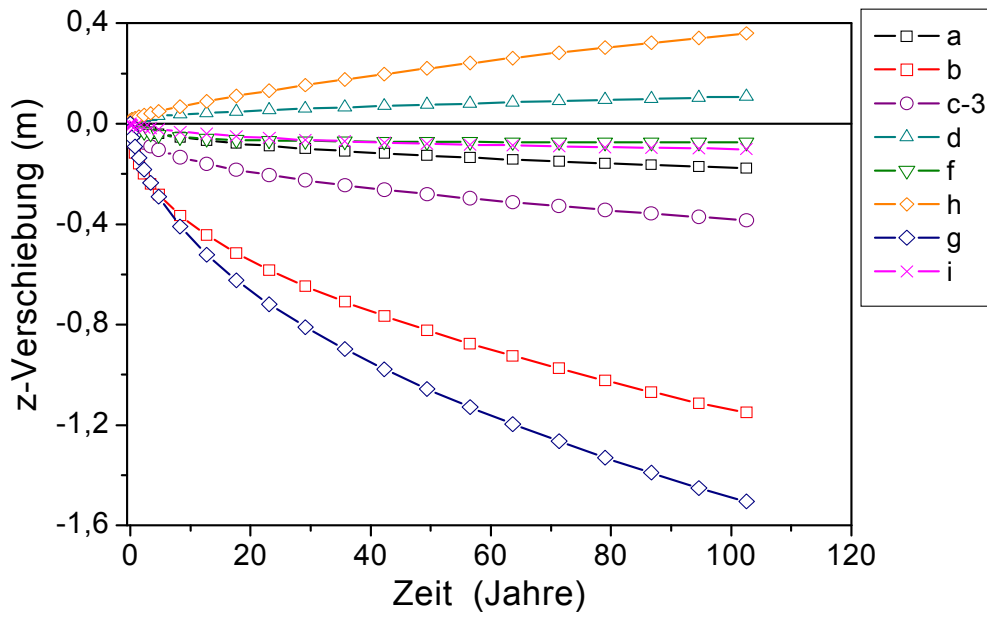


Abb. 8 Berechnete Verschiebungen der Punkte a - h. Die maximale Verschiebung wurde an Punkt g (Firstmitte des streichenden Abbaus) ermittelt.

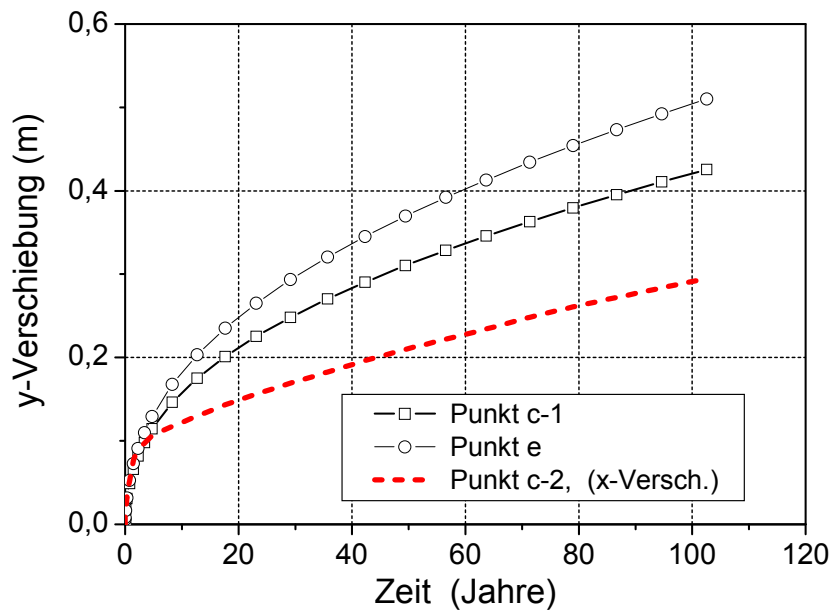


Abb. 9 Berechnete Verschiebungen der Punkten c-1, c-2 und e.

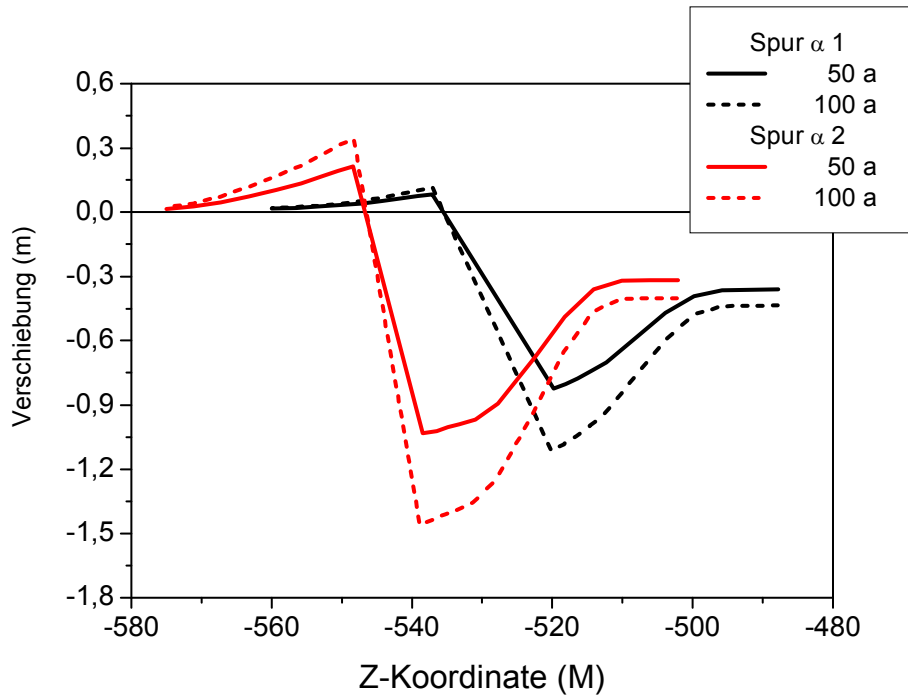


Abb. 10 Berechnete Horizontalverschiebungen entlang der Spur α -1 und α -2 nach 50 und 100 Jahren.

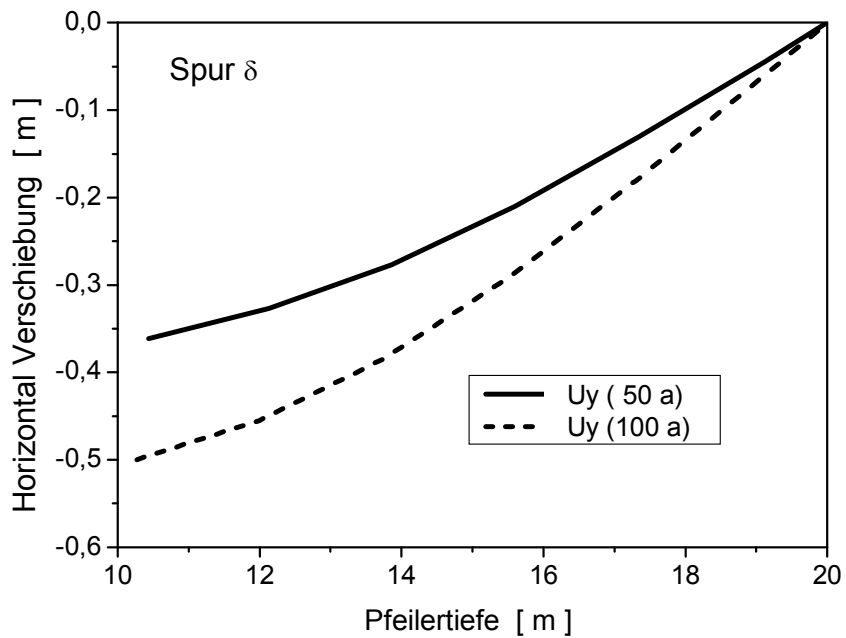


Abb. 11 Berechnete Horizontalverschiebungen entlang der Spur δ nach 50 und 100 Jahren.

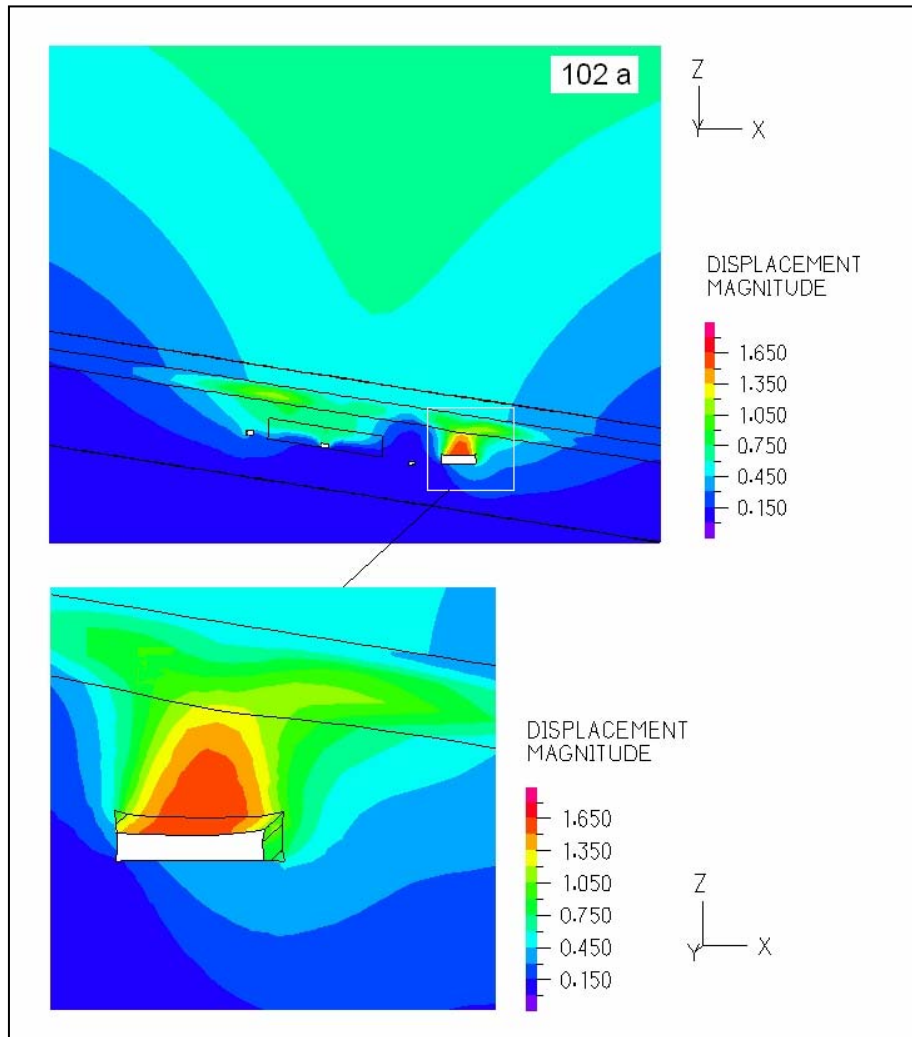


Abb. 12 Entwicklung der Verschiebungen um die Hohlräume nach 100 Jahren.

6.2 Spannungen und Dehnungen

In Abbildungen 13 bis 15 sind jeweils für die Zeitpunkte 50 und 100 Jahre die Normalspannungen entlang der Spuren $\alpha-1$, $\alpha-2$ und β dargestellt. Aus diesen Plots ist zu erkennen, dass die Spannungen zum Zeitpunkt $t = 100$ Jahre sich nur geringfügig von denen nach 50 Jahren unterscheiden.

In Abbildung 16 werden die berechneten minimalen Hauptspannungen nach 50 und 100 Jahren zusammen mit den Frac-Messungen im Pfeiler dargestellt. Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen zeigt eine gute Übereinstimmung. In den Abbildungen 17 und 18 sind zwei Flächenplots der Spannungs- und Dehnungsverteilung im Modell Angersdorf gezeigt.

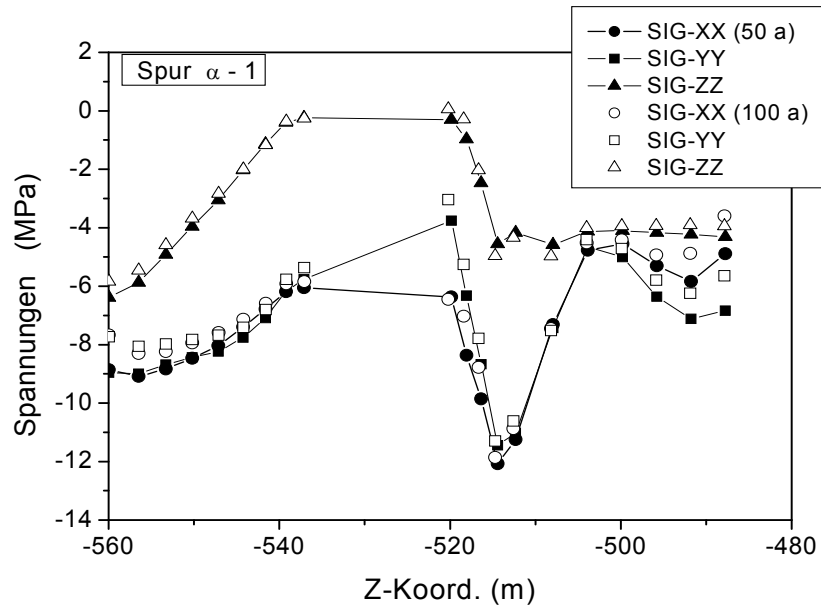


Abb. 13 Berechnete Normalspannungen entlang der Spur $\alpha-1$ 50 und 100 Jahre nach dem Auffahren der Hohlräume.

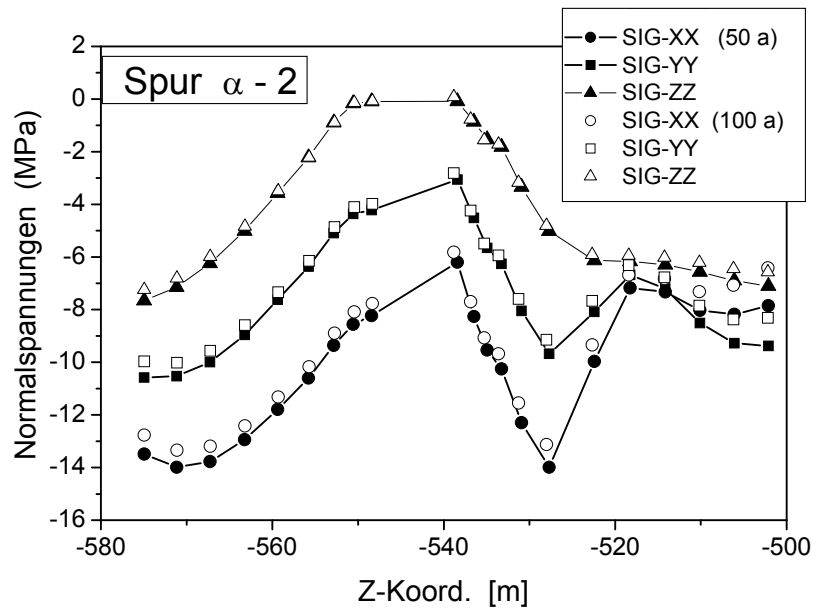


Abb. 14 Berechnete Normalspannungen entlang der Spur $\alpha-2$ 50 und 100 Jahre nach dem Auffahren der Hohlräume.

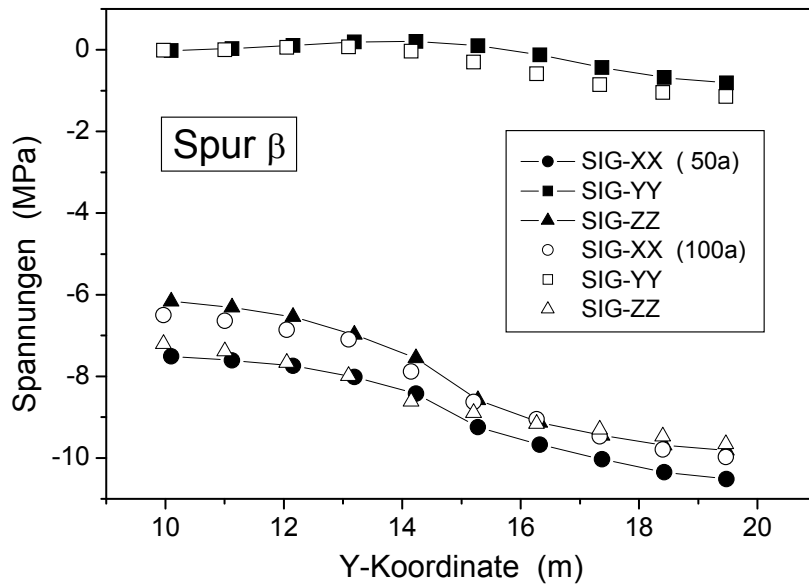


Abb. 15 Berechnete Normalspannungen entlang der Spur β 50 und 100 Jahre nach der Auffahrung der Hohlräume.

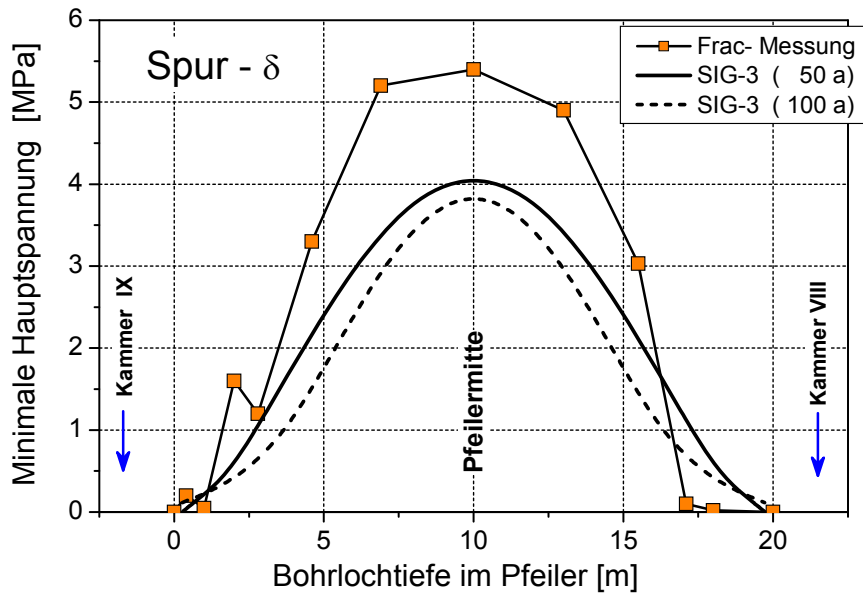


Abb. 16 Vergleich der berechneten minimalen Hauptspannung im Pfeiler bei $t = 50$ Jahre mit in situ Messung. Die Spannungen wurden nur für einen halben Pfeiler berechnet und dann über der Pfeilermitte gespiegelt.

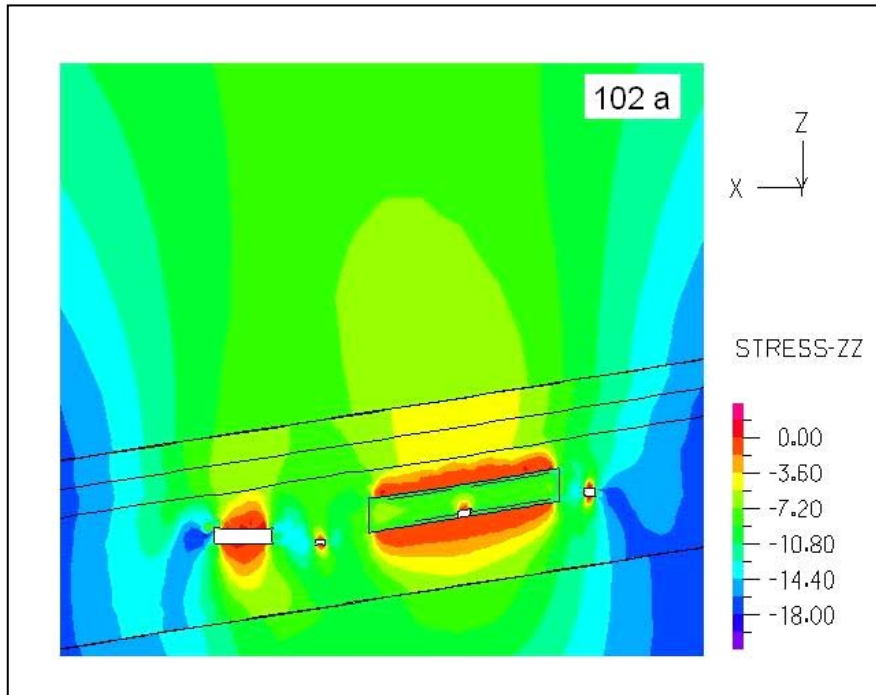


Abb. 17 Berechnete Vertikalspannungen im Nahbereich der Hohlräume nach 102 Jahren.

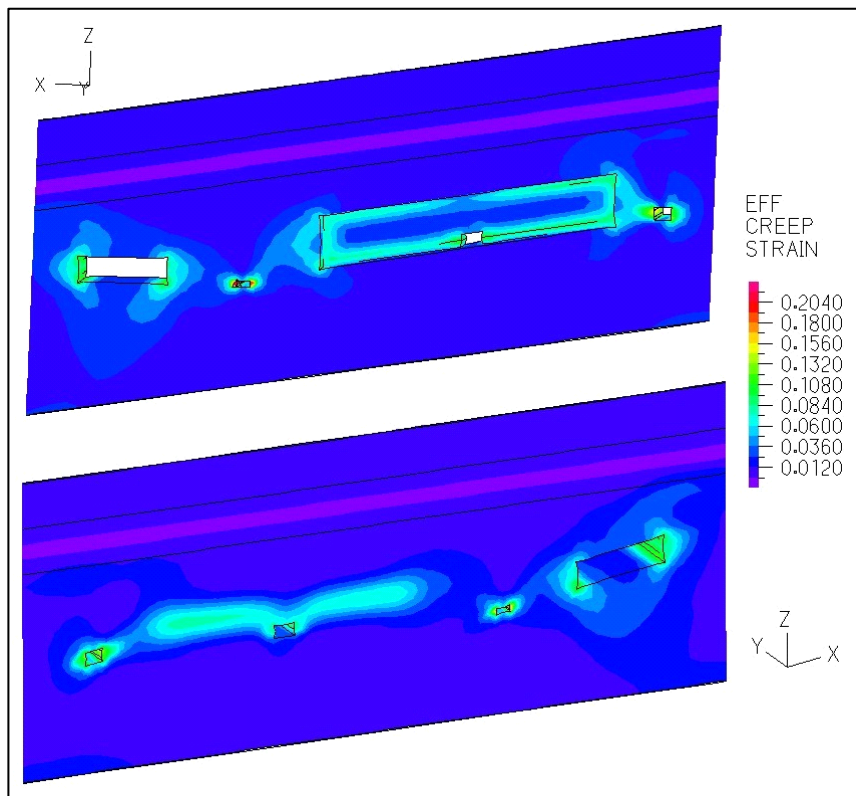


Abb. 18 Berechnete Effektivkriechdehnung im Nahbereich der Hohlräume nach 102 Jahren an der Vorder- und Rückseite des Modells.

6.3 Porosität und Permeabilität

Exemplarisch werden in Abbildung 19 die berechneten Volumendehnungen (Dilatanz) entlang der Spur β (Pfeilerstoß über der Verbindungsstrecke) zu den Zeitpunkten 50 und 100 Jahre nach dem Auffahren der Hohlräume dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass die größten Volumendehnungen nicht direkt im Kammerstoß sondern im Pfeiler auftreten. Volumendehnungen entlang der Spur δ sind in Abbildung 20 dargestellt. In Abbildung 22 sind die Permeabilitäten des aufgelockerten Steinsalzes in dem Pfeiler aus der Porosität mit Hilfe der Beziehung (18) berechnet.

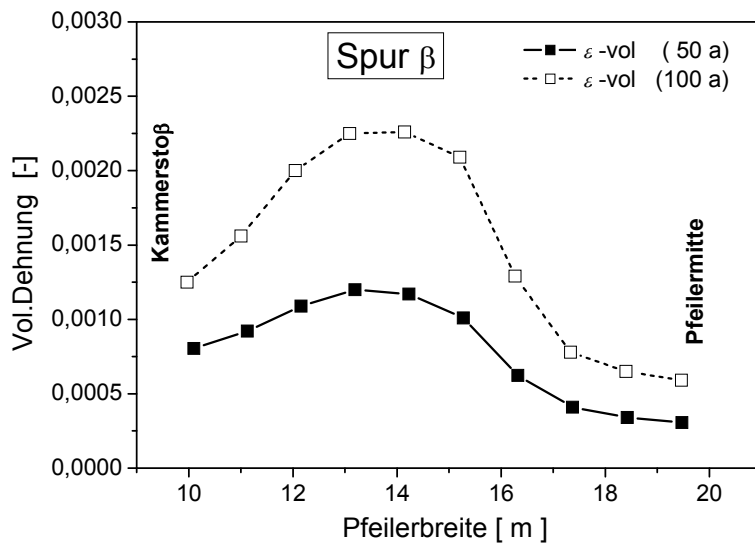


Abb. 19 Entwicklung der Porosität entlang der Spur β .

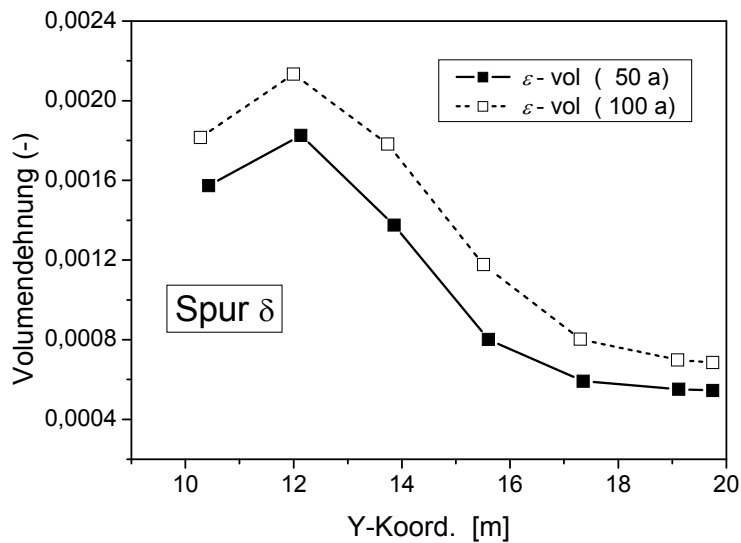


Abb. 20 Entwicklung der Porosität entlang der Spur δ .

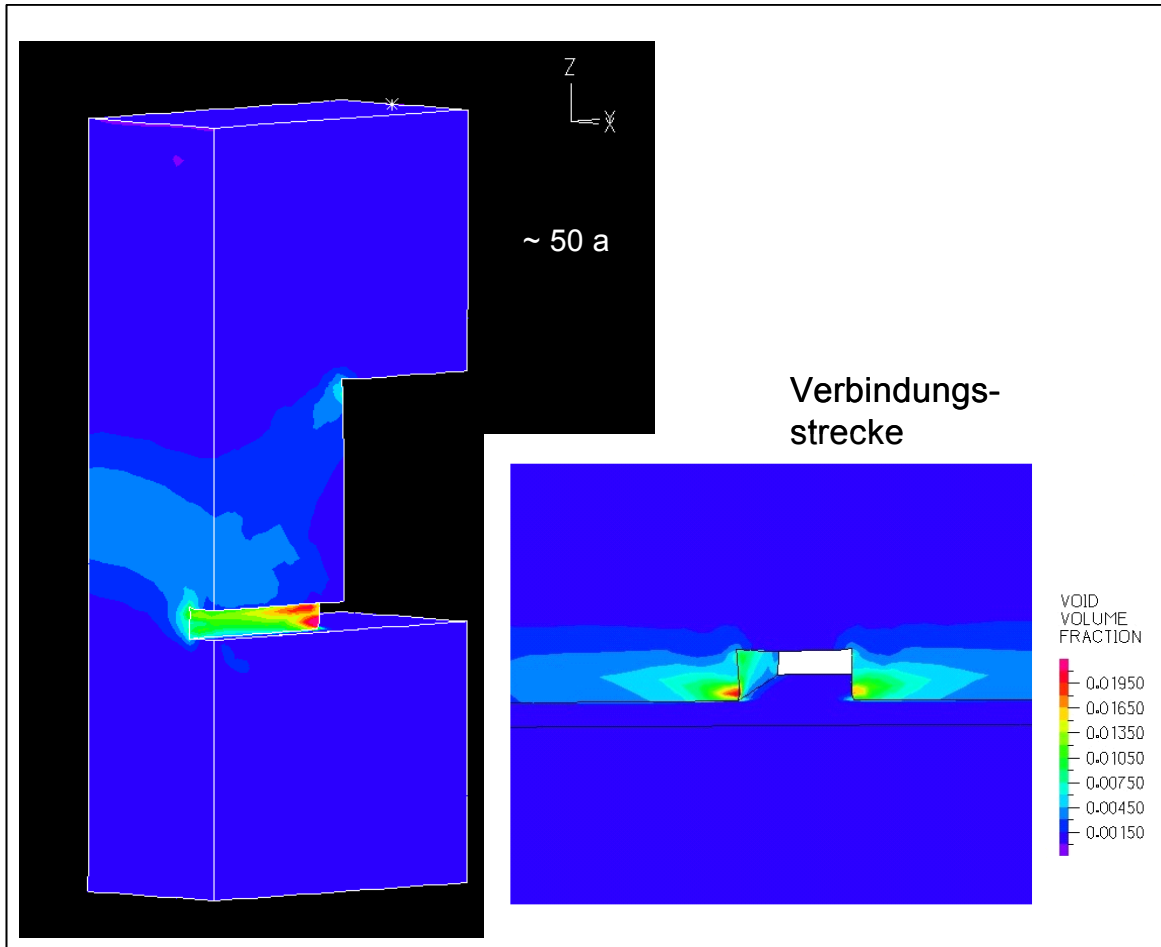


Abb 21 Entwicklung der Porosität (Dilatanz) im Pfeiler im Bereich der Verbindungsstrecke.

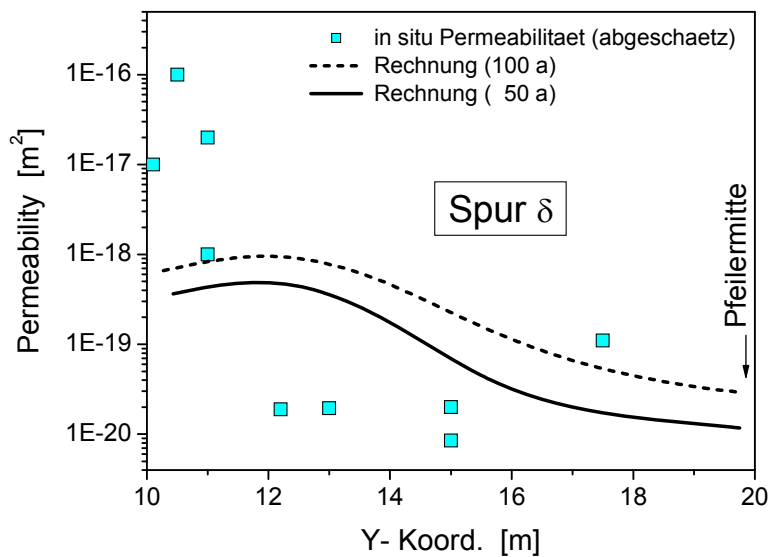


Abb. 22 Berechnete Permeabilität im Pfeiler (Spur δ) im Vergleich mit den in situ Messdaten.

Auf Grund des verwendeten Stoffmodells für das Schädigungsverhalten von Steinsalz (s. auch Gleichung (16)) mit einer konstante Anfangsporosität von $\eta_0 = 0,0002$ wurden die entsprechenden Permeabilitäten in der Pfeilermitte überschätzt.

7 Zusammenfassung

Schwerpunkt des jetzt abgeschlossenen BMBF-Verbundprojekts waren die 3D-Benchmark-Modellrechnungen zu Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung in einem realen, stärker beanspruchten Untertagebauwerk im Steinsalz des Grubenteils Angersdorf. Im Zusammenhang mit der Vorhersage der Schädigung wurde auch die Permeabilitätsentwicklung in aufgelockerten Gesteinsbereichen ermittelt. Zum Vergleich mit den Modellrechnungen wurden im Projekt in-situ Messungen zur Charakterisierung des aktuellen Spannungs- und Auflockerungszustandes (Frac-, Permeabilitätsmessungen) durchgeführt. Außerdem wurde der Stoffgesetzvergleich auf eine Langzeitextrapolation des mechanischen Verhaltens der Untertagestruktur und der Ausdehnung der Auflockerungszone erweitert.

Aus den vorliegenden Ergebnissen des untersuchten Gebirgsausschnittes der Grube Angersdorf ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

Die Ergebnisse der Modellberechnungen zeigen, dass im Abbaukammerbereich von einer langfristigen mechanischen Integrität der Salzbarriere ausgegangen werden kann.

Die Genauigkeit der numerischen Lösung mit dem ADINA Programm hängt von der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung ab. Es scheint, dass der Bereich um die Verbindungsstrecke noch zu grob diskretisiert ist, um die Auflockerungszone genau zu erfassen. Eine feinere Vernetzung ist notwendig, um das eventuelle Versagen der Struktur genauer zu beschreiben.

Für die Prognoserechnungen über größere Zeiträume muss außerdem berücksichtigt werden, dass die angenommenen Randbedingungen für die "Einheitszelle" aufgrund der großräumigen Effekte zu einer unrealistischen Verspannung des gesamten Hohlraum-bereiches führen.

Die erhaltenen Rechenergebnisse zeigen, dass die Entwicklung von Materialmodellen für Steinsalz mit den hier vorgestellten Gleichungen noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden kann. Für die künftigen Arbeiten sind insbesondere die folgenden Probleme noch zu behandeln:

Der Einfluss der Temperaturerhöhung auf das Kriechen, die Dilatanz- und Schädigungsentwicklung.

Die Verheilung von Rissen oder Konsolidation von Auflockerungsbereichen mit Porosität- und Permeabilitätsabnahme.

8 Literatur

- ADINA R & D, Inc., Report ARD 01-9, Watertown, MA, US, www.adina.com , 2008.
- BATHE K.-J. : *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Aufl., Springer, 2002, ISBN 3-540-66806-3.
- CRISTESCU, N. & U. HUNSCHKE: *Time Effects in Rock Mechanics*. Series: Materials, Modelling and Computation, John Wiley& Sons, 342, Chichester, UK, 1998.
- HAMPEL, A. ET AL.: *Die Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen*. – Abschlußbericht (Synthesebericht + Einzelberichte) zum BMBF-Verbundprojekt (FKZ 02C1004-1054), Projektträger Karlsruhe im Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), 2007.
- HEIN, H. J.: *Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat*. Dissertation, RWTH Aachen, 1991.
- HUNSCHKE, U.: *Strength of rock salt at low mean stress*. Geotechnik-Sonderheft, Glückauf, Essen, pp. 160-163, 1993.
- HUNSCHKE, U. & O. SCHULZE: *The Dilatancy Concept – a Basis for the Modelling of coupled T-M-H Processes in Rock Salt*. – In: Impact of the Excavation Disturbed or Damaged Zone (EDZ) on the Performance of Radioactive Waste Geological Repositories, Proceedings of a European Commission Cluster Conference, Luxembourg, 3.-5.11.2003, S. 102-109, ISBN-13: 9789289487948, Office for Official Publications, 2005.
- IFG: *Langzeitsicherheitsnachweis Grube Teutschenthal, Fortschreibung unter besonderer Berücksichtigung eines Sicherheits- und Verwahrungskonzeptes für das Grubenfeld Angersdorf*. Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 16.01. 2006.
- OWEN, D. R. J. & E. HINTON: *Finite elements in plasticity: theory and practice*. Swansea: Pineridge Press, 1980.
- POPP, T.: *Transporteigenschaften von Steinsalz – Modellierung der Permeabilitäts- Porositäts-Beziehung*. Meyniana, Band 54, S. 113-129, Veröffentlichungen des Instituts für Geowissenschaften der Universität Kiel, 2002.

TABELLENVERZEICHNIS

- Tab. 1 *Physikalische Eigenschaften von Steinsalz, verwendet in der ADINA- Analyse.*
- Tab. 2 *Zusammenstellung der Stoffmodelle und Zahlenwerte der verschiedenen nicht-salinaren Gesteinsschichten.*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 1 *Aufriss der Grube Angersdorf mit der Lage des Berechnungsmodells und der geologischen Aufbau des Gebirges (Quelle, IfG-Leipzig).*
- Abb. 2 *Abmessungen des betrachteten Grubenausschnitts und die Geometrie der Abbaukammer und der Strecken. Besonderes Augenmerk wurde zu der Verbindungsstrecke zwischen zwei benachbarten Abbaukammern (Bild rechts) gewidmet.*
- Abb. 3 *Seitenansicht des gesamten FE-Modells des Grubenausschnitts Angersdorf (links) und dem Bereich der Hohlräumen (rechts).*
- Abb. 4 *Berechnung des Anfangsspannungszustandes im Modell Angersdorf vor Auffahrung der Hohlräume; hier sind die drei Normalspannungen (σ_{xx} , σ_{yy} und σ_{zz}) dargestellt.*
- Abb. 5 *Berechnete Verteilung der Vertikalverschiebung und der min. Hauptspannung nach ca 3000 Jahren Kriechverformung.*
- Abb. 6 *Ausgabepunkte und Spuren im Modell Angersdorf zur Darstellung und zum Vergleich der Rechenergebnisse aus den 3D Simulationsrechnungen. Der Punkt a befindet sich an Tagesoberfläche über der Abbaukammermitte.*
- Abb. 7 *Vergleich der berechnete mit gemessenen Verschiebungen des Punkts a und des Vermessungspunkts P1025 an der Tagesoberfläche.*
- Abb. 8 *Berechnete Verschiebungen der Punkten a - h dargestellt. Die maximale Verschiebung wurde an Punkt g (Firstmitte des streichenden Abbaus) ermittelt.*
- Abb. 9 *Berechnete Verschiebungen der Punkten c-1, c-2 und e.*
- Abb. 10 *Berechnete Horizontalverschiebungen entlang der Spur α -1 und α -2 nach 50 und 100 Jahren.*

- Abb. 11 Berechnete Horizontalverschiebungen entlang der Spur δ nach 50 und 100 Jahren.*
- Abb. 12 Entwicklung der Verschiebungen um die Hohlräumen nach 100 Jahren.*
- Abb. 13 Berechnete Normalspannungen entlang der Spur $\alpha - 1$ 50 und 100 Jahre nach dem Auffahren der Hohlräume.*
- Abb. 14 Berechnete Normalspannungen entlang der Spur $\alpha - 2$ 50 und 100 Jahre nach dem Auffahren der Hohlräume.*
- Abb. 15 Berechnete Normalspannungen entlang der Spur β 50 und 100 Jahre nach der Auffahrung der Hohlräume.*
- Abb. 16 Vergleich der berechnete minimale Hauptspannung in Pfeiler bei $t = 50$ Jahre mit in situ Messung. Die Spannungen wurden nur für einen halben Pfeiler und dann über der Pfeilermite gespiegelt.*
- Abb. 17 Berechnete Vertikalspannungen im Nahbereich der Hohlräume nach 102 Jahren.*
- Abb. 18 Berechnete Effektivkriechdehnung im Nahbereich der Hohlräume nach 102 Jahren in Vordere - und Ruckseite des Modells.*
- Abb. 19 Entwicklung der Porosität entlang der Spur β .*
- Abb. 20 Entwicklung der Porosität entlang der Spur δ .*
- Abb. 21 Entwicklung der Porosität (Dilatanz) im Pfeiler im Bereich der Verbindungsstrecke.*
- Abb. 22 Berechnete Permeabilität im Pfeiler (Spur δ) im Vergleich mit den in situ Messdaten.*

