



---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 7314

**BMBF-Verbundvorhaben**

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

**A. Pudewills**

**Institut für Nukleare Entsorgung**

**Juni 2007**



**Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7314

**BMBF-Verbundvorhaben**

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

**Abschlußbericht zu Teilvorhaben 6  
(02C1054)**

**Alexandra Pudewills**

**Institut für Nukleare Entsorgung**

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2007

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-073146

## **Kurzfassung**

Im Rahmen des BMBF Verbundvorhabensprojekts „Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ wurden die von den beteiligten Arbeitsgruppen entwickelten Stoffgesetze für das mechanische Verhalten von Steinsalz mit Hilfe von Modellrechnungen miteinander verglichen. Es wurden die Phänomene Kriechen, Dilatanz, Schädigung, Bruch, Nachbruchverhalten und Verheilung berücksichtigt. Die Rechenergebnisse wurden außerdem mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen im Labor und unter Tage verglichen. Abschließend sollen Empfehlungen für die Anwendung der Stoffgesetze in der Praxis abgeleitet werden.

Am Institut für Nukleare Entsorgung (INE) werden die Finite Element (FE) Programme MAUS und ADINA zur Untersuchung des Steinsalzverhaltens unter Endlagerbedingungen eingesetzt. In den letzten Jahren wurde ein neues viskoplastisches Materialmodell zur Beschreibung der Dilatanz und Schädigung von Steinsalz entwickelt und in beiden FE-Programmen implementiert. Im Rahmen dieses Projekts wurden die Materialkennwerte an verschiedene Laborversuche angepasst. Mit diesem Stoffmodell wurde dann die Langzeitentwicklung der Auflockerungszone in der Umgebung eines Tunnels auf die 700 m-Sohle eines Salzbergwerks modelliert. Der Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen wird dargestellt. In einem nächsten Schritt wurde eine fiktive Kammer-Pfeiler-Geometrie in verschiedenen Gebirgstufen numerisch untersucht.

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

# **BMBF joint research project: Modelling of the mechanical behaviour of rock salt: Comparison of advanced constitutive models and modelling procedures**

Final report of the project partner 6

## **Abstract**

Within the framework of the BMBF - joint research project „Modeling of the mechanical behavior of rock salt: Comparison of the several constitutive models and methods“, the newly developed constitutive models by different groups have been evaluated and compared in the benchmark like calculations. The attention focuses on the description of the processes which cause transient creep including recovery, steady-state creep, dilatancy and propagation of damage, failure, and post-failure strength. The calculation results have been compared with laboratory results and in situ measurements. Finally, general recommendations for the use of the presented constitutive model in the practice will be given.

At the Institut für Nukleare Entsorgung (INE), Forschungszentrum Karlsruhe (FZK) the Finite Element Codes MAUS and ADINA are used to study the mechanical behavior of rock salt under repository conditions. Recently, a new viscoplastic constitutive model for rock salt that can describe the volumetric strain and the damage of the rock has been proposed and implemented in these codes. The model parameters have been evaluated on various laboratory experiments. Additionally, the long-term evolution of the "excavation disturbed zone" (EDZ) around a gallery in a salt mine at about 700m below the surface was analyzed and the numerical results were compared with in situ measurements. In the next step a hypothetical room-pillar-geometry located in rock salt at different levels below the surface was analyzed.

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 six project partners will be presented in a separate synthesis report elaborated by the project leaders.

## INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
<b>1. Einleitung</b>	1
<b>2. Stoffmodelle von Steinsalz</b>	2
2.1 <i>Das elastische Materialverhalten</i>	2
2.2 <i>Das viskoplastische Materialverhalten</i>	3
2.3 <i>Beschreibung der Dilatanz von Steinsalz</i>	5
2.4 <i>Bruchkriterien und Dilatanzgrenze</i>	6
<b>3. Simulation von Kriechversuchen und Parameterbestimmung</b>	7
3.1 <i>Kriechversuche an Asse Salz</i>	7
3.2 <i>Kriechversuche an Salz aus Sondershausen</i>	15
<b>4. Simulation von Festigkeitsversuchen</b>	17
4.1 <i>Versuche ohne Reibung zwischen Druckstempel und Probe</i>	18
4.2 <i>Versuche mit totaler Reibung zwischen Druckstempel und Probe</i>	23
<b>5. Modellierung der EU-1 Strecke im Bergwerk Sondershausen</b>	26
5.1 <i>Modellbeschreibung</i>	27
5.2 <i>Rechenergebnisse und Vergleich mit der Messung</i>	29
<b>6. Untersuchung einer Kammer-Pfeiler-Struktur</b>	33
6.1 <i>Modellbeschreibung</i>	34
6.2 <i>Rechenergebnisse und Diskussion</i>	34
<b>7. Zusammenfassung</b>	41
<b>Literatur</b>	42

---

## TABELLENVERZEICHNIS

	Seite
<i>Tab. 1: Stoffparameter zur Berechnung der Langzeitkriechversuche an Asse-Steinsalz</i>	10
<i>Tab. 2: Stoffparametern für die Berechnung von Kriechversuchen mit Lastwechsel (Asse Steinsalz)</i>	15
<i>Tab. 3: Stoffparameter für die Berechnung von Kriechversuchen an Steinsalz aus Sondershausen</i>	17
<i>Tab.4: Stoffparametern für die Berechnung von Festigkeitsversuche</i>	18
<i>Tab. 5: Materialkennwerte für die numerische Simulation der EU 1 Strecke</i>	28



## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

	Seite
<i>Abb. 1: Simulation des Langzeitkriechversuchs 04141 und Vergleich mit den Messergebnissen von weiteren Versuchen an gleicher Salzart und Randbedingungen</i>	8
<i>Abb. 2: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten</i>	8
<i>Abb. 3: Simulation der Langzeitkriechversuche 95006 und 95015 und Vergleich mit den Messergebnissen von weiteren Versuchen an gleicher Salzart und <math>\Delta\sigma = 14</math> MPa</i>	9
<i>Abb. 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten</i>	9
<i>Abb. 5: Belastung des Versuchskörpers bei dem Kurzzeitversuch 94097</i>	10
<i>Abb. 6: Simulation des transienten Kriechversuchs 94097 und Vergleich mit den Messergebnissen</i>	11
<i>Abb. 7: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten</i>	11
<i>Abb. 8: Nachrechnung der Kriechversuche (04137, 04319), bei denen die Belastung von 14 auf 16 MPa nach ca. 150 Tagen erhöht wurde</i>	12
<i>Abb. 9: Vergleich der gemessenen und der berechneten Verformungsraten</i>	13
<i>Abb. 10: Belastung der Salzprobe im Versuch 04138</i>	13
<i>Abb. 11: Nachrechnung des Kriechversuchs (04138), bei dem die Belastung mehrmals erhöht und gesenkt wurde. Die Rechnungen wurden mit zwei Parametersätzen durchgeführt.</i>	14
<i>Abb. 12: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten</i>	14
<i>Abb. 13: Nachrechnung der IfG - Kriechversuche an Salz aus Sondershausen; bei diesen Versuchen wurde der Manteldruck sukzessiv um ein MPa erhöht</i>	16
<i>Abb. 14: Zeitliche Entwicklung der gemessenen und berechneten Kriechraten</i>	16
<i>Abb. 15: Simulation der Festigkeitsversuche bei verschiedenen Manteldrücken und Vergleich mit den Messergebnissen</i>	19
<i>Abb. 16: Vergleich der gemessenen und berechneten volumetrischen Verformungen für verschiedenen Manteldrücke</i>	19
<i>Abb. 17: Vergleich der gemessenen und berechneten Entwicklung der Differentialspannungen als Funktion der Axialdehnung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.</i>	21
<i>Abb. 18: Vergleich der berechneten und gemessenen Entwicklung der Volumendehnungen als Funktion der Axialverformung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.</i>	21

---

Abb. 19:	<i>Vergleich der gemessenen und berechneten Entwicklung der Differentialspannungen als Funktion der Axialdehnung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.</i>	22
Abb. 20:	<i>Vergleich der berechneten und gemessenen Entwicklung der Volumendehnungen als Funktion der Axialverformung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.</i>	22
Abb. 21:	<i>Geometrie der Versuchsprobe, die Randbedingungen und das 2D FE-Modell für die Berechnung der Versuche 4131 und 4132.</i>	23
Abb. 22:	<i>Verformung der Salzproben sowie die vertikale Änderung des Proben-durchmessers für die Festigkeitsversuche 4131 und 4132.</i>	24
Abb. 23:	<i>Vertikaler Verlauf der Volumendehnung und Effektivspannung entlang der Symmetrieachse am Ende der Probenbelastung.</i>	24
Abb. 24:	<i>Verteilung der Effektivspannung, Effektivdehnung und Dilatanz in der Probe (Versuch 4131 mit einem Manteldruck von 1 MPa).</i>	25
Abb. 25:	<i>Verteilung der Effektivspannung, Effektivdehnung und Dilatanz in der Probe (Versuch 4132 mit einem Manteldruck von 2 MPa).</i>	25
Abb. 26:	<i>Lage des Versuchsfeldes mit dem Messquerschnitt in der Strecke EU1 der Grube Sondershausen.</i>	26
Abb. 27:	<i>Vereinfachte Darstellung der Untergrundstrecke EU1 und Modellbildung</i>	27
Abb. 28:	<i>Modellgeometrie, Randbedingungen und das Finite Element- Netz</i>	28
Abb. 29:	<i>Entwicklung der Vertikalverschiebung an verschiedenen Positionen in der Umgebung der Strecke.</i>	29
Abb. 30:	<i>Horizontalverschiebung an den Punkten <b>d</b> und <b>e</b> und Vergleich mit den Ergebnissen aus einer einfachen axialsymmetrischen Modellierung der EU1 Strecke der Grube Sondershausen.</i>	29
Abb. 31:	<i>Entwicklung der Vertikal- und Horizontalspannungen an zwei Positionen, <b>d</b> und <b>e</b>.</i>	30
Abb. 32:	<i>Minimale Hautspannung nach einem Jahr und 35 Jahren im Vergleich mit der Messung an drei Positionen.</i>	30
Abb. 33:	<i>Entwicklung der Volumendehnung in der Umgebung der Strecke.</i>	30
Abb. 34:	<i>Berechnete Salzpermeabilität mit zwei unterschiedlichen Beziehungen im Vergleich mit der Messung.</i>	30
Abb. 35:	<i>Entwicklung der Effektivspannungen in der Umgebung der Strecke nach einem und nach 35 Jahren der Streckenerstellung.</i>	31
Abb. 36:	<i>Verteilung der minimalen Hauptspannung in der Umgebung der Streckenkontur nach einem und nach 35 Jahren der Streckenerstellung.</i>	31
Abb. 37:	<i>Verteilung der Volumendehnung in der Umgebung der Streckenkontur nach einem und nach 35 Jahren der Streckenerstellung.</i>	32

Abb. 38:	<i>Modellgeometrie, Randbedingungen und das Finite Element- Netz; Die Punkte <b>a</b> bis <b>f</b> stellen die Lagen für die Ergebnisauswertung dar.</i>	33
Abb. 39:	<i>Entwicklung der Vertikalverschiebungen an Aufpunkten <b>a-f</b> und die Horizontalverschiebung des Streckenstoß (Punkt c).</i>	35
Abb. 40:	<i>Verformte FE-Netz (rot) nach 50 und 100 Jahren und die unverformte Struktur (schwarz), der Vergrößerungsfaktor der Verformungen ist eins.</i>	35
Abb. 41:	<i>Entwicklung der Effektivdehnungen im Pfeilerbereich (Lastfall 1, 7 MPa Auflast)</i>	36
Abb. 42:	<i>Entwicklung der Volumenverzerrung im Nahbereich der Strecke</i>	36
Abb. 43:	<i>Verlauf der Volumendehnung für verschiedenen Zeitpunkte entlang des Horizontalschnitt <b>g-c</b></i>	37
Abb. 44:	<i>Verlauf der Horizontalspannung zu verschiedene Zeitpunkte entlang des horizontalen Schnitts <b>g-c</b></i>	38
Abb. 45:	<i>Verlauf der Vertikalspannung zu verschiedene Zeitpunkte entlang des horizontalen Schnitts <b>g-c</b></i>	38
Abb. 46:	<i>Entwicklung der Effektivspannung in der Umgebung der Streckenkontur (Simulation mit der Auflast von 7 MPa)</i>	39
Abb. 47	<i>Entwicklung der mittleren Spannung in der Umgebung der Streckenkontur (Simulation mit der Auflast von 7 MPa)</i>	39



---

# 1. Einleitung

Die zunehmende Bedeutung, die Steinsalzformationen bei der Speicherung von Erdöl und Erdgas sowie als Untertagedeponien für Industrieabfallprodukte oder radioaktive Abfallstoffe gewonnen haben, erfordert eine detaillierte Untersuchung des Materialverhaltens von Salzgesteinen. Starke Gebirgskonvergenzen machen bei derartigen Bauwerken (Hohlräumen) eine Standsicherheitsanalyse zwingend erforderlich. Dazu bedarf es eines realistischen Materialmodells zur grundsätzlichen Beschreibung des Verhaltens von Steinsalz unter verschiedenen Einflüssen und numerische Berechnungsmethoden (z. B. Finite-Element Methode oder das Differenzenverfahren).

In den vergangenen Jahrzehnten wurde von verschiedenen Arbeitsgruppen ein umfangreicher experimenteller und theoretischer Kenntnisstand 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 des BMBF Verbundvorhabensprojekts „Modellierung des mechanischen Verhaltens von Steinsalz: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen“ sollen die von den beteiligten Projektpartnern entwickelten Stoffgesetze für das mechanische Verhalten von Steinsalz mit Hilfe von Modellrechnungen miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse sollen außerdem mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen im Labor und unter Tage verglichen werden. Abschließend sollen Empfehlungen für die Anwendung der Stoffgesetze in der Praxis abgeleitet werden.

Der vorliegende Bericht ist als Beitrag des Teilnehmers **Institut für Nukleare Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe** (INE/FZK) zu dem Verbundvorhaben gedacht. Der erste Teil dieses Berichts widmet sich der Darstellung der im INE vorhandenen Stoffmodelle von Steinsalz und numerischen Rechenprogrammen. Durch die Simulation bzw. Nachrechnung von Laborversuchen (Kriech- und Festigkeitsversuchen) wurden die Stoffmodelle angepasst und die Parameter bestimmt. Weiterhin werden die notwendigen Erweiterungen der verwendeten Stoffgleichungen diskutiert.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird auf die Anwendung der Rechenprogramme und Stoffmodelle zur Untersuchung von komplexen Untertagestrukturen eingegangen. Zuerst wurden Modellrechnungen zum Konvergenzverhalten der Maschinenstrecke EU-1 im Sondershausen Bergwerk durchgeführt. Neben der Diskussion von erhaltenen Rechenergebnissen wurde auch ein Vergleich mit verfügbaren Messergebnissen dargestellt. Darüber hinaus werden detaillierte Erläuterungen über den Einfluss der Datenunsicherheit ausgewählter Stoffkenngrößen auf die Rechenergebnisse angegeben. In nächsten Kapitel wird eine fiktive Kammer-Pfeiler-Geometrie in verschiedenen Gebirgstufen untersucht. Bedingt durch die gewählte ungünstige Geometrie sowie die Belastung des Modells sind große Verschiebungen und Verformung in dem Pfeiler aufgetreten, die zur speziellen Behandlung des Problems führten. Abschließend werden im letzten Kapitel eine zusammenfassende Bewertung der vorhandenen Materialmodelle sowie die Anregungen für weiterführende Entwicklungsarbeiten beschrieben.

---

## 2. Stoffmodelle von Steinsalz

In diesem Kapitel werden die Grundgleichungen der im INE verwendeten Stoffmodelle zur Behandlung von verschiedenen Aufgaben bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in Salzformationen kurz vorgestellt. Die notwendigen Erweiterungen der Materialmodelle zur Simulation von volumetrischem Verformungsverhalten (Dilatanz) von Steinsalz werden anschließend beschrieben. Über Nachrechnung von Kriech- und Festigkeitsversuchen werden die nötigen Parameter ermittelt.

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. Für die numerische Beschreibung stehen zur Zeit eine Vielzahl von Kriechgesetzen bereit [1], [2], [3] und sie wurden in den vergangenen Jahrzehnten zur Modellierung von verschiedenen thermomechanischen Problemstellungen in Salzformationen mit Erfolg verwendet. 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 soll im Rahmen des Verbundvorhabens erstmals getestet und angepasst werden.

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,  $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ :

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

### 2.1 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

$\nu$  Querkontraktionszahl

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

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

$\dot{T}$  Temperaturrate

$\alpha$  linearer Wärmeausdehnungskoeffizient.

Die thermoelastischen Stoffeigenschaften von Steinsalz wurden als zeitunabhängig vorausgesetzt.

## 2.2 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 [4]. 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:

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

$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$	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)

$\Phi$  ist eine skalare Funktion definiert wie folgt:

$$\Phi(F) = (F - F_0)^m \quad (5)$$

mit

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

Der Viskositätsparameter  $\gamma$  ist definiert als

$$\gamma = e_1 \cdot \exp(-e_2 / T) \quad (6)$$

$e_1$  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, es werden getrennte Stoffgleichungen für das sekundäre und das transiente Kriechen verwendet.

**Das sekundäre Kriechen** von Steinsalz wird von einem häufig verwendeten Norton-Ansatz definiert [1] wobei die Temperaturabhängigkeit des Kriechverhaltens durch die Arrheniusfunktion ausgedrückt werden kann:

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

A	Fließfaktor, $A = 2.085 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$
n	Spannungsexponent, $n = 5$
Qc	Aktivierungsenergie, $Q_c = 54.21 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$
R	Allgemeine Gaskonstante, $R = 8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
T	Absolute Temperatur in [K]

Die angegebenen Zahlenwerte für den Fließfaktor A und die Aktivierungsenergie Qc 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  $F_0^s$  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  $J_2$  die zweite Invariante des Spannungstensors ist.

**Das transiente Kriechen** von Steinsalz wurde im Rahmen dieses Projekt 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  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  sind Materialparameter.

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



### 2.3 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 [4] entwickelten Stoffmodell für Salzgrus.

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

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

Die Temperaturabhängigkeit wird mit einer Arrheniusfunktion analog zur Gleichung (7) beschrieben und  $m$  stellt ein Materialkennwert dar. 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 ( $\epsilon_{vol} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$ )

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

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

mit

$c_1, c_2, c_3$	Materialparameter
$\eta_0$	Anfangsporosität von Steinsalz, $\eta_0 = 0.0002$

Die Werte dieser Parameter wurden an Laborversuchen im dilatant belasteten Steinsalz ermittelt. Mit Hilfe eines vorläufigen Potenzansatzes [6] wird die Permeabilität  $k$  des Steinsalzes aus der Dilatanz abgeleitet:

$$k = B \cdot (\epsilon_{\text{vol}})^C \quad (18)$$

B, C Materialparameter

## 2.4 Bruchkriterien und Dilatanzgrenze

Darüber hinaus beinhaltet das vorgestellten Stoffmodell separate Ansätze zur Bewertung der Schädigung, Dilatanz und des Versagens von Steinsalz nach Hunsche et al. [7].

- **Festigkeitskriterium:**  $\tau_{\text{F,eff}} = 2.612 (\sigma_{\text{m}})^{0.78}$  (19)

$\tau_{\text{F,eff}}$  Effektive Scherspannung beim Bruch  
 $\sigma_{\text{m}}$  Mittlere Normalspannung

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

Die Versagensgrenze von Steinsalz unter Zugbelastung wird erreicht wenn die maximale Hauptspannung ( $\sigma_{\text{p,max}}$ ) die kritische Zugspannung ( $\sigma_{\text{z,krit}}$ ) überschritten wird. Dieses Versagen aufgrund zu hoher Zugbelastung kann auch dann auftreten, wenn die Festigkeitsgrenze nach Gleichung (19) nicht überschritten wird.

- **Dilatanzkriterium:**  $\tau_{\text{D,eff}} = 0.899 \sigma_{\text{m}} - 0.0167 \sigma_{\text{m}}^2$  (20)

Diese Formulierung wurde von Cristescu und Hunsche [8] ausführlich beschrieben und basiert 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,  $\tau_{\text{D,eff}}$  kann die Dilatanz des Materials eintreten. In den letzten Jahren wurden mehrere Formulierungen an die Meßdaten angepasst, die den Bereich von niedrigen Spannungen besser beschreiben. Neuerdings wird das Festigkeitskriterium, (Gleichung 19) als Dilatanzkriterium verwendet. (siehe Teilbericht 1, Förderkennzeichen: 02C1004). Aufgrund dieser unklaren Definition der Dilatanzgrenze wird bei den weiteren Modellrechnungen zu Laborversuchen, bei denen die Volumenverzerrung gemessen wurde, die Dilatanzgrenze gleich Null gesetzt.

Das in diesem Kapitel beschriebene Stoffmodell ist sowohl im Rechenprogramm MAUS [9] als auch in dem kommerziellen Programmsystem ADINA [10] implementiert. In Rahmen der F&E Arbeiten zur Modellierung der thermomechanischen Phänomene in einem Endlager für radioaktive Abfälle in Salzformationen wurden bereits Teile dieses Stoffgesetzes getestet und dann zur Untersuchung von verschiedenen Aufgabenstellungen verwendet [11], [12].

In diesem Bericht wurden schwerpunktmäßig das transiente Kriechen und das volumetrische Verformungsverhalten von Steinsalz untersucht.

---

### 3. Simulation von Kriechversuchen und Parameterbestimmung

Allgemein alle Steinsalzgesteine reagieren auf Belastungen stark zeitabhängig. Nach genügend langer Zeit und bei bereits geringen deviatorischen Last treten irreversiblen Verformungen ohne Schädigung des Materials auf. Die Messergebnissen von zahlreichen Kriechversuchen lassen sich in allgemeine wie folgt charakterisieren: Zur Beginn des Versuchs wird eine Verfestigung des Material beobachtet bei einer ständig abnehmende Dehnungsrate und gefolgt durch eine Gleichgewichtphase in der die Verzerrungsrate näherungsweise konstant bleibt. Bei relativ hoher Belastung des Versuchskörpers wird in der Regel der Gleichgewichtphase überhaupt nicht erreicht. Der Einfluss verschiedener Temperaturen oder der Feuchte auf die Kriecheigenschaften von Steinsalz wurden im Rahmen des Projekts jedoch nicht untersucht.

Die Formulierung von Stoffgleichungen in Kap. 2 unterhalb der Dilatanzgrenze soll zur Simulation der in Labor beobachteten Phänomene verwendet und gegebenen Fall angepasst werden. Zunächst sind Langzeitversuchen an Asse Steinsalz bei konstanten Spannungen zu modellieren. Weiterhin werden Kurzzeitversuchen bei sehr hohen Belastung oder bei den die Belastung während des Versuchsablaufs erhöht wurde.

#### 3.1 Kriechversuche an Asse Salz

Die Langzeitkriechversuche 04141, 04142 und 04143 wurden bei einer Belastung von 11MPa und Raumtemperatur von 27°C über einen Zeitraum von 400 Tagen durchgeführt. Trotz gleichen Versuchsbedingungen die Messergebnisse unterscheiden sich deutlich unter einander (siehe Abb. 1 und 2). Weiterhin wenn man auch die Versuchsserie 95006, 95015 und 95010 bei 14 MPa (Abb. 3 und 4) betrachtet wird man den selbes Effekt bemerken. Diese Tatsache führt zu einer besonders schwierigen Situation bei der Anpassung der Stoffparameter. Demnächst wurde für das weitere Vorgehen bei der Parameterbestimmung nur die Kriechversuche die etwa der Mittelwert von den anderen zwei repräsentiert d H. die Versuche 04142 und 95015. Der Versuch 95006 stellt jedoch in etwa den Mittelwert von weiteren zwei Versuchen (93212 und 94141) dar und wurde deshalb auch für einen neuen Satz von Parametern in Betracht gezogen.

Die numerische Simulation diesen Kriechversuche wurde mit dem Programm ADINA unter Berücksichtigung eines axialsymmetrischen Modells durchgeführt. Die Bestimmung aller Parameter aus Gleichung (9) stand jedoch zu wenigen Daten zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde die Spannungsexponent und die Temperaturabhängigkeit der Verzerrungsrate analog zur stationären Viskoplastizität (siehe auch Gl. 7) gewählt. Die Stoffparameter  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  wurden iterativ nach Vorgaben von Startwerten ermittelt. In Abb. 1 wird die Gegenüberstellung der gerechneten Verformungen mit den gemessenen Daten dargestellt. Ein Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten über der Versuchszeit wird in Abb. 2 gezeigt. Von diesen Kurven ist es deutlich sichtbar nach der Belastung der Salzprobe die steile Anfangsverfestigung der Probe charakterisiert auch durch höhere Verformungsraten

und eine stetige Abnahme nach bis ca. 260 Tagen. Die ermittelten Stoffkennwerte sind in Tab. 1 angegeben.

Mit diesen Parametern wurden dann die Kriechversuchen 95015 und 95006 nachgerechnet. In Anbetracht der großen Streuweite der Messergebnisse wurden geringen Änderungen der Kennwerte  $a_1$  und  $a_2$  notwendig, um eine gute Übereinstimmung mit den Messungen zu erreichen. In Tab.1 sind die ermittelten Modellparameter zusammen mit den berechneten Mittelwerten aus allen Versuchen aufgelistet. Abbildung 4 stellt einen Vergleich der berechneten und gemessenen Verformungsraten dar. Die Güte der Anpassung der Parameter wird aus diesem Bild ersichtlich. Die ermittelten Parameter sind zur Beschreibung des Kriechverhaltens bei relativ niedrigen Belastungen gut geeignet.

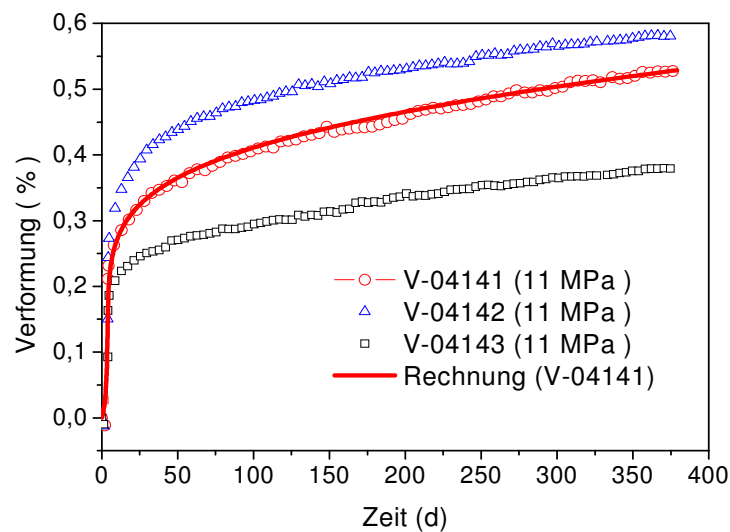


Abb. 1: Simulation des Langzeitkriechversuchs 04141 und Vergleich mit den Messergebnissen von weiteren Versuchen an gleicher Salzart und Randbedingungen

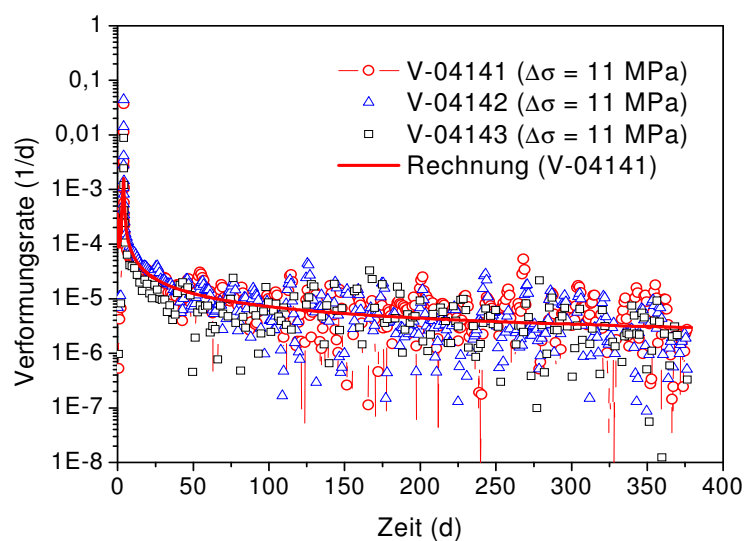


Abb. 2: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten

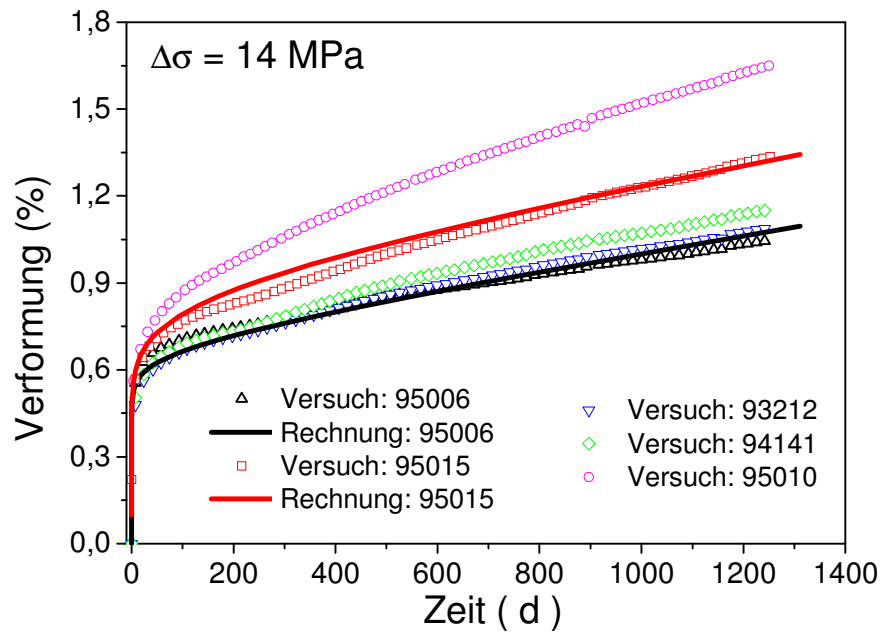


Abb. 3: Simulation der Langzeitkriechversuche 95006 und 95015 und Vergleich mit den Messergebnissen von weiteren Versuchen an gleicher Salzart und  $\Delta\sigma = 14 \text{ MPa}$

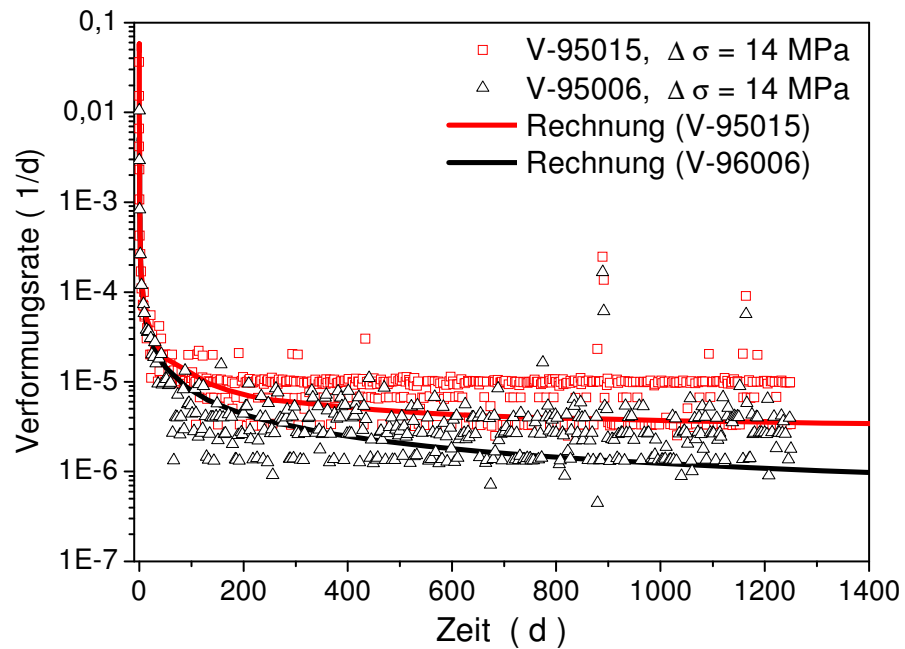


Abb. 4: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten

Versuch	Laufzeit/d	$\Delta\sigma$	n	Q/RT	$a_0$	$a_1$	$a_2$
04142	370	11	5	6495	0.018	1600	0.120
95015	1250	14.1	5	6495	0.018	1750	0.110
95006							
93212	1250	14	5	6495	0.018	1750	0.08
94141							
<b>Mittelw.</b>			<b>5</b>	<b>6495</b>	<b>0.018</b>	<b>1700</b>	<b>~0.1</b>

Tab. 1: Stoffparameter zur Berechnung der Langzeitkriechversuche an Asse-Steinsalz

Im nächsten Berechnungsschritt werden die Stoffparameter an Kriechversuchen, bei denen die Belastung der Salzproben einmal oder mehrmals erhöht wurde, untersucht. Es sind zum Teil einzelne Kriechversuche an Steinsalz aus dem Asse- oder dem Sondershausen Bergwerk. Die Laborversuche an Asse-Steinsalz wurden mit konstantem Manteldruck von 25 bzw. 20 MPa und verschiedenen Differentialspannungen ( $\Delta\sigma$ ) sowie unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Dadurch wird die Bestimmung eines einheitlichen Parametersatzes besonders schwierig. Die Versuchsbedingungen sind in Tab. 2 zusammen mit den ermittelten Modellparametern angegeben.

In Abb. 5 ist die Belastungsgeschichte der Versuchsprobe 94097 dargestellt. Der Kriechversuch 94097 wurde nachgerechnet mit den Kennwerten, die bereits an den Kurzzeitversuch 95008 angepasst waren. Mit einer geringen Variation der Parameter  $a_1$  und  $a_2$  wurde eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messdaten und der Rechnung erreicht (Abb. 6 und 7).

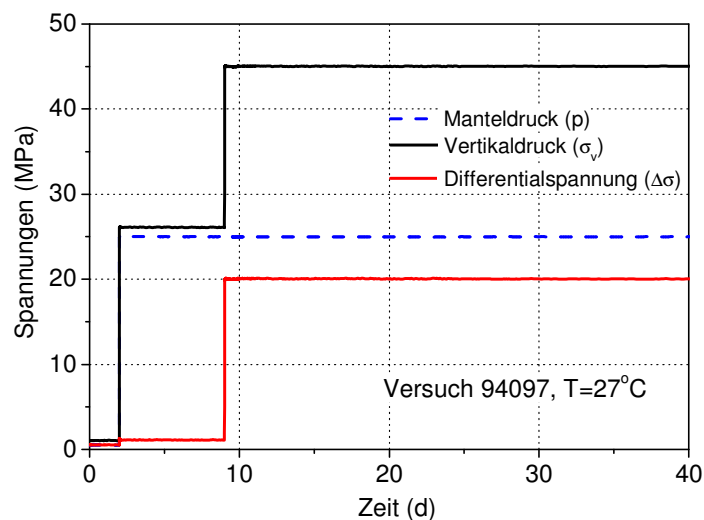


Abb.5: Belastung des Versuchskörpers bei dem Kurzzeitversuch 94097

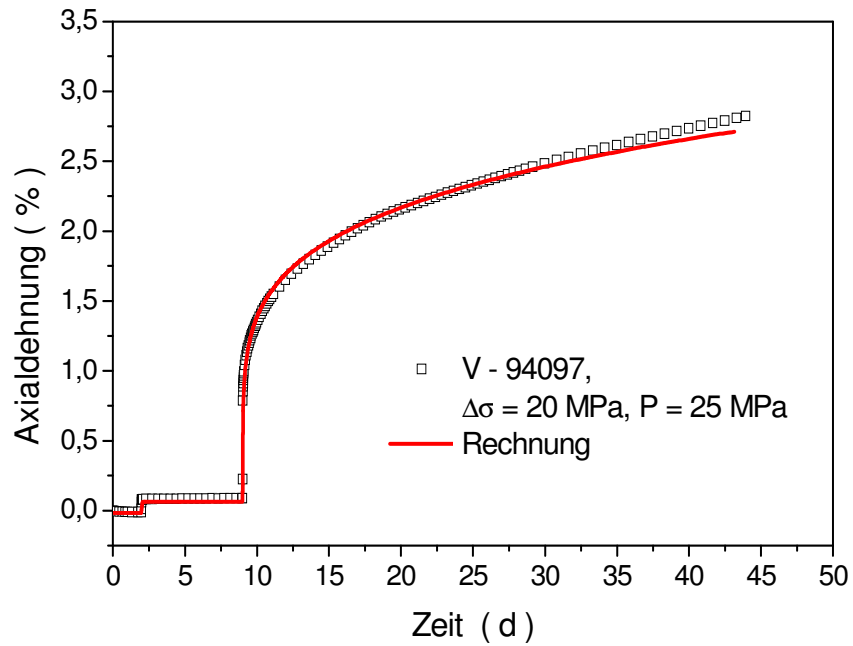


Abb. 6: Simulation des transienten Kriechversuchs 94097 und Vergleich mit den Messergebnissen

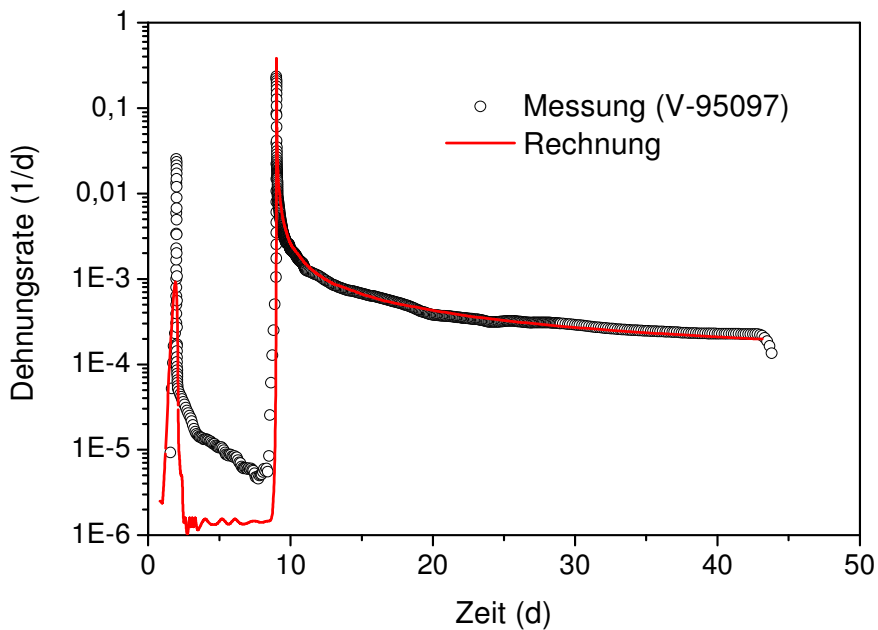


Abb. 7: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten

Auf Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse wurden Modellrechnungen zu den triaxialen Kriechversuchen 04135-04139 durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde die Axialbelastung nach ca. 150 Tagen von 34 auf 36 MPa erhöht. Der Manteldruck von 20MPa und die Temperatur von ca. 30°C blieben konstant über die Versuchsdauer von 450 Tagen. Bei gleichem Salztyp und Versuchsbedingungen unterscheiden sich die Kriechkurven deutlich in der Form und im Betrag der Verformung.

Für die Anpassung der Stoffkennwerte wurde zuerst der Versuch 04137 ausgewählt, welcher ungefähr den durchschnittlichen Verlauf von allen anderen Versuchen darstellt (siehe Abb.8). Im Rahmen des Verbundprojekts wurde jedoch die Nachrechnung des Kriechversuchs 04139 gefragt. Die berechneten Verformungen der beiden Versuche zusammen mit Messungen sind in Abb.8 dargestellt. Die abgeleiteten Verformungsraten zeigt Abb. 9. Aus dieser Darstellung wird nochmals das unterschiedliche Verhalten der Salzprobenserie 04135-04137 gegenüber der Probe 04139 deutlich. Dadurch wurden für die Parameter  $a_1$  und  $a_2$  des primären Kriechens zwei Kennwertensätze ermittelt, die jedoch nicht sehr unterschiedlich ausfallen wie auch aus der Tab. 2 zu ersehen ist.

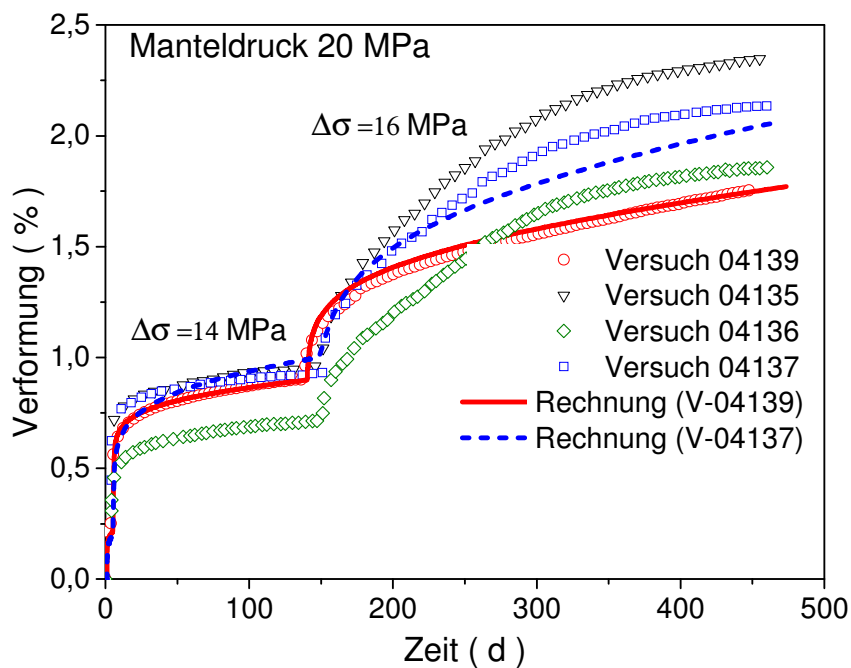


Abb. 8: Nachrechnung der Kriechversuche (04137, 04139), bei denen die Belastung von 14 auf 16 MPa nach ca. 150 Tagen erhöht wurde

Zur Verifikation der verwendeten Stoffgleichung sollte nun der Kriechversuch 04138, bei dem die Axialspannung mehrmals erhöht und gesenkt wurde nachgerechnet werden. Abb. 10 zeigt die Belastungsgeschichte der Salzprobe. Der Versuch wurde bei einer Temperatur von ca. 52°C durchgeführt. Mit Hilfe der zuvor ermittelten Parameter  $a_1$  und  $a_2$  aus den Kurzzeit-Kriechversuchen wurden Modellrechnungen durchgeführt. Um den Einfluss der höheren Temperatur zu berücksichtigen, wurde jedoch der Vorfaktor  $a_0$  neu angepasst.



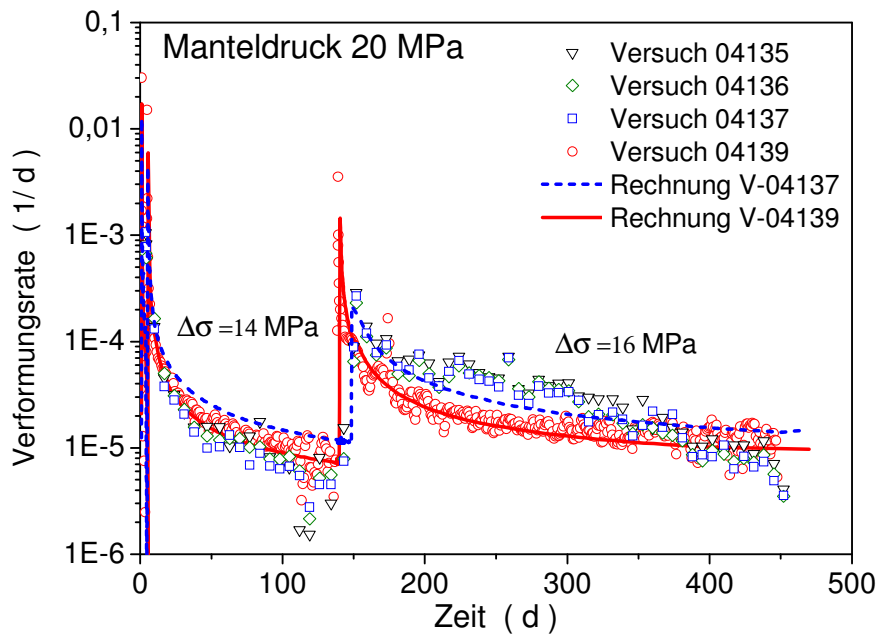


Abb. 9: Vergleich der gemessenen und der berechneten Verformungsraten

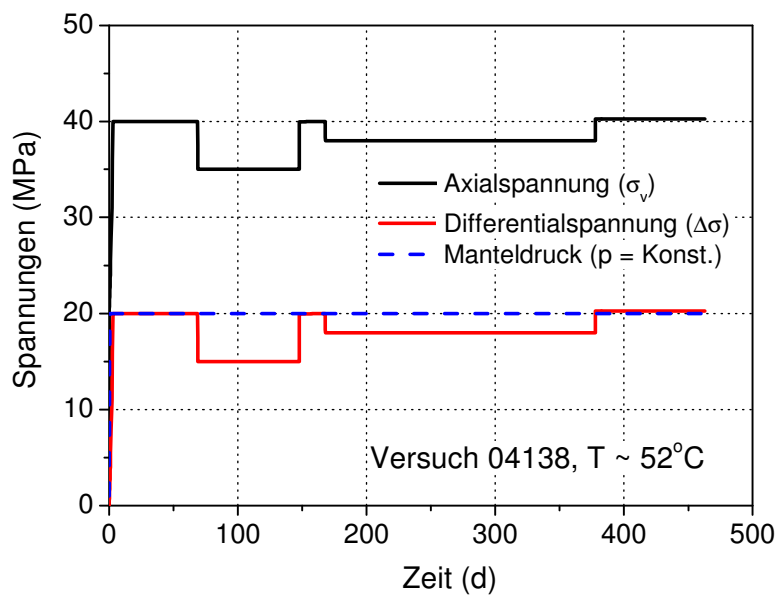


Abb. 10: Belastung der Salzprobe im Versuch 04138

In Abb. 11 zeigen die Rechenergebnisse im Vergleich mit der Messung eine gute Übereinstimmung. Es wird deutlich, dass der Versuchsverlauf durch die angenommenen Parameter gut abgebildet wird. Damit ist eine weitere Anpassung der Parameter an die Versuchsergebnisse nicht unbedingt notwendig. In Abb. 12 ist der Vergleich der berechneten und gemessenen Verformungsraten dargestellt. Die Versuchskurven wurden jeweils über 11 bzw. 41 Messwerte gemittelt. Die verwendeten Kennwerte sind in Tab. 2 aufgelistet.

Allerdings reicht diese Art von Kriechexperimenten nicht aus, um die Materialparameter zu identifizieren. Es werden mehrere Versuche an unterschiedlichen Proben benötigt, um ausreichende Information über das Salzverhalten zu erhalten. Damit sind jedoch zusätzliche Unsicherheiten verbunden, die auf der Streuung der Salzeigenschaft von Probe zu Probe beruhen. Zur Bestimmung eines geeigneten Parametersatzes ist eine Gesamtoptimierung, in der auch die Wechselwirkung der Parameter berücksichtigt wird, notwendig.

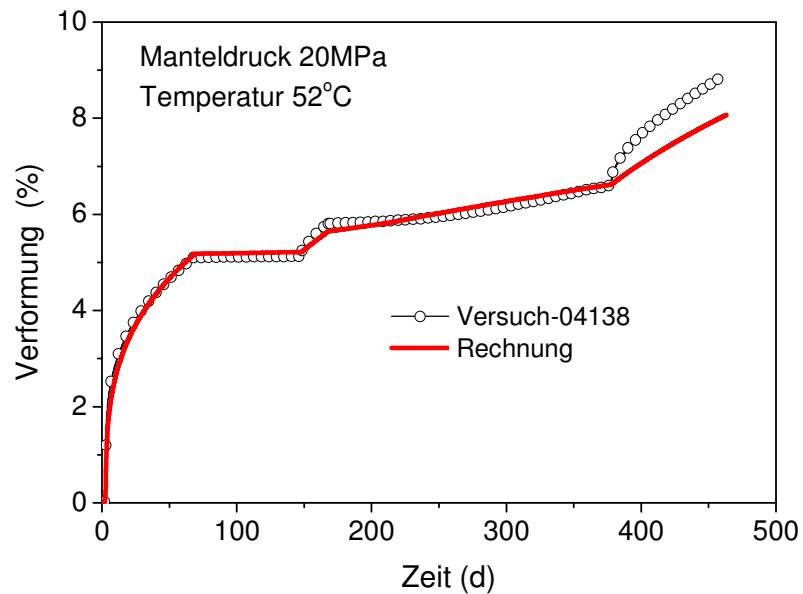


Abb. 11: Nachrechnung des Kriechversuchs (04138), bei dem die Belastung mehrmals erhöht und gesenkt wurde. Die Rechnungen wurden mit zwei Parametersätzen durchgeführt.

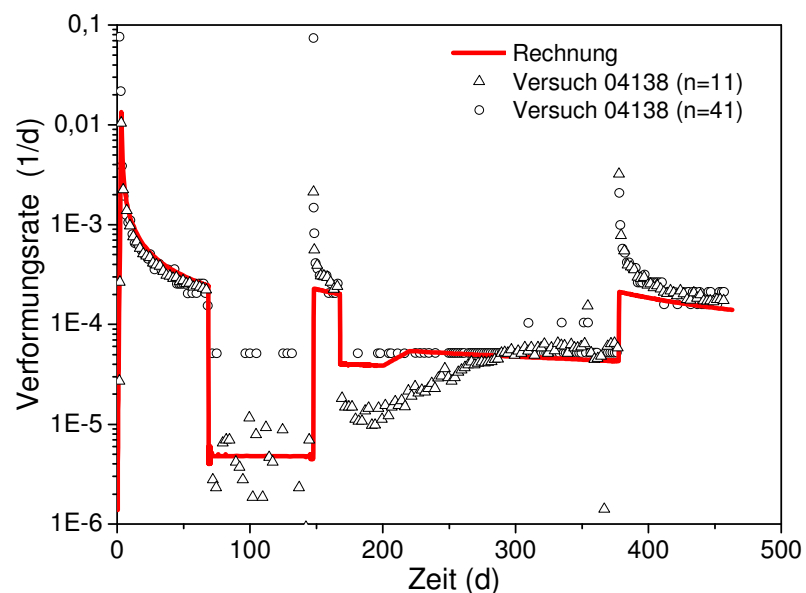


Abb. 12: Vergleich der gemessenen und berechneten Verformungsraten

Versuch	Laufzeit/d	T	$\Delta\sigma$	n	Q/R	$a_0$	$a_1$	$a_2$
95008	25	30°C	37.2	5	6495	0.018	1620	0.25
94097	2/9/43	27°C	20	5	6495	0.018	1600	0.215
04137	150/450	30°C	14/16	5	6495	0.01	1400	0.15
04139	145/450	30°C	14/16	5	6495	0.01	1500	0.11
04138	450	~52°C	20/15/ 20/18/20	5	6495	0.0018	1600	0.25

Tab. 2: Stoffparametern für die Berechnung von Kriechversuchen mit Lastwechsel (Asse Steinsalz)

### 3.2 Kriechversuche an Salz aus Sondershausen

Bei den Kriechversuchen an Sondershausen-Steinsalz wurde eine sukzessive Erhöhung des Manteldrucks um den Faktor 2 von Versuch zu Versuch durchgeführt. In der zweiten Belastungsstufe des jeweiligen Experiments wurde auch die Differentialspannung ( $\Delta\sigma$ ) um jeweils 3 MPa erhöht. Die Anpassung des Kriechgesetzes erfolgt nur durch die Parameter  $a_1$  und  $a_2$ . Die restlichen Parameter ( $a_0$ ,  $Q_c$  und  $n$ ) wurden wie für das Speisesalz aus dem Asse Bergwerk verwendet.

In Abb. 13 sind die berechneten Entwicklungen der Kriechverformung zusammen mit den experimentell ermittelten Kriechkurven dargestellt. Die Güte der Anpassung der Parameter wird aus dieser Abbildung ersichtlich. Die gemessenen Verformungsraten werden durch die Modellierung gut wiedergegeben (Abb. 14). Obwohl die Parameter infolge des Anpassungsprozesses gering verändert wurden, konnte schließlich ein einheitlicher Parametersatz ermittelt werden (Tab. 3).

Zur Absicherung der Stoffmodelle ist jedoch zu prüfen, ob diese auch das in situ Verhalten von Steinsalz hinreichend genau beschreiben. Wegen der verschiedenen Bearbeitungsschritte einer Salzprobe vor dem eigentlichen Laborversuch, ist die Übertragung der Messergebnisse auf in situ Verhältnisse nicht ganz gesichert.

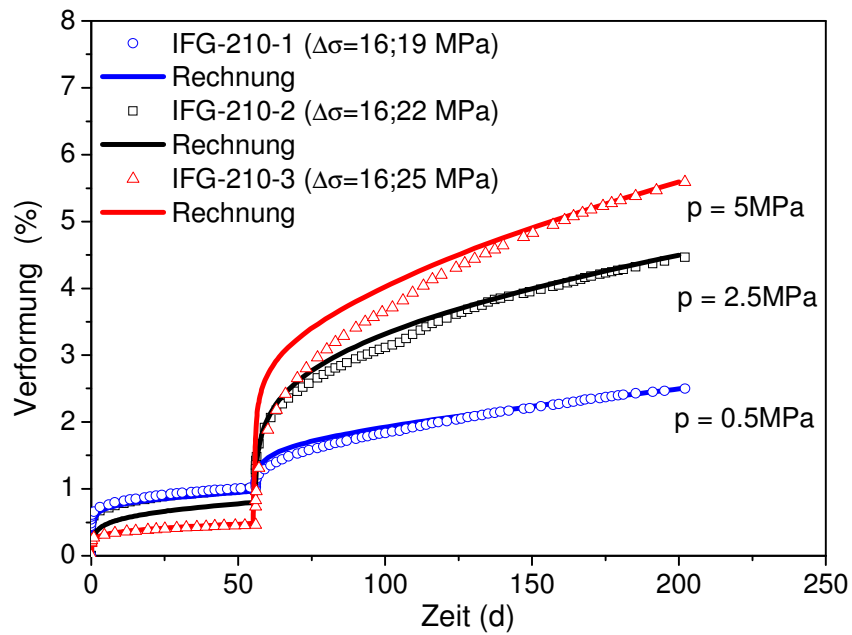


Abb. 13: Nachrechnung der IfG - Kriechversuche an Salz aus Sondershausen; bei diesen Versuchen wurde der Manteldruck sukzessiv um ein MPa erhöht.

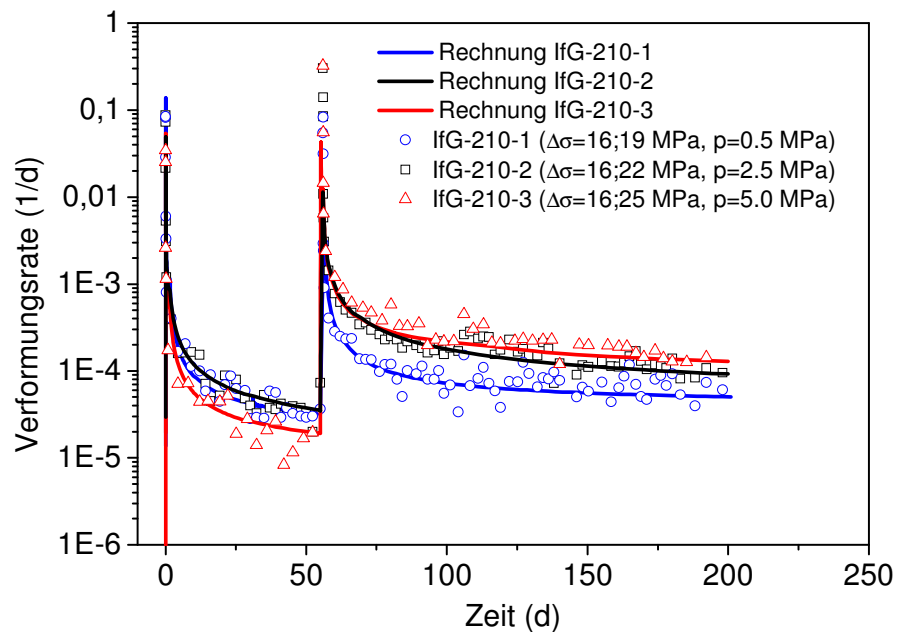


Abb. 14: Zeitliche Entwicklung der gemessenen und berechneten Kriechraten

Versuch	Laufzeit/d	p	$\Delta\sigma$	n	$a_0$	$a_1$	$a_2$
IFG-210-1	200	0.5	16/19	5	0.018	480	0.15
IFG-210-2	200	2.5	16/22	5	0.018	380	0.155
IFG-210-3	200	5	16/25	5	0.018	285	0.13
<b>Mittelwert</b>				<b>5</b>	<b>0.018</b>	<b>~383</b>	<b>0.145</b>

Tab. 3: Stoffparameter für die Berechnung von Kriechversuchen an Steinsalz aus Sondershausen

## 4. Simulation von Festigkeitsversuchen

Wie aus dem vorherigen Kapitel zu ersehen war, konnte das Verhalten des Steinsalzes im primären und sekundären Kriechbereich ohne Berücksichtigung der Dilatanz und der Schädigungsmodellierung gut beschrieben werden. Nachfolgend sollen einige Festigkeitsversuche, bei denen die volumetrische Verformung des Probenmaterials durch höhere Belastungsgeschwindigkeit induziert wurde, untersucht werden.

Die Festigkeitsversuche werden weltweit im Labor durchgeführt, um den Einfluss des Manteldrucks auf die Schädigung des Gesteins zu ermitteln. Es ist hier anzumerken, dass diese Art von Laborversuchen, bei denen innerhalb von wenigen Stunden eine Spannungserhöhung von 0 bis 50 MPa erreicht wird, äußerst unrealistisch für die in situ Verhältnisse von Steinsalzformationen sind.

Die hier betrachteten Experimente wurden an Salzproben aus Asse und Sondershausen bei Raumtemperatur und mit einer konstanten vertikalen Dehnungsrate von  $\dot{\epsilon} = 1E-05$  1/s bis zu der Schädigung des Probenmaterials durchgeführt. Die Gesamtdauer des Prozesses betrug ca. zwei Stunden. Dabei wurde der Einfluss des Manteldrucks auf die Entwicklung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung untersucht. Weiterhin wurde die Volumendehnung der Proben während des Versuchsablaufs ermittelt.

Im folgenden Abschnitt werden numerische Untersuchungen beschrieben, die anhand des Vergleichs mit den Ergebnissen von vier Festigkeitsversuchen eine erste Anpassung der Modellparameter  $c_1$ ,  $c_2$  und  $c_3$  ermöglichen. Von früherer Anpassung der Parameter an transiente Kriechversuche ist bekannt, dass  $c_1$  die Form der berechneten Dilatanzkurven bestimmt während  $c_2$  die maximale Dilatanz beeinflusst [12].

---

#### 4.1 Versuche ohne Reibung zwischen Druckstempel und Probe

Zum Testen der in Kapitel 2.3 beschriebenen Stoffgleichung wurden zuerst Festigkeitsversuche an zylindrischen Salzproben, an denen die Reibung zwischen Druckstempel und dem Probematerial mit Gleitmittel (z.B. Teflon) verhindert wurde, simuliert. Dabei wurde der Spannungs-Dehnung Zustand mit Hilfe von Finiten-Elemente Berechnungen ermittelt. Die Ermittlung der Stoffparameter  $c_1$  und  $c_2$  ( $c_3$  wurde zunächst konstant gehalten) erfolgte anhand von Festigkeitsversuchen mit unterschiedlichen Manteldrücken und konstanter Belastungsgeschwindigkeit.

Bei allen Versuchen zeigt das Steinsalz zunächst ein verfestigendes Verhalten, bis die Schädigung eintritt, um schließlich zu entfestigen. Damit wird das Verhalten des Materials instabil und führt zu Bildung von Scherbändern. Diese Arbeit wurde auf die Verfestigungs- bzw. die Gleichgewichtsphase beschränkt. Abb. 15 zeigt Ergebnisse der Nachrechnung im Vergleich mit den Messergebnissen von vier Versuchen. Hier ist eine qualitativ und auch quantitativ gute Übereinstimmung zwischen den Messungen und den mit den Stoffparametern aus Tab. 4 erzielten Rechenergebnissen festzustellen.

In Abb. 16 sind die gemessenen und berechneten Volumendehnungen des Probenkörpers von vier Versuchen verglichen. Bei allen diesen Messkurven ist zunächst eine Kompaktion (Volumenreduktion) der Probe zu beobachten. Erst wenn die Spannungen in der Probe groß genug werden, wird eine volumetrische Verformung der Salzprobe gemessen. Dies deutet auf eine Anfangsporosität des Steinsalzes von ca. 0.1-0.5% aufgrund der Bearbeitung des Probenmaterials hin. Der Einfluss von solchen Artefakten auf die Messergebnisse wurde noch nicht systematisch untersucht, was die Auswertung des Messmaterials äußerst kompliziert macht und dadurch die Übertragbarkeit auf reale Situationen in Frage stellt.

	<b>A [1/s]</b>	<b>m</b>	<b>Q/R</b>	<b><math>c_1</math></b>	<b><math>c_2</math></b>	<b><math>c_3</math></b>
BGR-Versuche	2.08E-5	2.25	6495	0.7	500	1
TUC und IfG Versuche	2.08E-5	2.35	6495	0.5	400	1

Tab.4: Stoffparametern für die Berechnung von Festigkeitsversuche

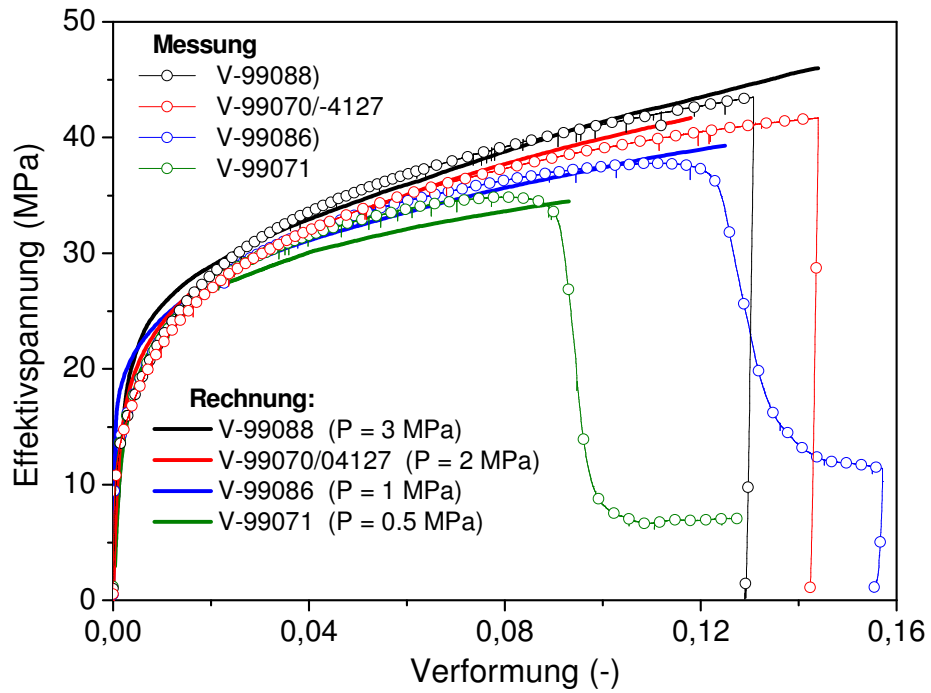


Abb. 15: Simulation der Festigkeitsversuche bei verschiedenen Manteldrücken und Vergleich mit den Messergebnissen

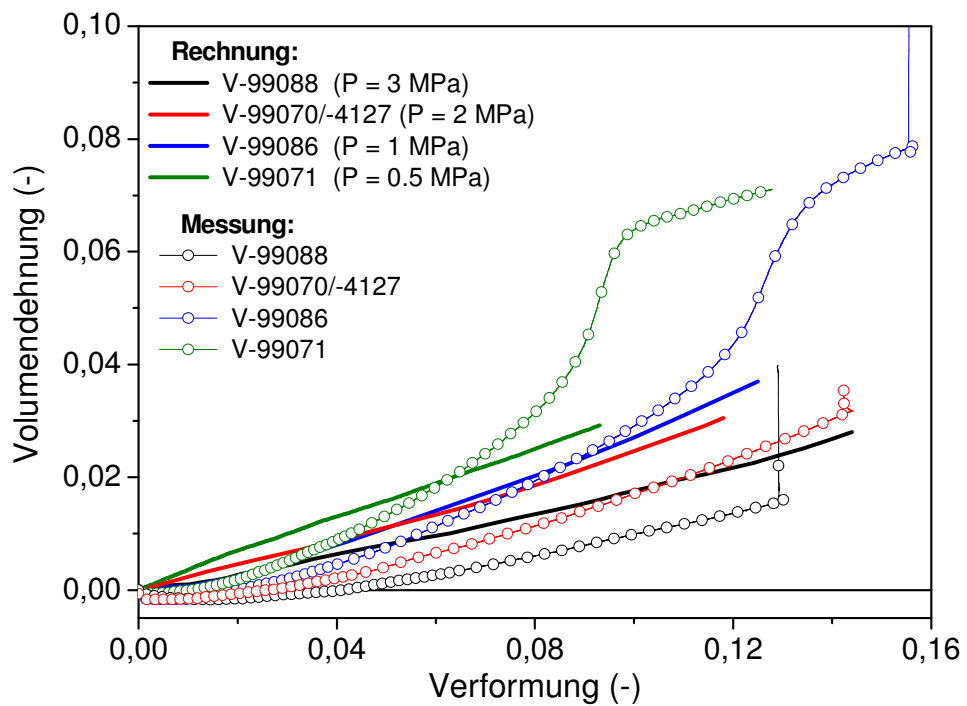


Abb. 16: Vergleich der gemessenen und berechneten volumetrischen Verformungen für verschiedene Manteldrücke

---

Um diese Aussage zu untermauern wird, in Abb. 17 ein Vergleich der Messergebnisse aus drei verschiedenen Labors bei gleichen Randbedingungen (d. H. Manteldruck 1MPa und vertikale Dehnungsrate von  $1.0E-05$  1/s) dargestellt. Ein Vergleich mit der Rechnung ist ebenfalls gezeigt. Die beiden IfG-Versuche wurden an Steinsalz aus Sondershausen und die Versuche von der TU-Clausthal (TUC) und der BGR an Asse Steinsalz durchgeführt. Die erhaltenen Spannungs-Dehnungs-Kurven vom IfG und der TUC sind praktisch identisch. Die Messergebnisse der BGR fallen insgesamt etwas niedriger aus (z. B. bei einer Axialdehnung von 10% wurde eine Differentialspannung um ca. 5 MPa niedriger gemessen).

Wenn man die entsprechenden Entwicklungen der Volumendehnungen in Abb. 18 betrachtet, stellt man fest, dass die Messungen vom IFG und der TUC keine nennenswerte Kontraktanz des Probenmaterials aufweisen. Dagegen zeigt die Messung der BGR zuerst eine Kompaktion der Salzprobe und dann nach ca. 2% Axialverformung der Probe tritt die Dilatanz ein. Es ist noch anzumerken, dass bei den Messergebnissen der BGR-Versuche 99088 und 4129 mit einem Manteldruck von ca. 3 MPa, dieser Effekt noch deutlicher wird (siehe hierzu auch Abb. 19 und 20).

In Rahmen des Projekts wurde das Ende der Kompaktion als Dilatanzgrenze interpretiert was in Realität ein experimentelles Artefakt darstellt, da die in situ gemessene Porosität des Steinsalzes nur etwa 0.01% aufweist und die elastische Kompressibilität des Steinsalzes liegt ebenfalls in dieser Größenordnung. Daher ist der Einfluss der Proben-Beschaffenheit auf die Messergebnisse und insbesondere auf die Schädigungsgrenze ein nicht zu vernachlässigender Effekt, welcher bei der Auswertung der Versuche beachtet und ausgeschaltet werden muss.



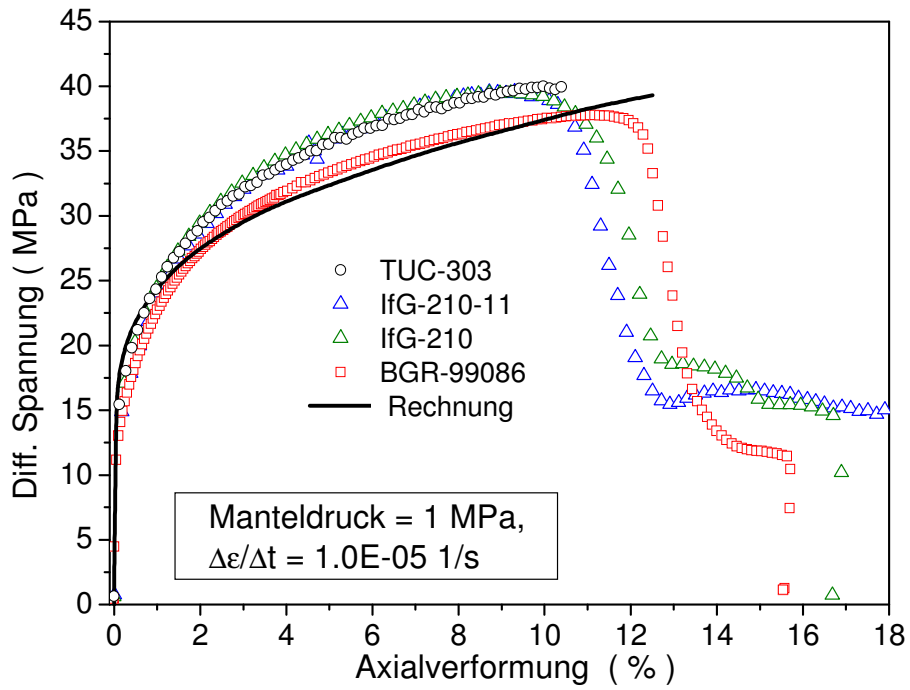


Abb. 17: Vergleich der gemessenen und berechneten Entwicklung der Differentialspannungen als Funktion der Axialdehnung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.

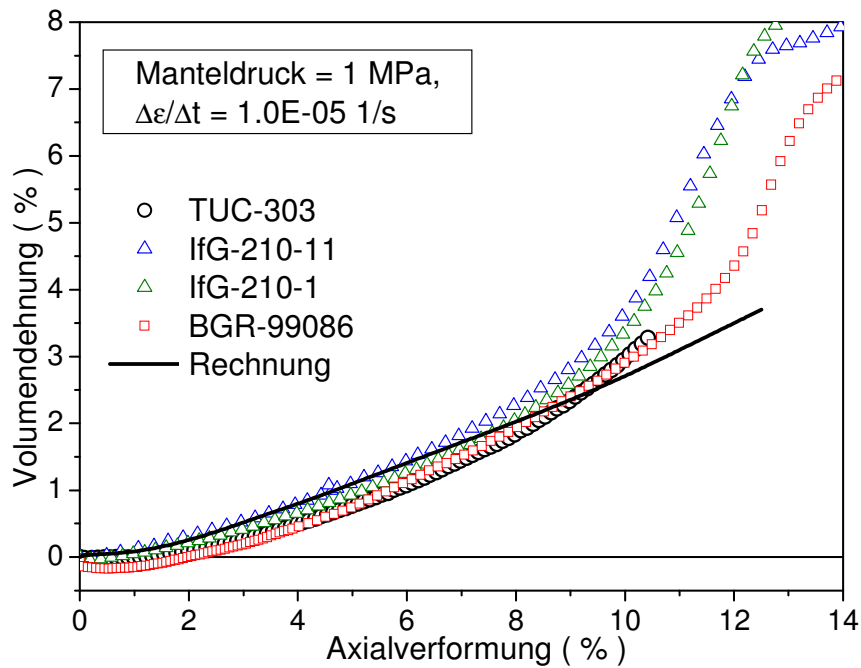


Abb. 18: Vergleich der berechneten und gemessenen Entwicklung der Volumendehnungen als Funktion der Axialverformung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.

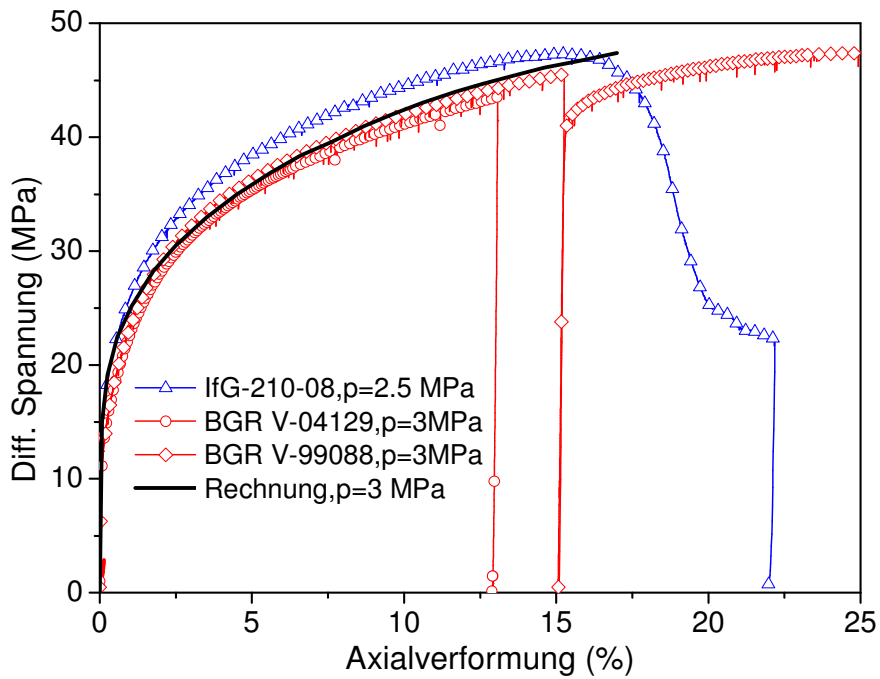


Abb. 19: Vergleich der gemessenen und berechneten Entwicklung der Differentialspannungen als Funktion der Axialdehnung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.

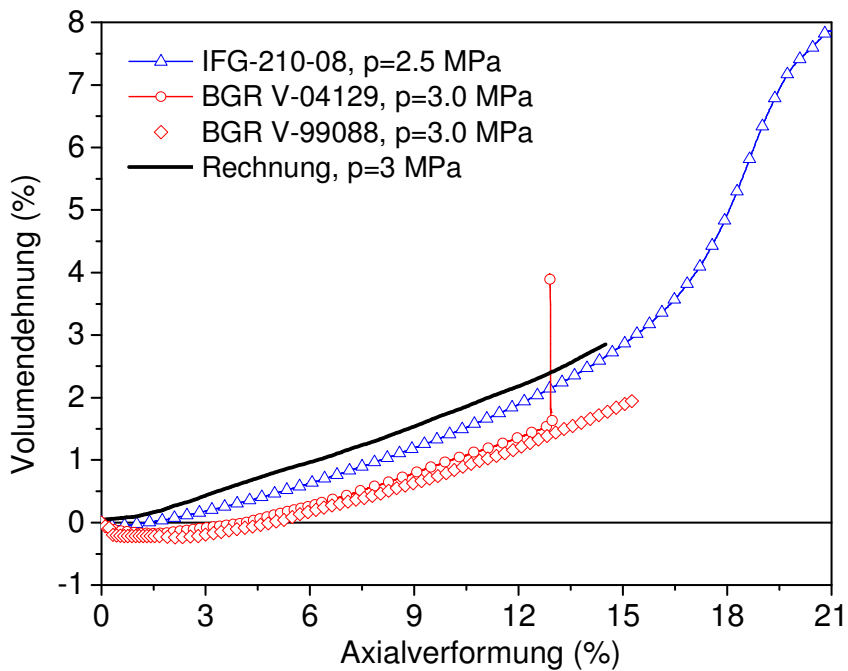


Abb. 20: Vergleich der berechneten und gemessenen Entwicklung der Volumendehnungen als Funktion der Axialverformung für drei Versuche von unterschiedlichen Autoren.

## 4.2 Versuche mit totaler Reibung zwischen Druckstempel und Probe

Als Fortsetzung zu den vorangegangenen Modellrechnungen der Festigkeitsversuche wurden nun die Versuche (04131 und 04132) mit totaler Reibung zwischen Druckstempel und Probenmaterial simuliert. Als Materialparameter wurden die Werte der vorgehenden Rechnungen verwendet. Bedingt durch die Randbedingungen des Versuchs wurde ein rotationssymmetrisches Modell angenommen. Abb. 21 zeigt die Geometrie und das Finite Elemente Modell für die Vergleichsrechnungen. Die Versuche wurden mit einer axialen Stauchrate von  $1.0E-05$  1/s und zwei verschiedenen Manteldrücken durchgeführt.

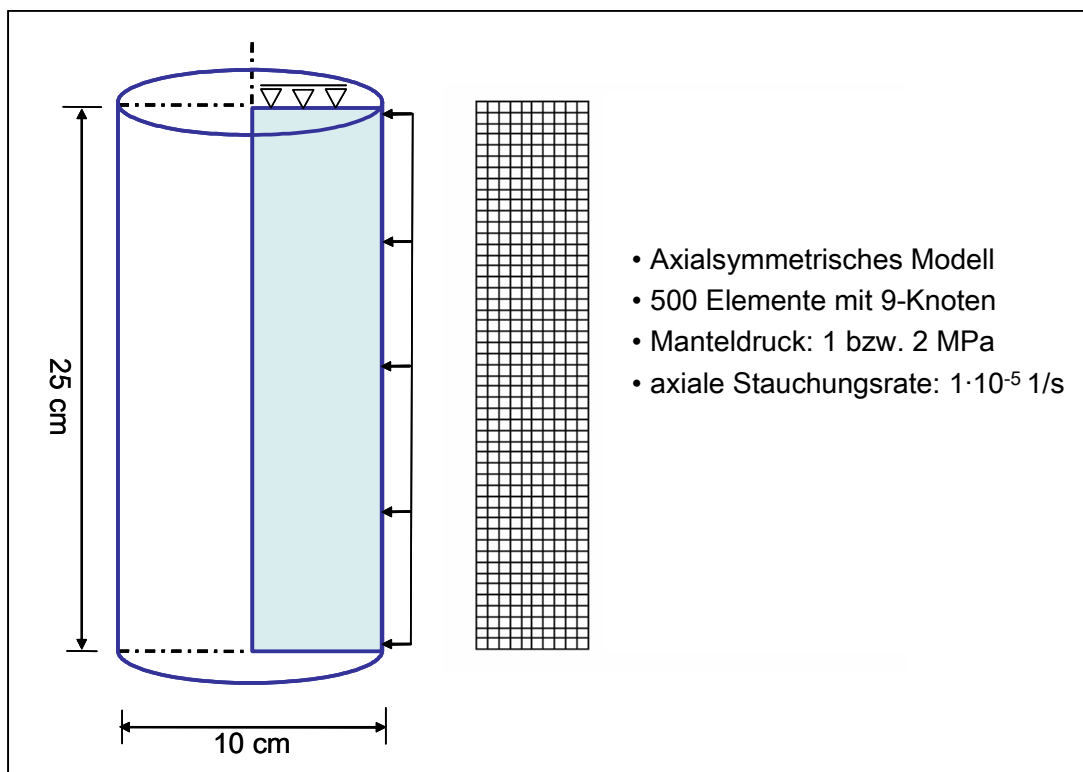


Abb. 21: Geometrie der Versuchsprobe, die Randbedingungen und das 2D FE-Modell für die Berechnung der Versuche 4131 und 4132

Schwerpunkt bei diesen Versuchen war die Simulation der Probenverformung (Austonung) sowie die Verteilung der Mittlere- und der Effektivspannung in der Probe am Ende des Experiments. Für den weiteren Vergleich der Rechenergebnisse der verschiedenen Projektpartner wurden Vertikal- und Horizontaltraversen entlang der Probenmitte hergestellt.

In Abb. 22 sind die Verformungen der Proben gegenüber der unverformten Geometrie sowie die Durchmesseränderung (Austonung) dargestellt. Ein Vergleich mit Messungen wird bei der gemeinsamen Auswertung im Rahmen des Benchmark-Berichts gezeigt. Die berechneten Verformungen und die Volumendehnungen entlang der vertikalen Symmetrieachse sind in Abb. 23 dargestellt.

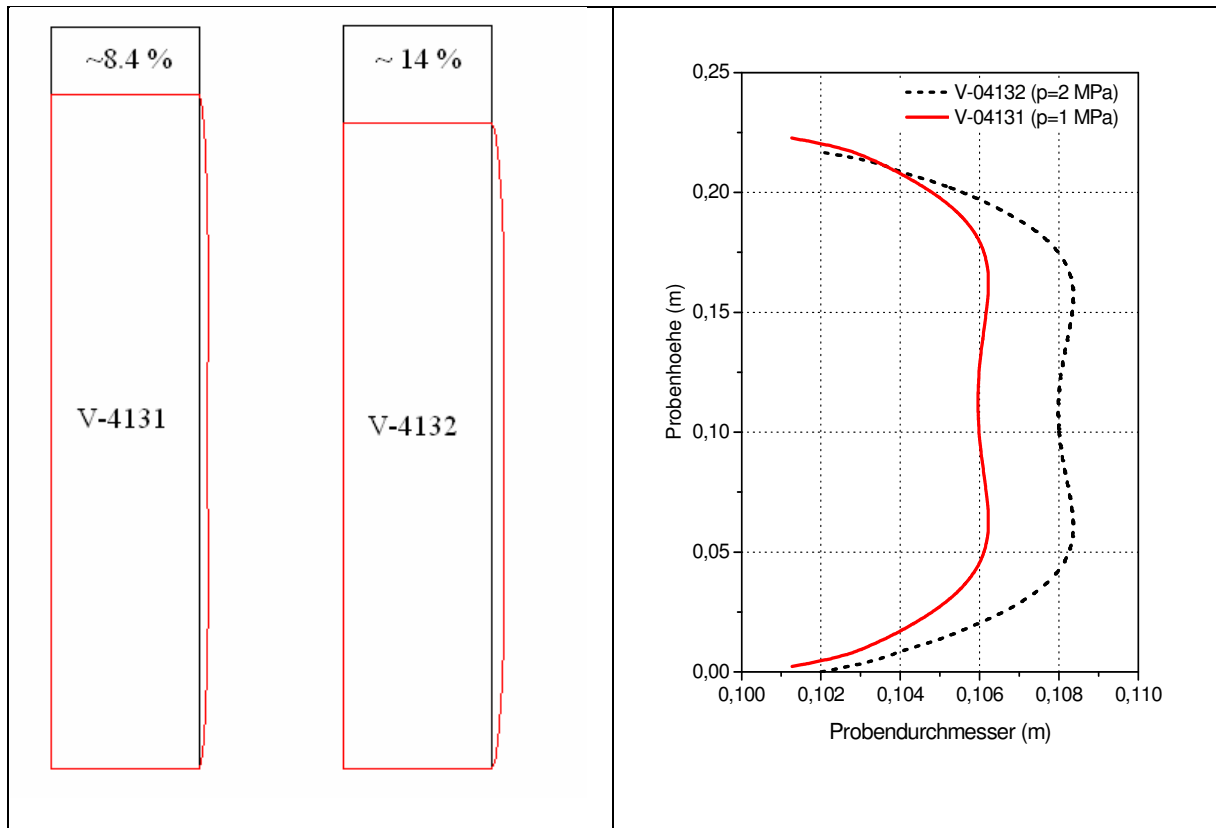


Abb. 22: Verformung der Salzproben sowie die vertikale Änderung des Probendurchmessers für die Festigkeitsversuche 4131 und 4132

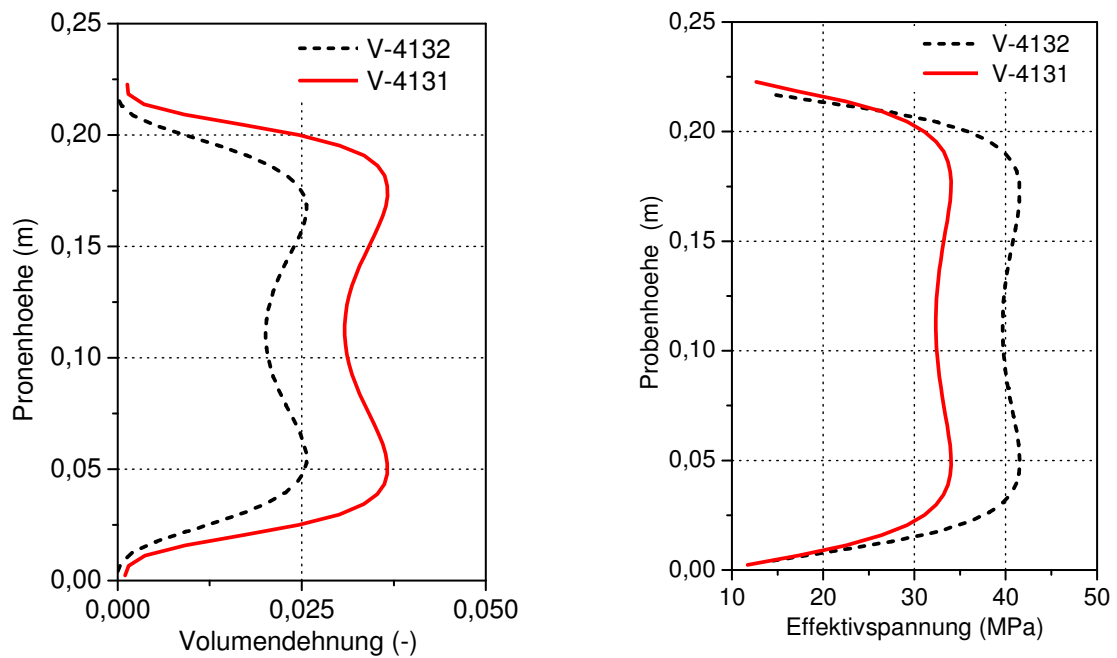


Abb. 23: Vertikaler Verlauf der Volumendehnung und Effektivspannung entlang der Symmetrieachse am Ende der Probenbelastung

Zur Illustration sind in Abb. 24 und 25 die Flächenplots der Effektivspannung, Effektivdehnung sowie die Dilatanz am Ende des jeweiligen Versuchs dargestellt. Aus diesen Plots ist zu erkennen, dass die Bildung von zwei Bereichen von maximalen Spannungen und Verformungen symmetrisch gegenüber der Horizontalemittlebene erfolgt. Diese Lokalisierung wird wahrscheinlich durch die schlanke Salzprobe und die starre Einspannung (totale Reibung) in vertikaler Richtung des Modells hervorgerufen. An den oberen und unteren rechten Ecken des Modells wurden Zugspannungen berechnet die zum Versagen dieser Elemente führten.

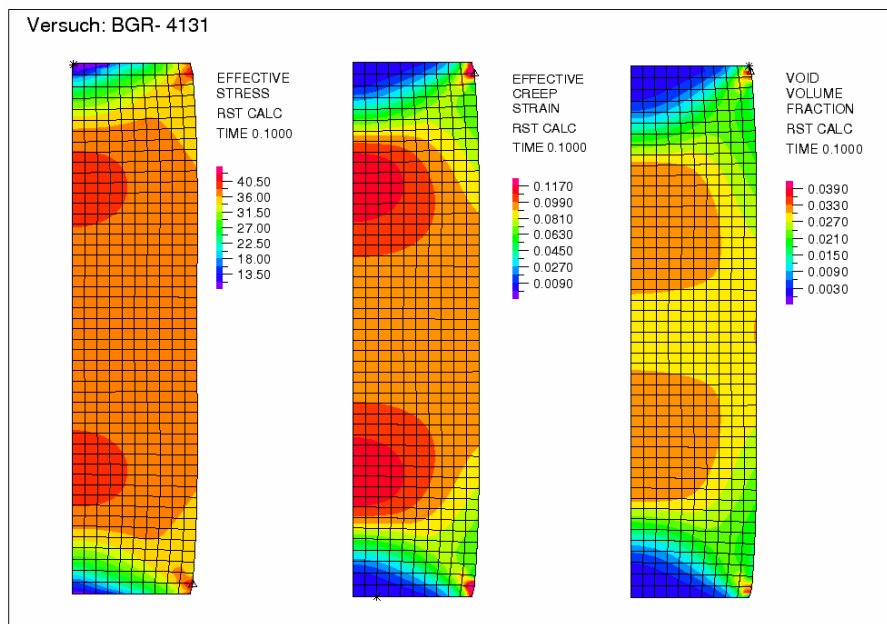


Abb. 24: Verteilung der Effektivspannung, Effektivdehnung und Dilatanz in der Probe (Versuch 4131 mit einem Manteldruck von 1 MPa)

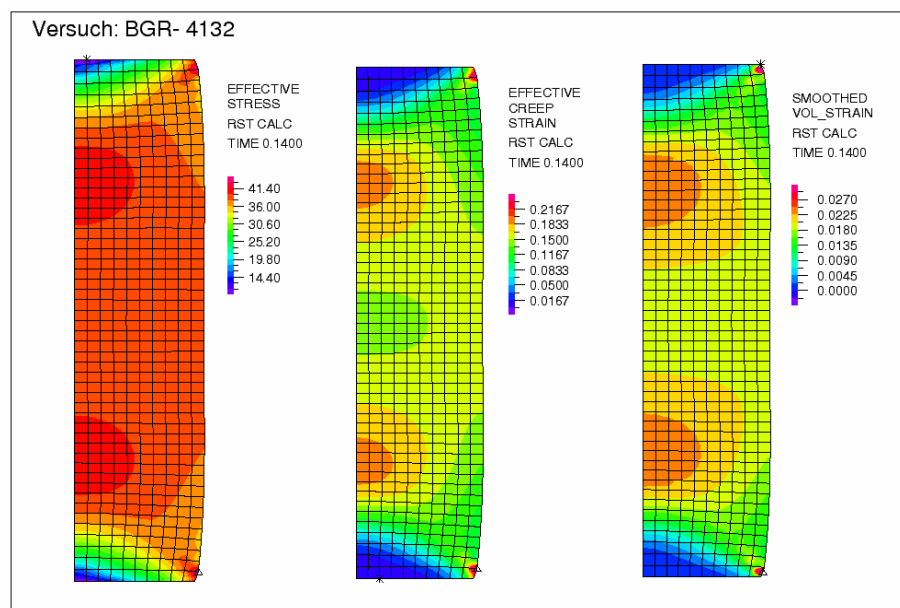


Abb. 25: Verteilung der Effektivspannung, Effektivdehnung und Dilatanz in der Probe (Versuch 4132 mit einem Manteldruck von 2 MPa)

## 5. Modellierung einer Strecke im Bergwerk Sondershausen

In diesem Kapitel werden die bereits beschriebenen Stoffmodelle zur numerischen Simulation einer realen gut dokumentierten Struktur verwendet. Die Rechenergebnisse sollen nicht nur untereinander mit den Projektteilnehmern, sondern auch mit der in situ Messung verglichen werden. Das Hauptziel der Modellierung war die Bewertung der Rechenmodelle und Stoffgleichungen von Steinsalz durch Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen, um die Übertragbarkeit der entwickelten Stoffmodelle auf die realen Probleme zu prüfen.

Die Maschinenstrecke EU1 im Sondershausen Bergwerk (Thüringen) wurde in Oktober 1969 aufgefahren. Die Strecke mit einem kreisförmigen Querschnitt befindet sich auf der 715m Sohle in Staßfurtsteinsalz. Zur Vorbereitung eines Großversuchs (Dammbauwerk) wurde die Strecke ausführlich instrumentiert und die über einen Zeitraum von einem Jahr erhaltenen Messergebnisse stehen nun zur Verfügung [13,14]. Eine schematische Darstellung des Versuchsbauwerkes auf der 715 m Sohle mit der Position des Messbereiches ist in die Abb. 26 dargestellt.

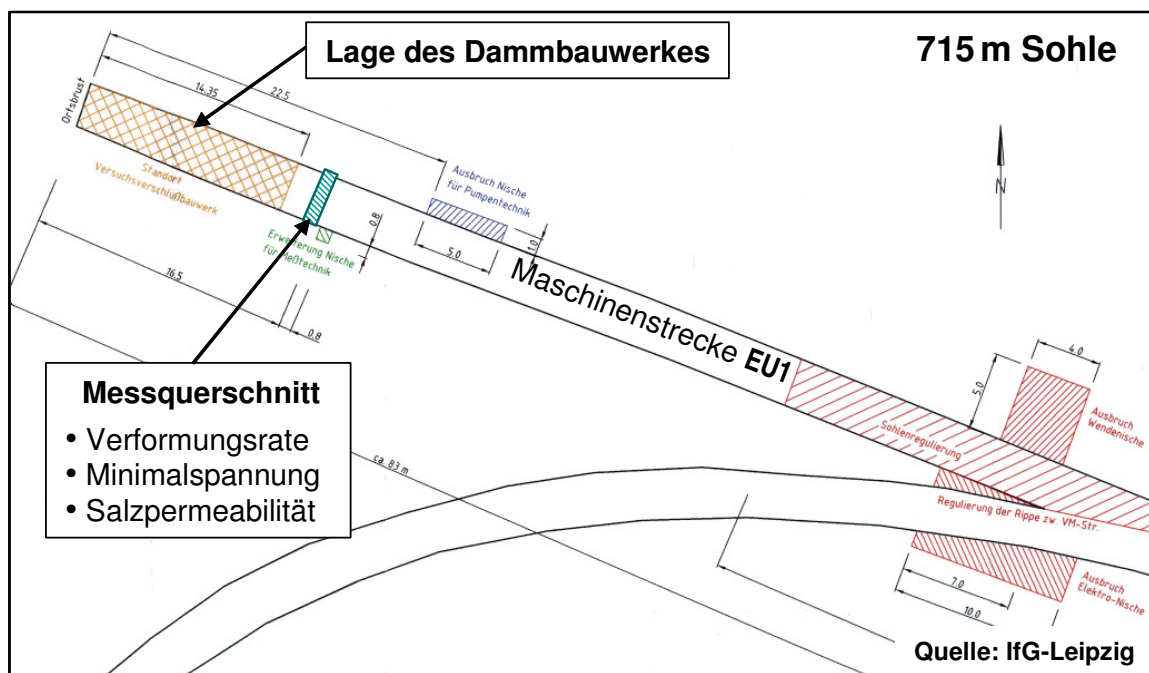


Abb. 26: Lage des Versuchsfeldes mit dem Messquerschnitt in der Strecke EU1 der Grube Sondershausen

## 5.1 Modellbeschreibung

Durch die einfache Geometrie des Streckenquerschnitts und der angenommenen homogenen geologischen Verhältnisse im Versuchsfels sind zunächst mehrere numerische Modellvorstellungen denkbar, die gleiche Rechenergebnisse liefern können jedoch mit unterschiedlichem numerischen Aufwand. Abbildung 27 gibt zur Illustration die Modellbildung wieder. Die relativ einfachen Modelle (Alternativmodelle) wie die axialsymmetrische Kreisscheibe oder ein Viertel des Streckenquerschnittes im ebenen Deformationszustand wurde zum Beginn des Projekts bereits untersucht. Die Beschreibung dieser Rechenergebnisse zusammen mit einer Parameterstudie ist ausführlich in früheren Veröffentlichungen [12,16] dargestellt.

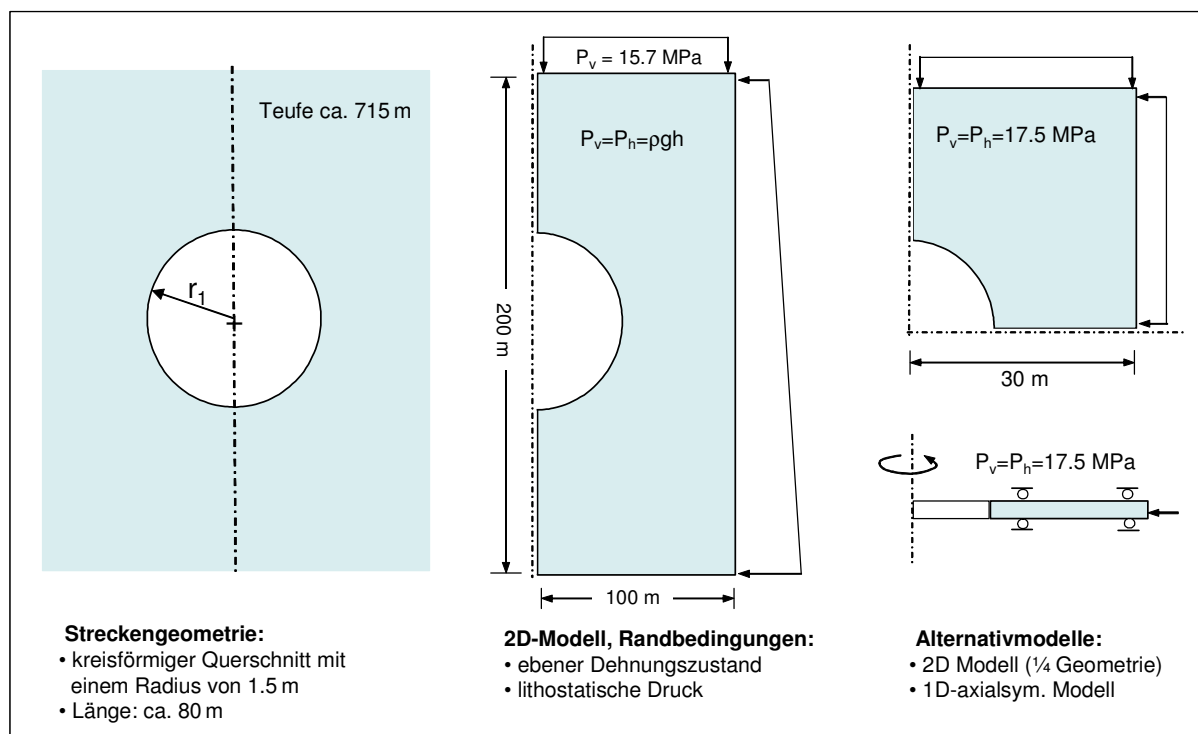


Abb. 27 Vereinfachte Darstellung der Untergrundstrecke EU1 und Modellbildung

Bei der Aufgabenstellung dieses Benchmark-Projekts wurde durch die Teilnehmer der Vertikalquerschnitt der Streckenumgebung symmetrisch über die Vertikalachse gewählt.

Für die Simulation wurde ein Gebirgsbereich von 200 x 100 m diskretisiert. Dieses Modell erfasst den halben Hohlraum und das umliegende Salzgebirge. Die Oberkante des Modells wird durch einen Gebirgsdruck von 15.7 MPa belastet. Der Primärspannungszustand ergibt sich durch die Auflast der darüber liegenden Formationen und ist von der Teufe abhängig. Dabei wird die Dichte des Salzgebirges mit  $2200 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Weitere Randbedingungen sind in Abb. 28 zusammen mit dem im Rahmen des Verbundprojekts verwendeten Elemente Netz dargestellt. In diese Abbildung sind ebenfalls die Positionen der Punkte **a – f** eingetragen, an denen die Entwicklung der Salzkonvergenz, Spannungen und Dehnungen gefragt wurden.

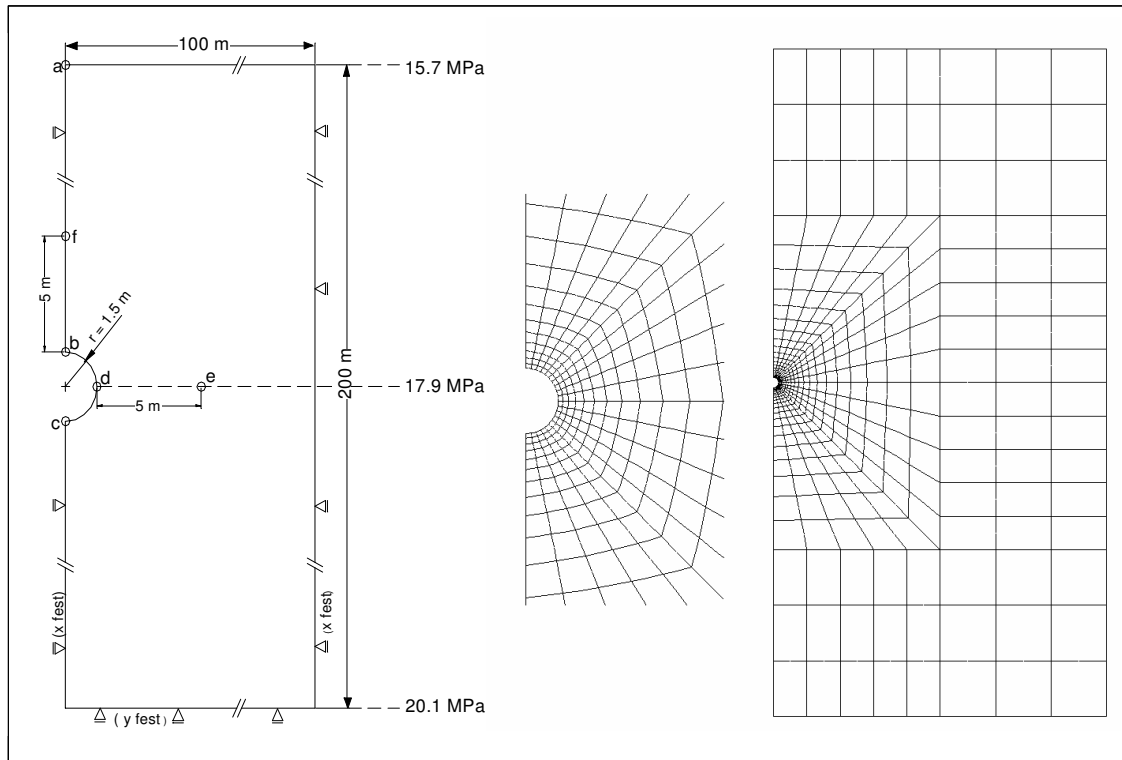


Abb. 28: Modellgeometrie, Randbedingungen und das Finite Element-Netz

Das Materialverhalten des als homogen und isotrop angenommenen Steinsalzes wurde mit dem viskoplastischen Dilatanzgesetz (Gleichung 10) beschrieben. Die verwendeten Stoffkennwerte wurden an Kriechversuchen [14] an Steinsalz vom Versuchsfeld angepasst und sind in Tab. 5 dargestellt. Die Kennwerte zur Berechnung der Permeabilität des Salzes im Nahbereich der Streckenkontur sind ebenfalls in dieser Tabelle angegeben.

Thermo-elastische Parameter	$E = 36 \text{ GPa}; \nu = 0.27; \alpha = 4.2\text{E-}05 \text{ 1/K}$
Viskoplastisches Verhalten nach Gleichung (10)	$A = 2.08\text{E-}05 \text{ 1/s}; Q_c = 6495; m = 2; T = 303 \text{ K}$
Dilatanz: Gleichungen (16), (17)	$c_1 = 0.7, c_2 = 500, c_3 = 1$
Permeabilität: Gleichung (18)	$B = 3.2 \text{ E-}11; C = 3.5 \text{ nach [6]}$ $B = 2.13\text{E-}09; C=3 \text{ nach [15]}$

Tab. 5: Materialkennwerte für die numerische Simulation der EU 1 Strecke



## 5.2 Rechenergebnisse und Vergleich mit der Messung

In Abb. 29 und 30 sind jeweils die Vertikalverschiebungen an den Positionen **a**, **b**, **c** und **f** sowie die Horizontalverschiebungen an Positionen **d** und **e** als Funktion der Zeit dargestellt. Ein Vergleich der Horizontalverschiebungen an den Positionen **d** und **e** entlang der horizontalen Mittelebene des Modells mit den Rechenergebnissen einer einfachen axialsymmetrischen Modellierung der Strecke ist ebenfalls in Abb. 30 gezeigt. Die Übereinstimmung dieser Rechenergebnisse ist bemerkenswert und zeigt, dass die Hohlraumkonvergenz während der 35-jährigen Standzeit nicht durch den Beitrag der weiter entfernten Gebiete bestimmt wird, wie es bei der Benchmark-Definition vermutet wurde. In diesem Fall führt die Überdimensionierung des Rechenmodells nur zu einem unnötigen Rechenaufwand.

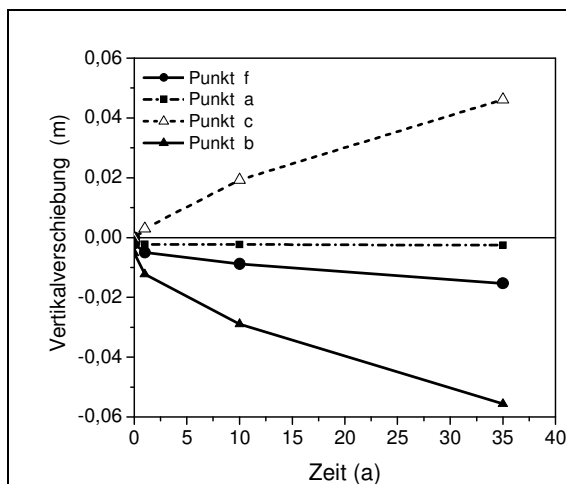


Abb. 29: Entwicklung der Vertikalverschiebung an verschiedenen Positionen in der Umgebung der Strecke.

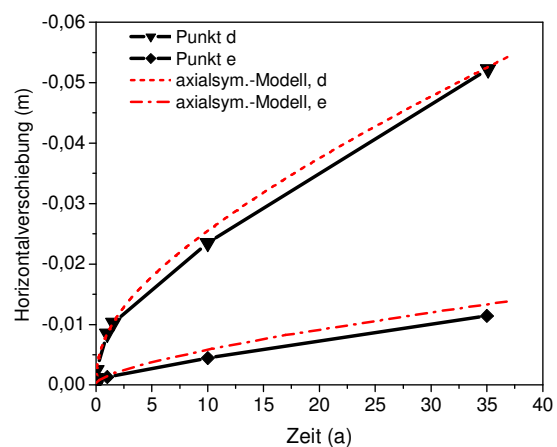


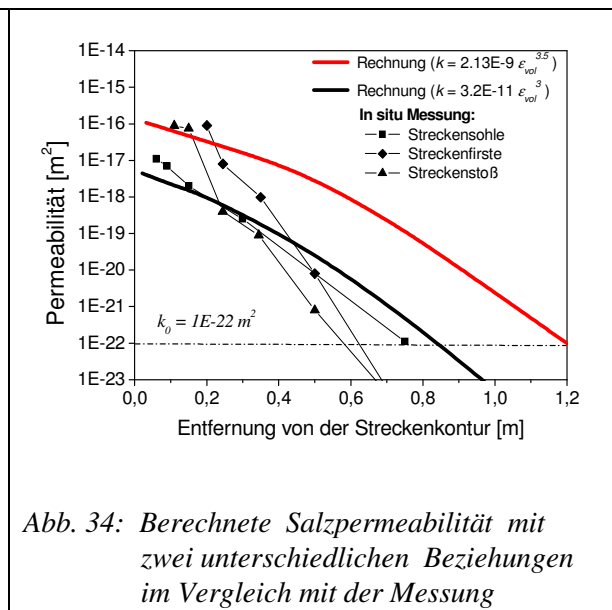
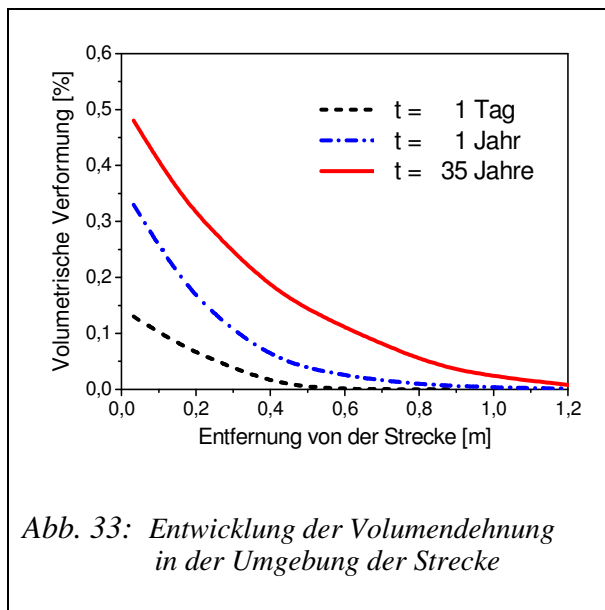
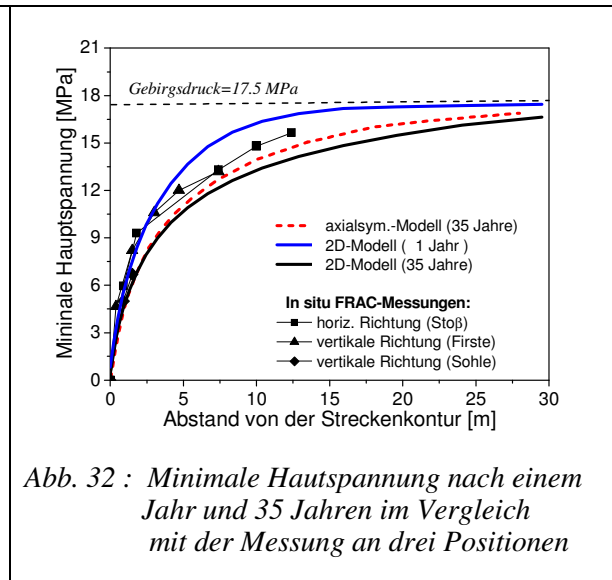
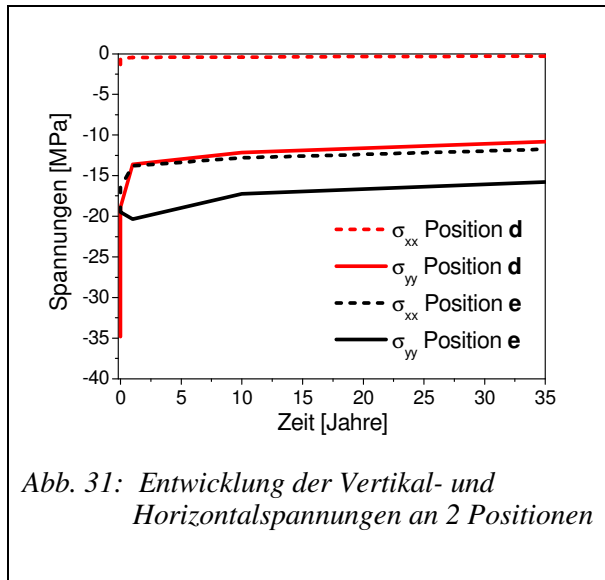
Abb. 30: Horizontalverschiebung an den Punkten **d** und **e** und Vergleich mit den Ergebnissen aus einer einfachen axialsymmetrischen Modellierung der EU1 Strecke.

Die berechneten Verschiebungsraten nach 35 Jahren an zwei Positionen (**d** und **e**) betragen 1.15 mm/a bzw. 0.4 mm/a, während die Extensometer-Messungen an der Streckenwand in vertikaler und horizontaler Richtung 1.09-1.3 mm/a bzw. 0.365-0.62 mm/a ergeben haben.

Weiterhin sind in Abb. 31 die berechneten zeitlichen Entwicklungen der Horizontal- und Vertikalspannungen an den Positionen **d** und **e** dargestellt. Ein Vergleich der minimalen Hauptspannung mit der Messung aus Frac-Versuchen in der Umgebung der Strecke ist in Abb. 32 dargestellt. Eine relativ gute Übereinstimmung der Rechnung mit der Messung ist erkennbar. Bereits in einer Entfernung von ca. 30m von der Streckenwand erreicht die minimale Hauptspannung den angenommenen ungestörten Gebirgsdruck von ca. 17.5 MPa.

In Abb. 33 sind die Volumenverformungen als Funktion der horizontalen Entfernung von der Streckenkontur zur Zeit  $t = 1$  Tag sowie ein Jahr und 35 Jahre dargestellt.

Mit Hilfe eines vorläufigen Potenzansatzes (Gl. 18) und der in Tabelle 4 aufgeführten Parameter nach [6] und [15] wurde die Permeabilität des Steinsalzes aus der berechneten Dilatanz abgeleitet. Abbildung 34 zeigt den berechneten Radialverlauf der Salzpermeabilität zusammen mit den experimentell ermittelten Werten.



Zur weiteren Illustration der Rechenergebnisse sind in Abb. 35 bis 37 die Flächenplots der Effektiv- und der minimalen Hauptspannungen sowie der Volumendehnungen in der Umgebung der Strecke nach einem bzw. 35 Jahren der Streckenerstellung gezeigt.

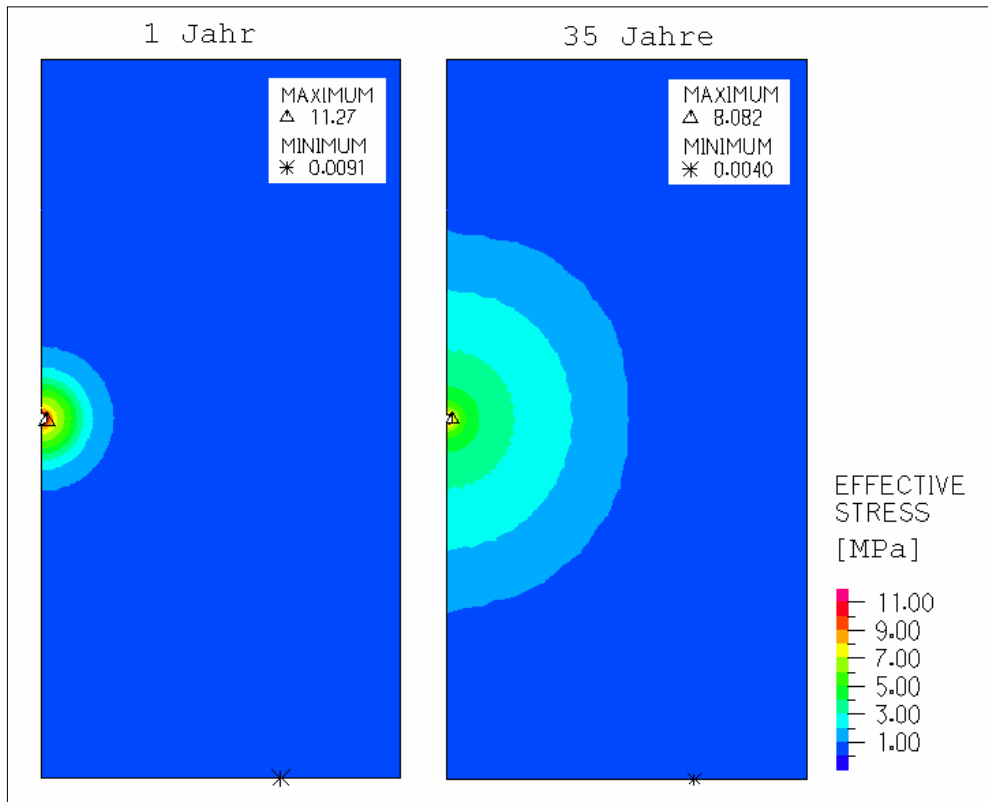


Abb. 35: Entwicklung der Effektivspannungen in der Umgebung der Strecke nach einem und nach 35 Jahren der Streckenerstellung.

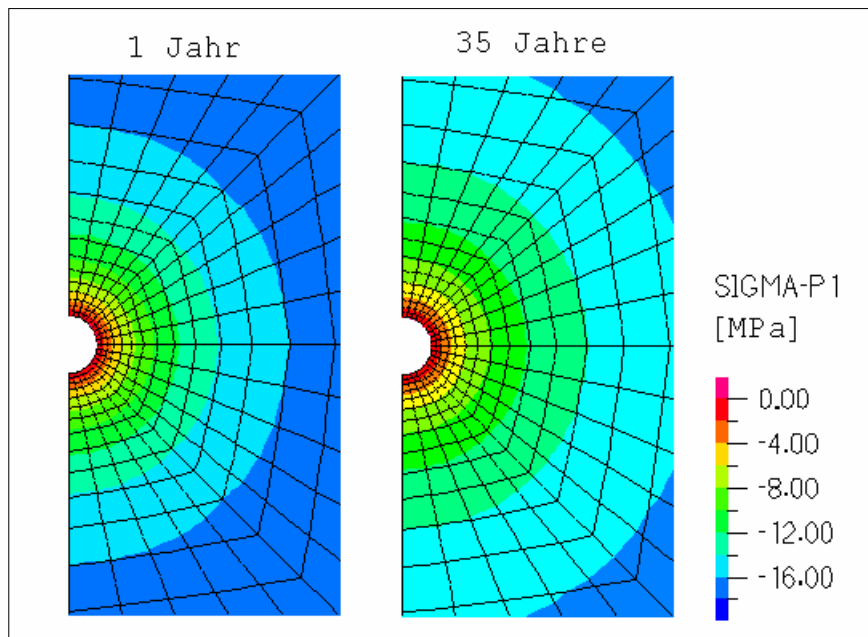


Abb. 36: Verteilung der minimalen Hauptspannung in der Umgebung der Streckenkontur nach einem und nach 35 Jahren der Streckenerstellung

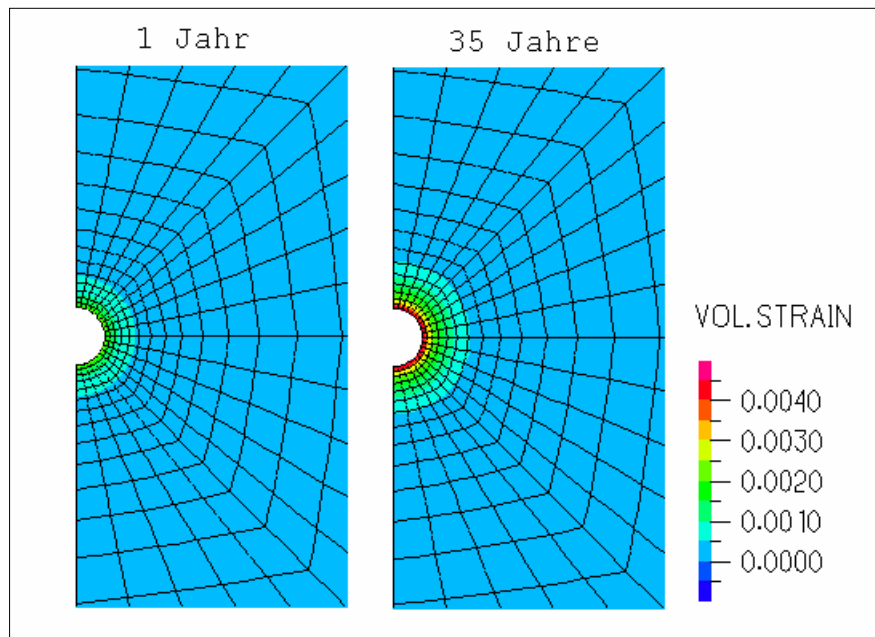


Abb. 37: Verteilung der Volumendehnung in der Umgebung der Streckenkontur nach einem und nach 35 Jahren der Streckenerstellung

Anhand der durchgeführten Rechnungen und des Vergleichs mit den Messergebnissen lassen sich zusammenfassend folgende Erkenntnisse festhalten:

- Die Rechenergebnisse (d. h. Konvergenzrate, minimale Hauptspannungen) zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung mit den Messergebnissen, so dass die Auswahl des Stoffmodells und der Stoffparameter als realistisch angesehen werden kann.
- Die von der Dilatanz abgeleitete Permeabilität des Steinsalzes in der Umgebung der Strecke stimmt relativ gut mit der in situ Messung überein. Die Rechenwerte sind jedoch von der verwendeten Beziehung zwischen Dilatanz und Permeabilität stark beeinflusst

Die beschriebenen Rechenmodelle zur Untersuchung der Auflockerungszonen (EDZ) in der Umgebung von Strecken befinden sich noch in Entwicklungsphase. Zur Verfeinerung dieser Modelle ist es notwendig neben der Dilatanz auch die Verheilungsprozesse des Steinsalzes zu berücksichtigen.

## 6. Untersuchung einer Kammer-Pfeiler-Struktur

Nachfolgend soll das in den vorhergehenden Kapiteln vorgestellte Stoffmodell zur Beschreibung der Dilatanz und Schädigung von Steinsalz auf eine weitere Fallstudie angewendet werden. Hierzu wurde ein fiktiver schlanker Salzpfiler in einer periodischen Feldstruktur mit langen Parallelstrecken gewählt. Es wurden drei verschiedene Lastfälle entsprechend drei Teufen von 320, 550 und 700 m untersucht. Die Rechnungen zur Pfeilerbelastung sollen über einen Zeitraum von 100 Jahren durchgeführt werden. Die Materialkennwerte des Steinsalzes basieren auf den IfG-Laborversuchen an Staßfurt-Steinsalz aus der Grube Sondershausen und sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Das Ziel dieser Simulationen bestand darin, die Entwicklung der Verschiebungen, Dehnungen und Spannungen im Pfeiler zu ermitteln. Die Berechnung der Dilatanz und des Schädigungsverhaltens bis zum Bruch des Pfeilers stand ebenfalls im Mittelpunkt dieser Untersuchungen und erfolgte unter der Annahme von großen Verzerrungen.

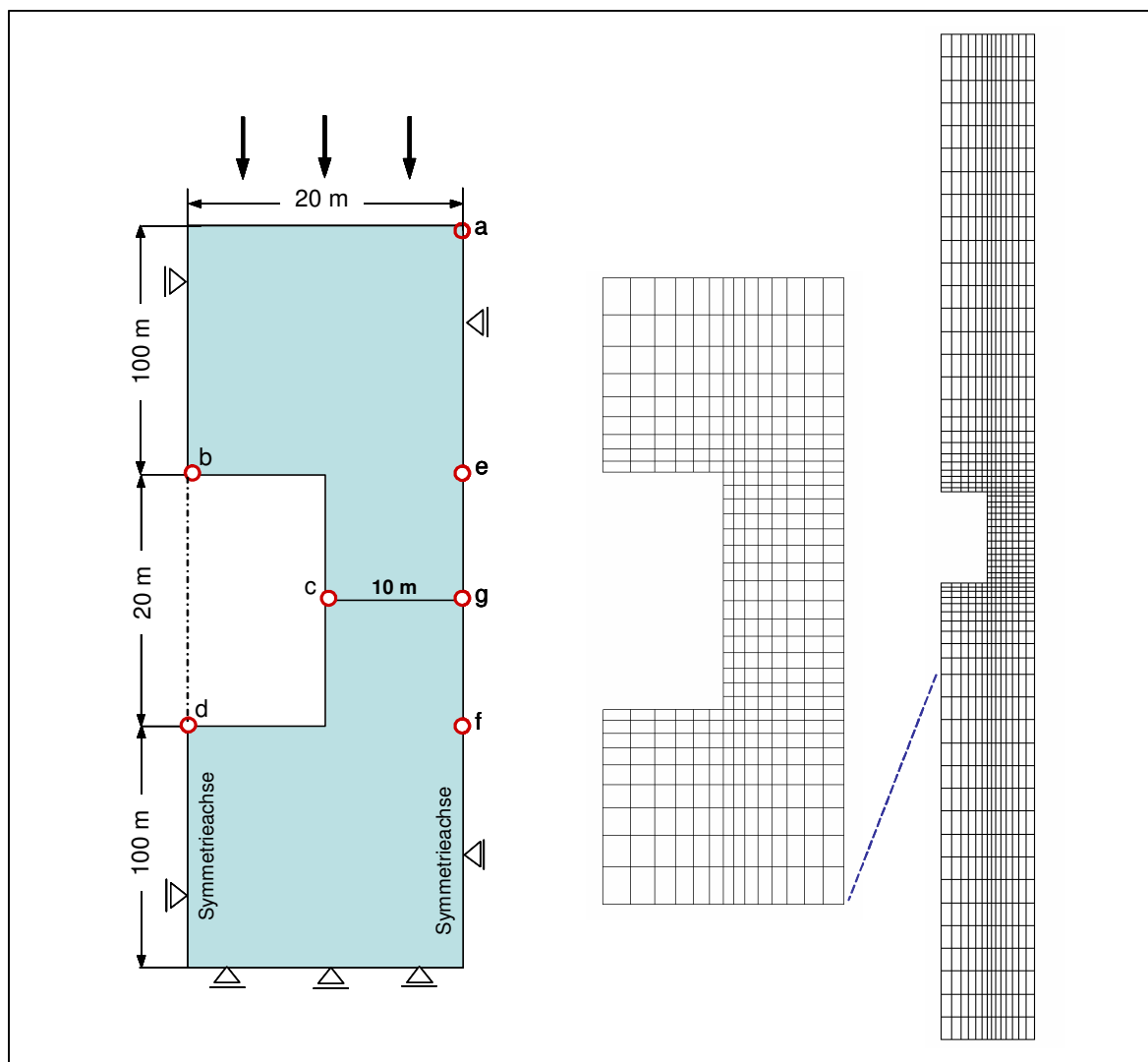


Abb. 38: Modellgeometrie, Randbedingungen und das FE- Netz; Die Punkte **a** bis **f** stellen die Lagen für die Ergebnisauswertung dar.

---

## 6.1 Modellbeschreibung

Für die numerischen Untersuchungen wurde ein zweidimensionales Modell unter der Annahme eines ebenen Dehnungszustands verwendet. In Abb. 38 sind die wesentlichen geometrischen Parameter der Kammer-Pfeiler-Struktur, die finite Elemente Diskretisierung des Modells und die verwendeten Randbedingungen dargestellt. Wegen der Symmetriebedingungen wurde der rechte und linke Rand des Modells horizontal eingespannt. Der Primärspannungszustand im Salz wird als hydrostatisch angesehen und mit einer Dichte von  $2200\text{kg/m}^3$  angenommen. Bei einer Modellhöhe von 220 m ergibt sich einen Auflast an der Modelloberkante von ca. 7, 12 und 17 MPa für die betrachteten Teufen von 320, 500 und 900m jeweils. Der Ausbruch des gesamten Hohlraumes wird rechnerisch in einem Schritt zum Zeitpunkt null vorgenommen.

## 6.2 Rechenergebnisse und Diskussion

Die Vielzahl der durchgeführten Rechnungen führte zu einer enormen Menge von Rechenergebnissen. Exemplarisch werden im diesem Teilbericht nur die Ergebnisse für den ersten Lastfall (Auflast von 7 MPa) detailliert dargestellt und diskutiert. Die Ergebnisse von weiteren Lastfällen werden in dem gemeinsamen Projektbericht zusammen mit den Rechenergebnissen von allen Partnern dargestellt und bewertet.

Durch die Erstellung der Strecke zum Zeitpunkt null und die damit verbundenen Spannungumlagerungen werden Kriechdeformationen im Gebirge induziert, die zu Konvergenz (Schließung) des Hohlraums führen. Dabei ergab sich eine sehr hohe Streckenkonvergenzrate, was sich aus der geringen Pfeilerbreite erklärte. Abb. 39 zeigt die zeitliche Entwicklung der Vertikalverschiebungen an den Punkten **a-f** sowie die Horizontalverschiebung an Position **c** in der Umgebung des Hohlraums und im Pfeiler. Die maximalen Werte der Firstsenkung, Punkt **b** ist ca. 3.7m während die Sohlenhebung (**d**) nur 8.5 cm und die maximale Stoßverschiebung (**c**) in dem Hohlraum hinein 2.4 m nach 100 Jahren beträgt.

Um einen Eindruck über die Gesamtverformungen der Struktur im Pfeilerbereich zu gewinnen, wird in Abb. 40 das verformte Gitternetz nach 50 und 100 Jahren, gegenüber der ursprünglichen Modellgeometrie dargestellt. Dabei zeigt sich eine starke Vertikalestauchung des schlanken Pfeilers. In Abb. 41 sind die effektiven Kriechdehnungen im Pfeiler für vier repräsentative Zeitpunkte dargestellt. Deutlich sind die Kriechverzerrungen im Pfeilerbereich erheblich größer als im First- und Sohlebereich zu erkennen.

Die durch den Ausbruch der Strecke bedingten deviatorischen Spannungen führen bei Überschreitung der Gesteinsfestigkeit zur Ausbildung von Auflockerungszonen (Dilatanz) in der Umgebung des Hohlraumes (speziell im Pfeilerbereich). Die Abb. 42 zeigt die Verteilung der Dilatanz im Modell nach 10, 50 und 100 Jahren der Streckenerstellung. Es ist ersichtlich, dass mit der Zeit im Pfeiler in Stoßnähe eine Volumenverzerrung mit Werten bis zu 0.9 % entsteht, obwohl die berechneten maximalen Werte ca. 2.5% in den Streckeneckbereichen betragen. In Abb. 43 wird die Volumendehnung entlang einer Traverse zwischen den Punkten **g** und **c** an der Pfeilmittelhöhe zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.

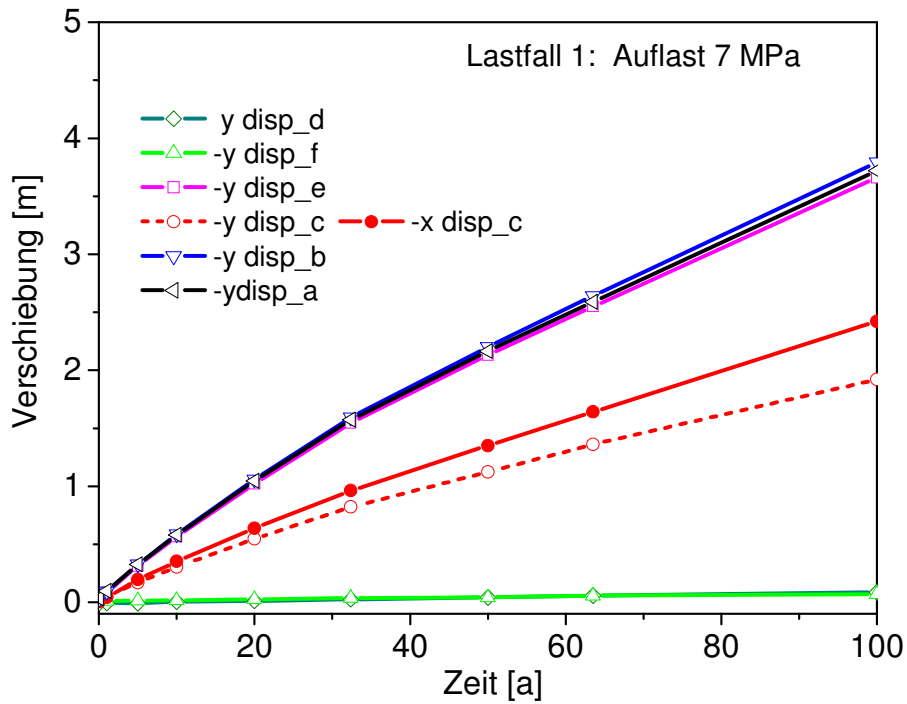


Abb. 39: Entwicklung der Vertikalverschiebungen an den Aufpunkten **a-f** und die Horizontalverschiebung des Streckenstoßes (Punkt **c**)

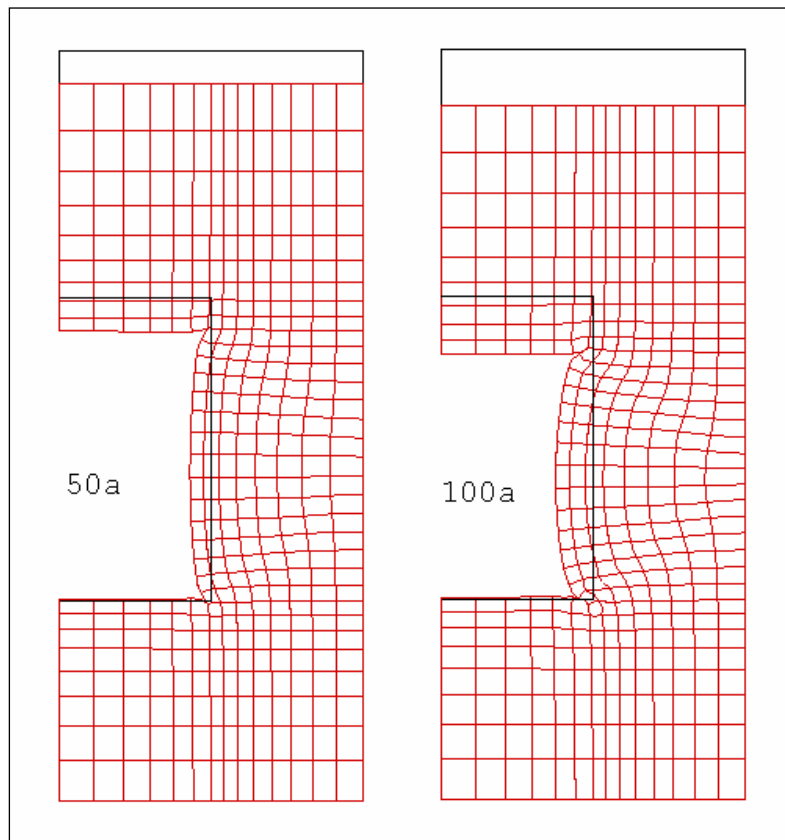


Abb. 40: Verformtes FE-Netz (rot) nach 50 und 100 Jahren und die unverformte Struktur (schwarz); der Vergrößerungsfaktor der Verformungen ist eins.

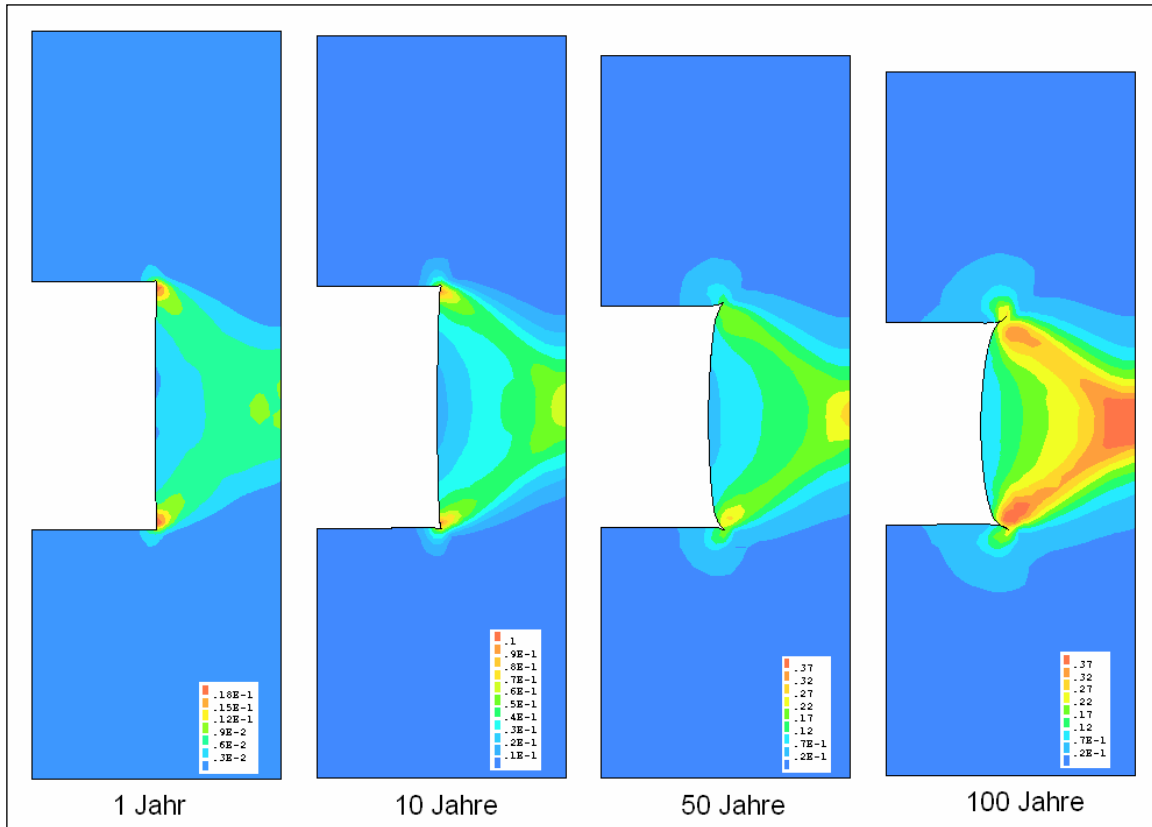


Abb. 41: Entwicklung der Effektivdehnungen im Pfeilerbereich (Lastfall 1, 7 MPa Auflast)

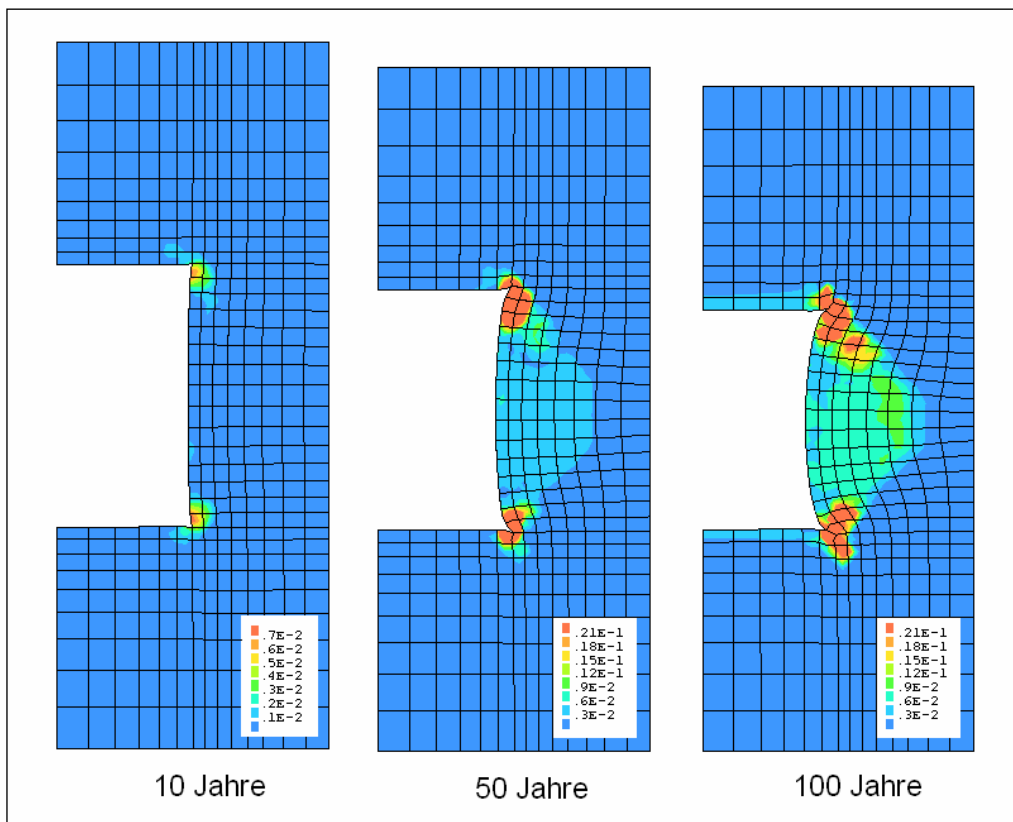


Abb.42: Entwicklung der Volumenverzerrung im Nahbereich der Strecke



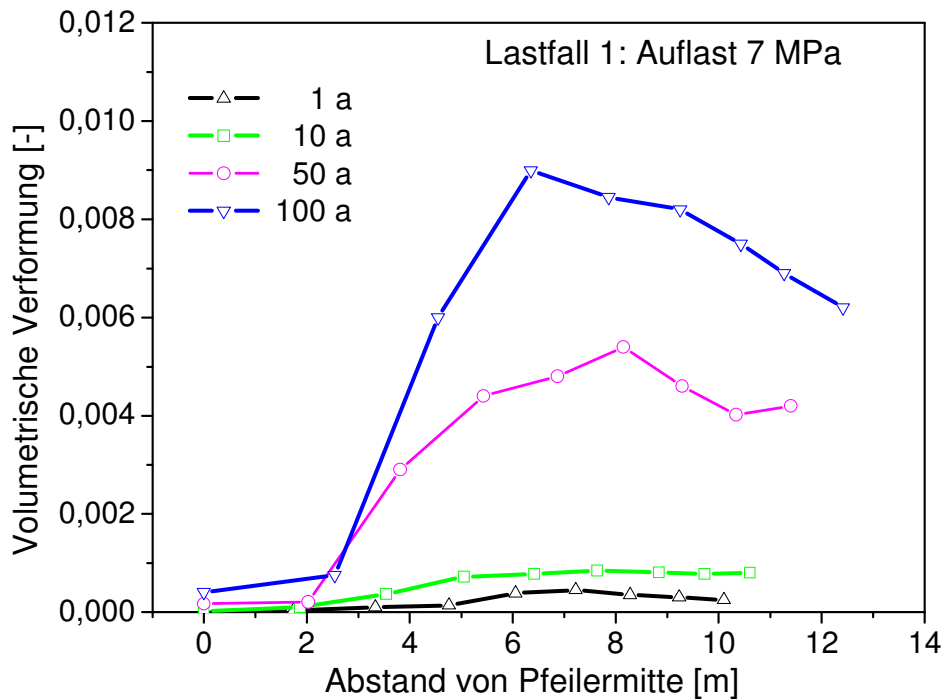


Abb. 43: Verlauf der Volumendehnung für verschiedene Zeitpunkte entlang des horizontalen Schnitts g-c

Die berechneten Verläufe der Horizontalspannungen entlang der Traverse g-c sind in Abb. 44 wiedergegeben. Man erkennt die ständige Spannungsabnahme in unmittelbarer Umgebung der Streckenkantur. Nach längeren Zeiten (ca. 50 Jahre) treten sogar Zugspannungen auf, die jedoch nicht die Zugfestigkeit des Steinsalzes überschreiten. Gleichzeitig erhöhen sich die Spannungen in Pfeilermitte. In Abb. 45 ist die Entwicklung der Vertikalspannung entlang des selben Horizontalschnittes gezeigt. Unmittelbar nach dem Ausbruch ergeben sich am Streckenstoß die höchsten Vertikalspannungen. Mit der Zeit bauen sich die Vertikalspannungen wegen der Kriechverformungen des Steinsalzes am Streckenrand ab und in Pfeilermitte auf.

Weiterhin ist in Abb. 46 die Verteilung der Effektivspannung im Nahbereich der Strecke nach vier unterschiedlichen Standzeiten gezeigt. Die Darstellung von Effektivspannung sowie der mittleren Spannungen (Abb.47) erweist sich als sinnvoll, da sie unmittelbar Rückschlüsse auf die Integritätsgefährdung des Salzpfelers zulassen. Es lässt sich auch aus diesen beiden Größen auf die Höhe der einzelnen Spannungskomponenten schließen, weil die Effektivspannung ein Maß für deren Abweichung vom mittleren Gebirgsdruck ist; wenn sie Null ist, sind alle Normalspannungen gleich groß und die Schubspannungen Null.

Am höchsten beansprucht ist lediglich der Pfeiler am unmittelbaren Streckenrand. Aufgrund dieser Rechenergebnisse lässt sich feststellen, dass bei dem Lastfall 1 mit der Auflast von 7 MPa keine kritischen Spannungszustände auftreten, die zum Versagen der Pfeiler führen können. Im Fall 2 und 3 mit einer Auflast von 12 bzw. 17 MPa tritt das Versagen des Pfeilers nach ca. 50 bzw. 7 Jahren auf.

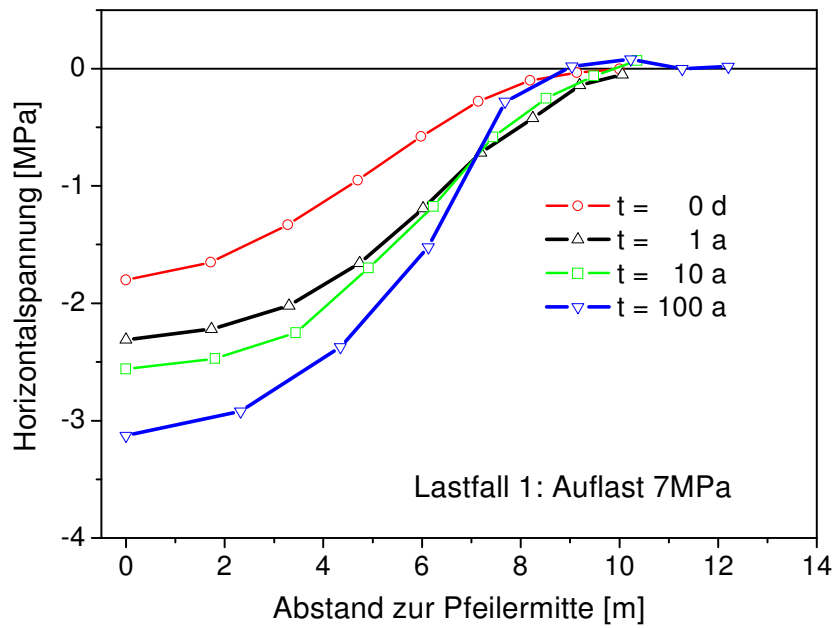


Abb. 44: Verlauf der Horizontalspannung zu verschiedene Zeitpunkte entlang des horizontalen Schnitts g-c

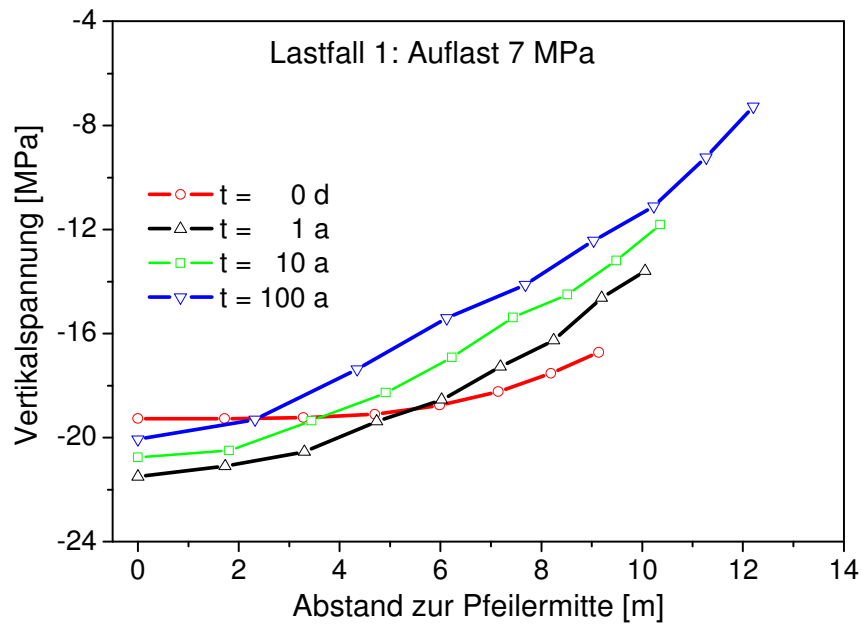


Abb. 45: Verlauf der Vertikalspannung zu verschiedene Zeitpunkte entlang des horizontalen Schnitts g-c

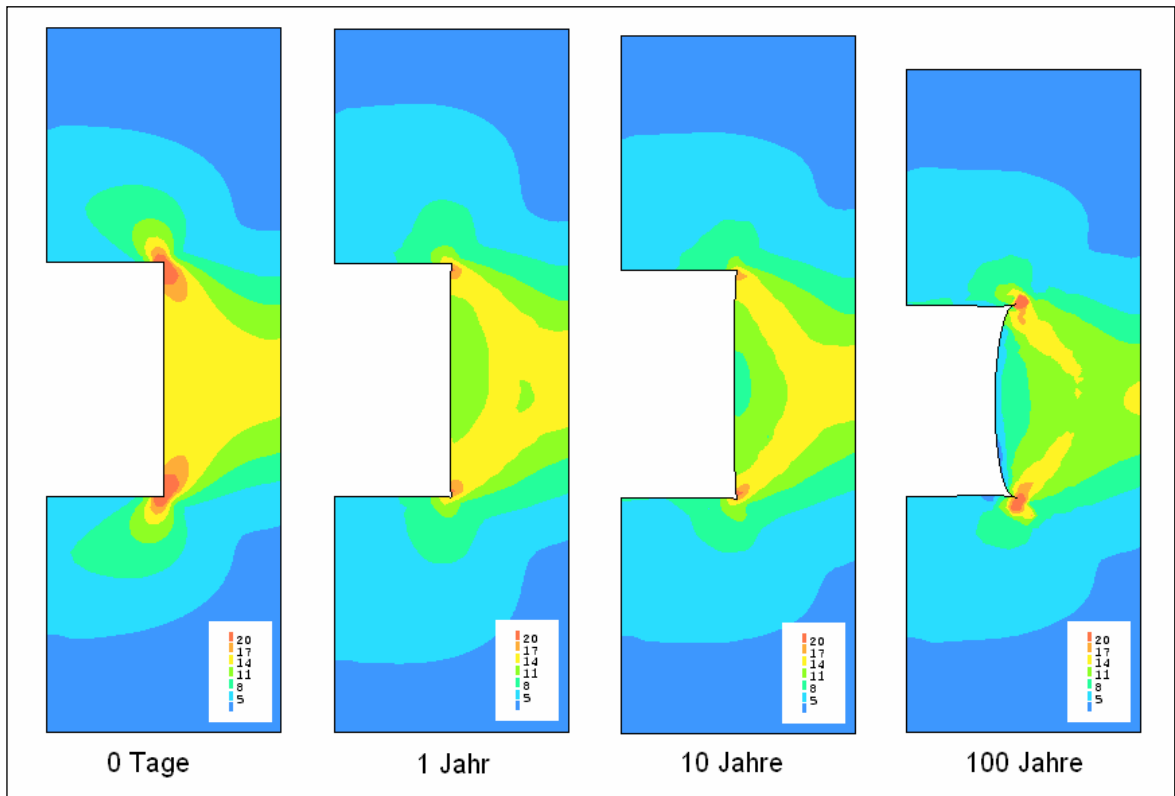


Abb. 46: Entwicklung der Effektivspannung in der Umgebung der Strecke  
(Simulation mit der Auflast von 7 MPa)

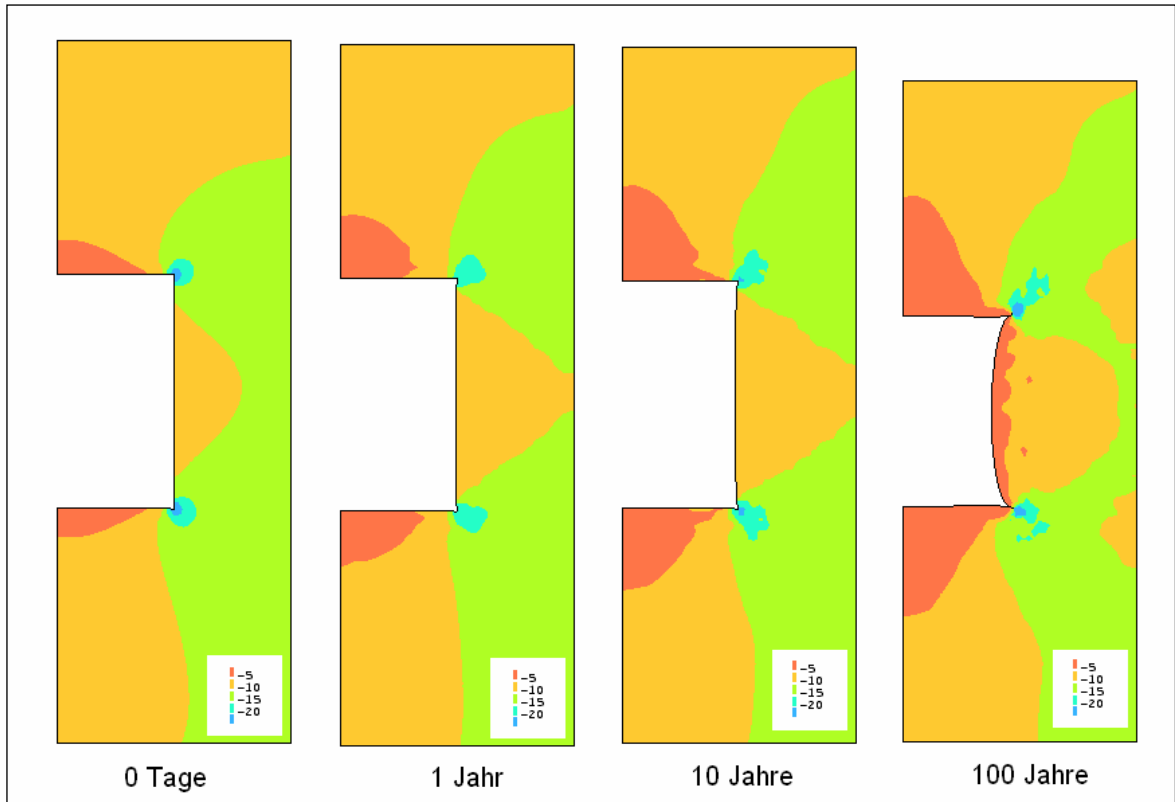


Abb. 47: Entwicklung der mittleren Spannung in der Umgebung der Strecke  
(Simulation mit der Auflast von 7 MPa)

---

## 7. Zusammenfassung

Die Berechnung der gebirgsmechanischen Beanspruchung des Steinsalzes ist ein wesentlicher Bestandteil der Sicherheitsbewertung von Untertagedeponien für chemisch-toxische Abfälle in Salzformationen. Dabei kommt den Rechenverfahren und Stoffmodellen eine zentrale Bedeutung zu. Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung und Bewertung eines möglichst allgemein anwendbaren Stoffmodells zur numerischen Simulation des komplexen mechanischen Verhaltens von Steinsalz. Dabei sollen die Phänomene Kriechen, Dilatanz, Schädigung, Bruch, Nachbruchverhalten und Verheilung berücksichtigt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden zuerst die im INE entwickelten Stoffmodelle basierend auf der Viskoplastizitätstheorie dargestellt. Durch die Simulation bzw. Nachrechnung von ausgewählten Laborversuchen (Kriech- und Festigkeitsversuchen) wurden zunächst die Stoffmodelle überprüft und die Materialparameter bestimmt. Nach dieser Anpassungsphase wurden mit Hilfe eines 2D-Modells das Verformungsverhalten und die Dilatanz der zwei Druckversuche mit Endflächenreibung nachgerechnet und die Spannungsverteilungen in Salzproben bestimmt.

Der zweite Teil der Arbeit geht auf die Anwendung der Rechenprogramme und Stoffmodelle zur Untersuchung von komplexen Untertagestrukturen ein. Zuerst wurden Rechnungen zum Konvergenzverhalten der Maschinenstrecke EU-1 im Sondershausen Bergwerk durchgeführt. Dabei wurde die Langzeitentwicklung der Auflockerungszone (Dilatanzzone) in der Umgebung der Strecke bestimmt. Der Vergleich der Rechenergebnisse und in situ Messungen (Konvergenzraten, Spannungsentwicklung sowie die Änderung der Salzpermeabilität in der Auflockerungszone) zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung und deutet auf die Richtigkeit des verwendeten Modells. Mit einem zweiten Beispiel wurde die Auflockerung und die starke Schädigung eines schlanken Pfeilers in drei unterschiedlichen Teufen für einen Zeitraum von 100 Jahren ab dem Erstellen der benachbarten Strecken oder bis zum totalen Versagen des Pfeilers berechnet.

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 Ansatz zur Beschreibung des Bruch- und Nachbruchverhaltens von Steinsalz muss in weiteren Untersuchungen verbessert und in den FE-Codes umgesetzt werden. Die Zugfestigkeit muss phänomenologisch erfasst werden.
- Prinzipiell kann das vorgeschlagene Stoffmodell die Verheilung des bereits beschädigten Materials beschreiben, jedoch ist dieser Ansatz an geeigneten Versuchen zu verifizieren und eventuell zu erweitern.
- Um die aufgetretenen numerischen Instabilitäten bei der Modellierung von komplexen Strukturen und Belastungen (wie z. B. im Falle der schlanken Pfeiler-Struktur im größeren Tiefe) zu beseitigen, müssen die vorhandenen Rechenalgorithmen weiter getestet und gegebenen Fall verbessert werden.

---

## Literatur

- [1] Wallner, M., Caninenberg, C., Gonther, H.: „Ermittlung zeit- und temperaturabhängiger mechanischer Kennwerte von Steinsalz“, Proc. 4. Int. Cong. Rock. Mech., Montreux, 1979, Vol. 1, S. 313-318, Balkema, Rotterdam.
- [2] Carter, N. L., Hansen, F. D.: „Creep of rocksalt“, Tectonophys. 92, p.275-333, 1983.
- [3] Hunsche, U., Schulze, O.: „Das Kriechverhalten von Steinsalz“, Kali und Steinsalz, Vol. 11 (8/9), S. 238-255, 1994.
- [4] Owen, D.R.J., Hinton E.: „Finite elements in plasticity: theory and practice“, Swansea: Pineridge Press, 1980.
- [5] Hein, H. J.: „Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat“, Dissertation, RWTH Aachen, 1991.
- [6] Backfilling and sealing of underground repositories for radioactive waste in salt, (Bambus-II project), Bechthold, W. et al. [ed.], Final report, EUR-20621-EN (2004).
- [7] Hunsche, U., „Strength of rock salt at low mean stress“, Geotechnik-Sonderheft, Glückauf, Essen, pp. 160-163, 1993.
- [8] Cristescu, N., Hunsche, U.: „Time Effects in Rock Mechanics“, Series: Materials, Modelling and Computation. John Wiley& Sons, 342, Chichester, UK, 1998.
- [9] Albers, G.: „MAUS - A Computer Code for Modelling Thermomechanical Stresses in Rock Salt“, in: Computer Modelling of Stresses in Rock, Proc. Tech. Session, EUR9355 EN, Brussels, 1984,
- [10] Adina R & D Inc., ADINA (Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis), Report ARD 01-9, Watertown, MA, US, 2005.
- [11] Pudewills, A., Droste, J.: „Numerical modeling of the thermomechanical behavior of a large-scale underground experiment“, Computers and Structures, vol. 81, p. 911-918, 2003.
- [12] Pudewills, A.: „Numerical Modelling of the EDZ, Development of Material Models, Implementation in Finite-element Codes, and Validation“, FZKA-7185, 2005.
- [13] Häfner, F. et al.: Abschlußbericht zum BMBF- Forschungsvorhaben „In situ Ermittlung von Strömungskennwerten natürlicher Salzgesteine in Auflockerungszonen gegenüber Gas und Salzlösungen unter der gegebenen Spannungsbedingungen im Gebirge“, IfBF der TU-Bergakademie Freiberg, 2001.
- [14] Menzel, W., Salzer, K., Wiedemann, M.: „Durchführung geotechnischer In-situ Messungen zur Charakterisierung des Standortes des geplanten Versuchsverschlüßbauwerkes in der Maschinenstrecke EU-1 der Grube Sondershausen“, IfG-Bericht, 1999.
- [15] Pfeifle, T. W., Brodsky, N. S., Munson, D. E.: „Experimental Determination of the Relationship Between Permeability and Microfracture-Induced Damage in Bedded Salt“, Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences, 35, 4-5, Paper No. 42, 1998.
- [16] Pudewills, A. (2006): „Modelling of the hydro-mechanical processes around excavations in rock salt“, Proc. of EUROCK 2006, Liege, Belgium, Eds.: A. Van Cotthem et al.; Taylor & Francis Group, London, pp. 527-530, 2006.