



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7708

# **Modellrechnungen zum thermo- mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz**

BMW i - Verbundprojekt

Ergebnisbericht zum Teilprojekt 3 - 02E10840

Alexandra Pudewills



Alexandra Pudewills

**Modellrechnungen zum thermomechanischen Verhalten  
und zur Verheilung von Steinsalz**

BMW - Verbundprojekt

Ergebnisbericht zum Teilprojekt 3 - 02E10840

**Karlsruhe Institute of Technology**  
**KIT SCIENTIFIC REPORTS 7708**

# Modellrechnungen zum thermo- mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz

BMWi - Verbundprojekt  
Ergebnisbericht zum Teilprojekt 3 - 02E10840

von  
Alexandra Pudewills

## Report-Nr. KIT-SR 7708

Gefördert durch



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Betreut vom



**PTKA**  
**Projektträger Karlsruhe**  
Karlsruher Institut für Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Vorhaben wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02E10840 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts liegt bei dem Autor.

### Impressum



Scientific  
Publishing

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe  
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License  
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2016

ISSN 1869-9669

ISBN 978-3-7315-0542-6

DOI: 10.5445/KSP/1000055540

# **BMW-Verbundprojekt: Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz**

## **Kurzfassung**

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 Vorgehensweisen für die Ermittlung charakteristischer Kennwerte und die numerische Behandlung anspruchsvoller Simulationsaufgaben entwickelt und angewendet worden.

Das BMW-Verbundprojekt mit einer Laufzeit vom 01. 10. 2010 bis 30. 07. 2016 setzte sich aus mehreren Benchmark-Übungen zusammen und die Durchführung erfolgte in drei distinkten Phasen. Die Problemstellung des Benchmarks entwickelte sich von der Verifikation der Rechenprogramme und Stoffmodelle bis zur Bewertung der Prognoserechnungen durch Vergleich mit den Ergebnissen thermo-mechanischer in situ Versuche.

Hauptziel des Projekts war die Ermittlung des aktuellen Standes der Rechenprogramme zur Modellierung des Verhaltens von Salz bei der Endlagerung von wärmeproduzierenden Abfällen in Salzformationen. In diesem Verbundprojekt führt jeder Partner mit seinem Stoffgesetz und Programmsystem Rechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung sowie zur Schädigungsrückbildung und Verheilung in einer realen Untertagestruktur im Steinsalz durch. Im Vordergrund standen die Simulation von thermo-mechanischem Verhalten und die Verheilung von Steinsalz. Das Projekt diente einer realitätsnäheren Einschätzung der Stoffgesetzfähigkeiten im Hinblick auf deren Einsatz bei der praktischen Anwendung der Berechnung und Sicherheitsbewertung von Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle im Steinsalz. Die Arbeit wurde außerdem durch eine Reihe von spezifischen Laborversuchen vervollständigt.

An diesen Vergleichsrechnungen nahm das Karlsruher Institut für Technologie mit dem Programmsystem ADINA teil. Die erzielten Ergebnisse und die dabei gewonnenen Erfahrungen werden im Bericht detailliert dargestellt. Ein Vergleich der repräsentativen Rechenergebnisse mit den Ergebnissen der fünf anderen Projektpartner soll in einem gemeinsamen Synthesbericht präsentiert und diskutiert werden.

# **Joint Project on the Comparison of Constitutive Models for Rock Salt: Comparison of current constitutive models and modeling procedures on the basis of calculations of the thermomechanical and healing behavior of rock salt**

## **Abstract**

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 October 2010 and March 2016, the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (German abbreviation BMWi) has funded a joint project within its research program "Improvement of tools for the safety assessment of underground repositories". The aim of benchmark calculations was to check the ability of the involved models to describe the temperature influence on deformation and the damage and dilatancy reduction and healing of rock salt.

At the Institut für Nukleare Entsorgung (INE), of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) the Finite-Element code ADINA was 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 code.

This report presents the results obtained by the INE team within the BMWi 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

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Stoffgesetz für das thermomechanische Verhalten von Steinsalz</b>	<b>3</b>
<b>3. Simulation von ECN- In situ Versuche</b>	<b>9</b>
3.1 Numerische Simulation des IFC-Versuchs	10
3.2 Numerische Simulation des HFC-Versuchs	12
<b>4. Dammjoch Modell in der Schachanlage Asse II</b>	<b>19</b>
4.1 Modellierung der Laborversuche am Asse-Steinsalz	20
4.2 Simulation der „Dammjoch“ - Strecke in der Schachanlage Asse	21
<b>5. Modellierung von In-situ-Situationen im Endlager WIPP</b>	<b>27</b>
5.1 Parameterbestimmung und Nachrechnung der Laborversuche	27
5.2 Simulation „Room D“	32
5.3 Simulation „Room B“	36
<b>6. Zusammenfassung</b>	<b>41</b>
<b>7. Literatur</b>	<b>43</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>45</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>45</b>



# 1. Einleitung

Aussagen zur Standsicherheit von Endlagerstrukturen erfordern zuverlässige Prognosen über die langzeitigen thermischen und mechanischen Auswirkungen im Endlager. Dies kann nicht versuchsmäßig nachvollzogen werden, sondern ist nur auf rechnerischem Wege möglich. Unter diesem Aspekt gewinnt die Verifikation und Weiterentwicklung der Rechenmodelle und Verfahren eine entscheidende Bedeutung. In diesem Sinne wurde zwischen Oktober 2010 und März 2016 das BMWi-Verbundprojekt „Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz“ organisiert [Hampel et al., 2010].

An diesem Verbundprojekt, beteiligen sich sechs vom BMWi geförderte deutsche Teilnehmer sowie die Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico (USA) als assoziierter, nicht vom BMWi finanzierter Partner [Hampel et al., 2013]. Das Vorhaben verfolgt das Gesamtziel, Instrumentarien für die Nachweise zur sicheren und dauerhaften Endlagerung wärmeentwickelnder, hochradioaktiver Abfälle im Steinsalz zu überprüfen und zu verbessern. Dazu gehören Stoffgesetze zur Beschreibung des thermo-mechanisch-hydraulischen Verhaltens von Steinsalz. Die hier untersuchten Instrumentarien bestehen aus Stoffgesetzen der Projektpartner, die zur Durchführung von Modellberechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz-, Schädigungs- und Permeabilitätsentwicklung in der Umgebung eines untertägigen Endlagers benötigt werden. Im Hinblick auf die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle wird die Modellierung des Temperatureinflusses auf die Verformung des Wirtsgesteins, das heißt die Beschreibung des thermo-mechanischen Verhaltens, untersucht und verglichen. Einen wichtigen Schwerpunkt der Untersuchungen bildet die Simulation der Schädigungsrückbildung („Verheilung“), die für Berechnungen von Schacht- und Streckenverschlüssen und die Bewertung des dauerhaft sicheren Einschlusses der Abfälle von großer Bedeutung ist.

In diesem BMWi-Verbundprojekt führte jeder Partner mit seinem Stoffgesetz und Programmsystem Benchmark-Modellberechnungen zur Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung in einer realen Untertagestruktur im Steinsalz durch. Im Vordergrund stand dabei das thermo-mechanische Verhalten und die Schädigungsrückbildung (Verheilung). Das Projekt diente einer realitätsnäheren Einschätzung der Stoffgesetzfähigkeiten im Hinblick auf deren Einsatz bei der praktischen Anwendung der Berechnung und Sicherheitsbewertung von Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle im Steinsalz. Diese Arbeiten wurden im Verbund in mehreren Phasen mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt:

## ECN- in situ Versuche

Zuerst führt jeder Partner mit seinem Stoffgesetz und Programmsystem Nachrechnungen spezifischer Laborversuche und gekoppelte Benchmark-Modellberechnungen zweier ausgewählter Untertagestrukturen im Steinsalz der Schachtanlage Asse II durch. Zum Temperatureinfluss werden In-situ Erhitzer Experimente nachgerechnet, die die niederländische

Energy Research Foundation ECN Anfang der 1980er Jahre in einem 300 m tiefen, vertikalen Bohrloch (Durchmesser 31,5 cm) durchgeführt hat [Doeven et al., 1988]. Besondere Aufmerksamkeit wurde dem Vergleich der thermomechanischen Rechnungen mit den in situ Messungen gewidmet. Für die salztypspezifische Kennwertermittlung wurden Laborversuche durchgeführt und mit den Stoffgesetzen modelliert.

#### Untertagestruktur „Dammjoch“

In dem zweiten Teil des Projekts wurde die Entwicklung der Auflockerungszone um die Dammjoch-Strecke in der Asse simuliert [GRS, 2001]. Infolge der Spannungsaufnahme beim Auflaufen des Salzgebirges auf einen Betonverschluss (Dammjoch) wird die Auflockerungszone allmählich wieder abgebaut, d.h. die langsame Verheilung findet statt. Zur Unterstützung der salztypspezifischen Kennwertermittlung und zur Überprüfung der Stoffgesetzmodule zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung wurden außerdem eine Reihe von spezifischen Laborversuchen im Projekt durchgeführt und mit den Stoffgesetzen nachgerechnet. Die Ergebnisse der Partner werden jeweils miteinander sowie mit den Messergebnissen verglichen

#### Untertagestrukturen „Room B“ und „Room D“ in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)

In der letzten Phase des Verbundprojekts wurden zwei horizontale Strecken in einer Teufe von 646 m unter der Tagesoberfläche, die durch einen 79 m breiten Steinsalzpfiler thermisch voneinander isoliert waren untersucht. „Room B“ besteht aus einer Strecke, bei der das umgebende Steinsalz in einem zentralen Abschnitt durch in Bohrlöchern in der Sohle angeordnete Erhitzer Elemente bis auf eine Temperatur von ca. 120°C aufgeheizt wurde [Munson et al., 1988]. „Room D“ ist eine unbeheizte Referenzstrecke, in der bei den natürlichen Gebirgstemperatur Vergleichsmessungen durchgeführt wurden [Munson et al., 1990]. Bei den Modellierungen der quadratischen WIPP-Strecken ist den Temperatureinfluss auf die Dilatanz- und Schädigungsentwicklung zu berücksichtigen. Aufgrund des andersartigen Verhaltens des WIPP-Steinsalzes wurden zunächst spezifische Laborversuche zum thermomechanischen Verformungsverhalten der beiden Hauptsalztypen „clean salt“ und „argillaceous salt“ durchgeführt und dann nachgerechnet um die vorhandenen Stoffgesetzparameter anzupassen. Das individuelle Verhalten verschiedener Steinsalztypen wurde dabei über die Kennwerte für die Modellparameter berücksichtigt.

Das Institut für Nukleare Entsorgung (INE) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), beteiligte sich mit dem Finite Element Programmsystem ADINA [www.adina.com] sowie mit eigenen Stoffgesetzen von Steinsalz die bereits in früheren Verbundprojekten entwickelt und getestet wurden [Pudewills, 2011; Hampel et al., 2012]. Dieser aktuelle Teilbericht, stellt die detaillierten Rechenergebnisse des INE zum BMWi-Verbundprojekt, mit Förderkennzahl 02E10840 dar. Ein Vergleich der repräsentativen Rechenergebnisse mit den Ergebnissen von den fünf anderen Projektpartnern soll in einem gemeinsamen Synthesebericht präsentiert und diskutiert werden.

## 2. Stoffgesetz für das thermomechanische Verhalten 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 WIPP Untertagestrukturen, Room D und B werden anschließend beschrieben. Durch Nachrechnung von zahlreichen Kriech- und Festigkeitsversuchen werden die nötigen Parameter ermittelt.

Das Verformungsverhalten von Steinsalz lässt sich als temperaturabhängig, elastisch-viskoplastisch beschreiben. Die elastische Verformung wird unter Anwendung des Hooke'schen Gesetzes beschrieben, sie wird im Folgenden nur erwähnt, wenn in dem betrachteten Aufgabenproblem ein Schädigungseinfluss auch auf die reversible elastische Verformung berücksichtigt wird.

In Fortführung der bisherigen Verbundprojekt-Arbeiten zur Stoffgesetzentwicklung, die insbesondere das isotherme Kriechverhalten und Dilatanz (Volumetrische Verformung, Schädigung) zum Gegenstand hatten [Hampel et al., 2010], wird aufbauend auf [Pudewills, 2012] eine Formulierung für thermo-mechanische Verhalten von Steinsalz mit eingetretener Verheilung betrachtet. Zum Verständnis diese Verformungsphänomene wurden triaxiale Laborversuche durchgeführt. In Abbildung 2.1 sind die Spannungsbereiche, die für Steinsalz Auflockerung (Dilatanz) oder Kompaktion (Verheilung) zur Folge haben, dargestellt.

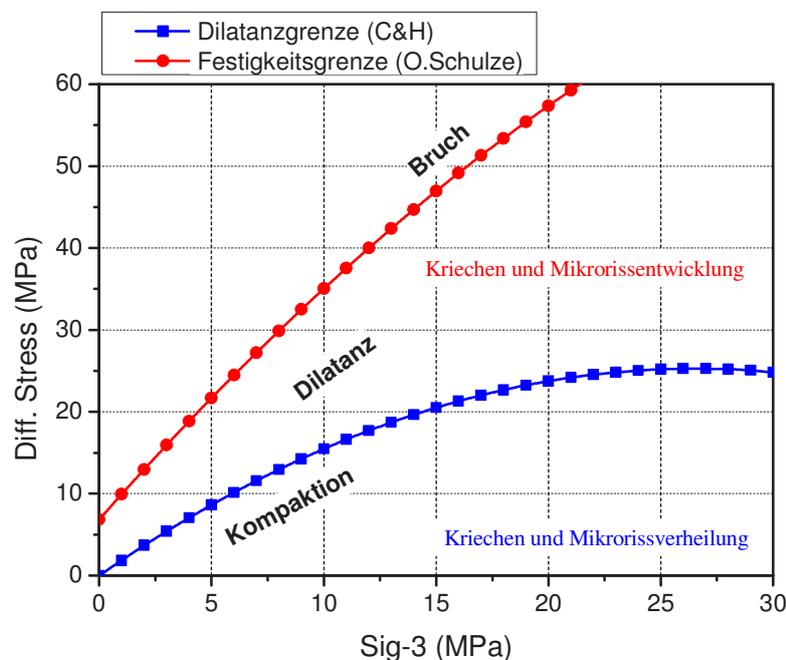


Abb. 2.1 Spannungsdiagramm für Steinsalz zur Darstellung der Bedingungen, unter denen die Verformungsphänomene auftreten [Hunsche & Schulze, 2005].

Beim unseren KIT-Modell handelt es sich um ein elasto-viskoplastisches Stoffgesetz [Pudewills 2007], die totale Verformungsrate ergibt sich demnach wie folgt:

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

### Das elastische Materialverhalten

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

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

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.

### Das viskoplastische Materialverhalten

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 volumetrischen Verformungen (Dilatanz, Kompaktion) 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:

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

$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$  Tensor der viskoplastischen Dehnungsrate

F Fließbedingung

$$\langle \Phi(F) \rangle \quad \text{Funktion:} \quad \begin{cases} \langle \Phi(F) \rangle = 0 & \text{für } F \leq 0 \\ \langle \Phi(F) \rangle = \Phi(F) & \text{für } F > 0 \end{cases} \quad (4)$$

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

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

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.

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

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

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 Projekts mit Hilfe eines Zeitverfestigungsansatzes wie folgt beschrieben:

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

mit  $a_0$ ,  $a_1$  und  $a_2$  sind Materialparameter.

Die Temperatur- und die Spannungsabhängigkeit wird analog zum sekundären Kriechen angenommen. Nach sehr langen Kriechzeiten geht diesen 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:

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

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  $\epsilon_{vol} = \epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}$

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

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

mit

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

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

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

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

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

Diese Formulierung wurde von [Cristescu & Hunsche, 1996] ausführlich beschrieben und beruht auf Laborversuchen an Steinsalzproben aus der Asse- bzw. Gorleben-Salzformation. Unterhalb der Dilatanzgrenze befindet sich der Kompaktionbereich (Verheilung), bei dem die Volumendehnung gleich null ist.

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

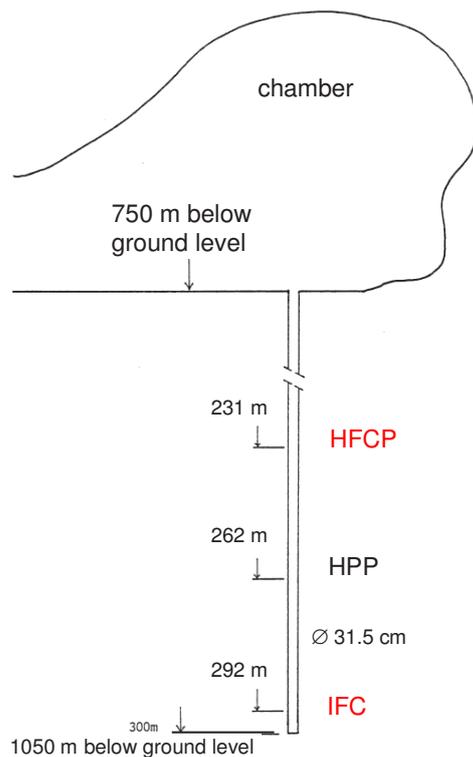
Tab. 2.1 Physikalische Eigenschaften von Steinsalz verwendet in der ADINA- Analyse

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
Sekundäres Kriechen	$\dot{\epsilon}_{ij}^{sc} = a_0 \cdot \sigma_{eff}^n \cdot \exp(-Q_c / RT)$	a <sub>0</sub> = 0.57 ; n = 5.1; Q <sub>c</sub> /RT = 6575
Transientes Kriechen	$\dot{\epsilon}_{ij}^{tr} = a_0 \cdot \sigma_{eff}^n \cdot \exp(-Q_c / RT) \cdot [1 + a_1 \cdot t^{(a_2-1)}]$	a <sub>0</sub> = 0.015 1/d; a <sub>1</sub> = 240; a <sub>2</sub> = 0.112; Q <sub>c</sub> /RT = 6495
Dilatanz und Schädigung	$\dot{\epsilon}_{ij}^d = A \cdot \exp(-Q_c / RT) \cdot (F^d)^m \cdot \frac{\partial F^d}{\partial \sigma_{ij}}$ $F^d(p, q) = n_1 \cdot p^2 + n_2 \cdot q^2$ $n_1 = c_1 \cdot \left( \frac{q^2}{p^2} - c_2 \cdot \frac{\eta_0 + \epsilon_{vol}}{1 + \epsilon_{vol}} \right)$ $n_2 = 1 - c_3 \cdot n_1 \cdot \frac{p^2}{q^2}$	m = 2.25; c <sub>1</sub> = 0.3; c <sub>2</sub> = 400; c <sub>3</sub> = 2; η <sub>0</sub> = 0.02%
Healing / Sealing	$\dot{\epsilon}_{ij}^h = A \cdot \exp(-Q_c / RT) \cdot (F^h)^m \cdot \frac{\partial F^h}{\partial \sigma_{ij}}$ $F^d(p, q) = h_1 \cdot p^2 + h_2 \cdot q^2$ $h_1 = a / (((\epsilon^d / \epsilon_{vol})^c - 1) / \epsilon_a^c + d)^m$ $h_2 = b \cdot h_1 + 1$	ε <sub>a</sub> : initial volumetric strain at start of healing / sealing a, b, c, d, m are fitting parameters: a = 0.0165 b = 0.8 c = 0.1  m = 2.25 d = 0.0003 (Vorläufig)

### 3. Simulation von ECN- In situ Versuche

Zum thermomechanischen Verhalten des Steinsalzes wurden In-situ Erhitzerexperimente der niederländischen Energy Research Foundation (ECN) in einem 300 m tiefen Bohrloch in der Schachtanlage Asse-II simuliert. Sofort nach dem Bohren Ende 1979 zwischen 750 und 1050 m Teufe erfolgten im Bohrloch zunächst für 800 Tage Konvergenzmessungen in verschiedenen Bohrlochtiefen bei der Umgebungstemperatur von ca. 42 °C [Doeven et al, 1983]. Anschließend wurden mit elektrischen Erhitzern unterschiedliche Temperaturen bis maximal 136 °C erzeugt. In verschiedenen Bohrlochtiefen wurde die Konvergenz bzw. der Druckaufbau gemessen [Vons, 1984] (Abb. 3.2). Ziel der thermomechanischen Nachrechnungen der ECN-Experimente war, den Entwicklungsstand der Rechenprogramme und Stoffgesetze zum Erfassen der durch thermische Belastung hervorgerufenen Verformungen (Kriechen, Dilatanz und Verheilung) sowie die Spannungen zu zeigen. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden mit den Partnern untereinander und auch mit den ECN-Messungen im Bohrloch verglichen.

Sketch showing the in situ Dutch Experiments



#### HFC (Heated Free Convergence)

3m- lange Erhitzermesssonde mit  
Wärmeleistung ~1714 W/m  
Messung: Temperaturentwicklung  
und Bohrlochkonvergenz  
Tiefe im Bohrloch 231m

#### HPP (Heated Pressure Probe)

Erhitzermesssonde mit Wärmeleistung  
~1572 W/m  
Messung: Temperaturentwicklung und  
Druckbelastung auf der Verrohrung  
Tiefe im Bohrloch 262m

#### IFC (Isothermal Free Convergence)

Messung: Konvergenzmessung über  
~1200 Tage  
Tiefe im Bohrloch 292m  
Gebirgsdruck: 17, 21 und 24 MPa

Abb. 3.1 Anordnung der betrachteten ECN-Versuchen in 300m tiefe Bohrloch in der Asse Schachtanlage II.

### 3.1 Numerische Simulation des IFC-Versuchs

Beim ersten in situ Versuch, IFC (Isothermal Free Convergence) wurde die Konvergenz des 300m tiefen Bohrlochs am verschiedenen Teufen über einem Zeitraum von ca.1200 Tagen gemessen. Mit dem Programm ADINA wurden sowohl ein 2D- als auch ein 3D – Modell untersucht. Das verwendete Rechenmodell bildet einen zylindrischen Bereich von 20 m Außenradius um einen 155 mm Bohrlochradius ab. Abbildung 3.1.1 zeigt exemplarisch das verwendete FE-Modell in der Umgebung des Bohrlochs.

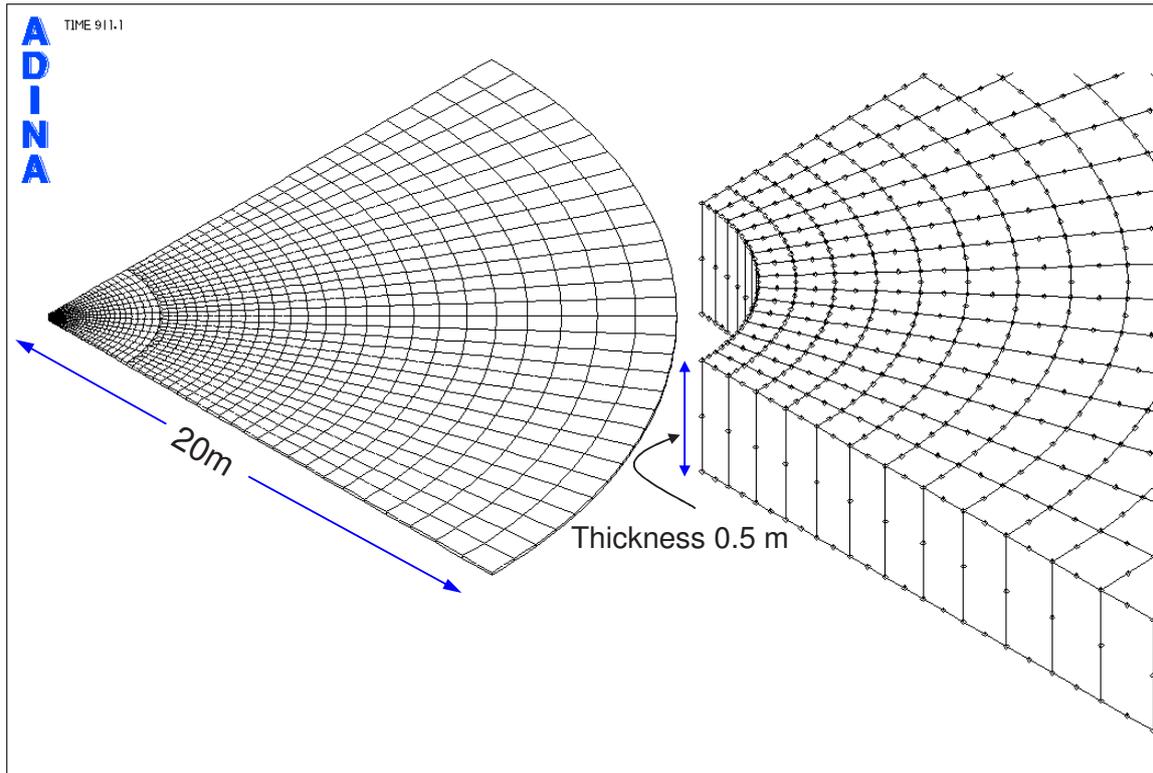


Abb. 3.1.1 IFC-Test: FE-Netz für 3D Rechnung.

Die Rechnungen wurden unter der Annahme eines lithostatischen Druckes von 21 MPa bzw. 24 MPa und mit den vorhandenen Stoffkennwerten für Asse-Steinsalz durchgeführt. Die großen Unterschiede zwischen den Rechenergebnissen und den in situ Messungen zeigen, dass die vorhandenen Kriechdaten für Asse Steinsalz neu angepasst werden müssen. Dabei wurde das vorhandene Kriechgesetz neu angepasst an die in situ gemessenen Konvergenzen über einen Zeitraum von 900 Tagen. In Abb. 3.1.2 sind für einen Gebirgsdruck von 21 MPa die Rechenergebnisse und die Messungen vergleichend dargestellt. Die Übereinstimmung ist bemerkenswert, nachdem die Kriechparameter angepasst wurden. Die zeitliche Entwicklung der Bohrlochkonvergenz für zwei Modelle und die Verschiebung in der radialen Entfernung im Salz von einem Meter sind exemplarisch in Abb. 3.1.3 dargestellt.

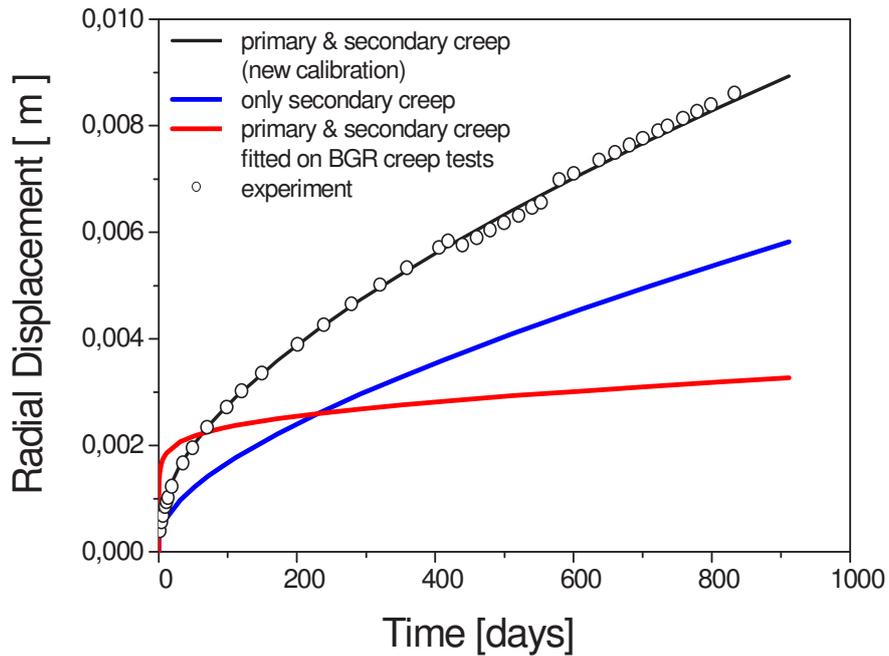


Abb. 3.1.2 Zeitlicher Verlauf der Bohrlochkonvergenz für verschiedene Kriechgesetze bei einem Gebirgsdruck von 21 MPa.

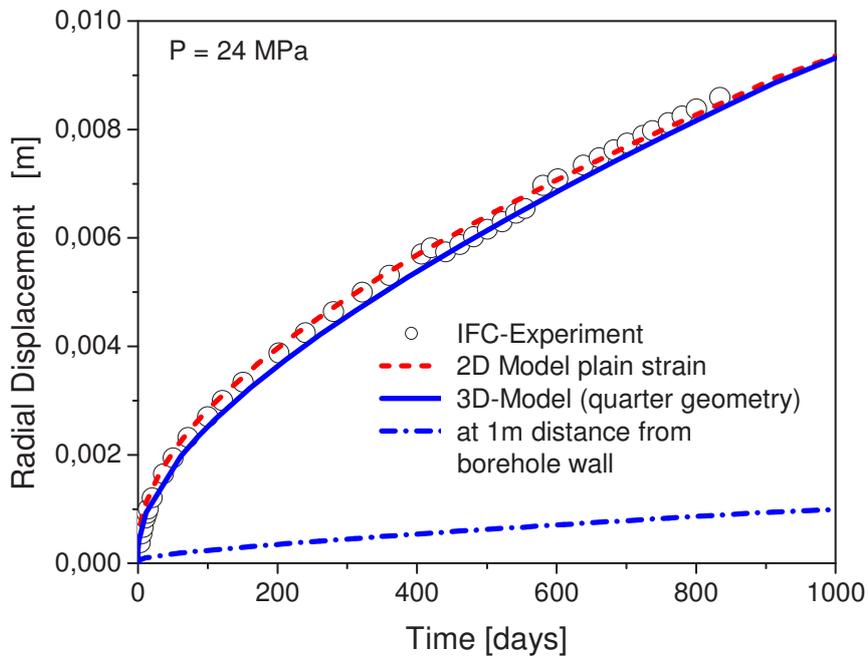


Abb. 3.1.3 IFC-Versuch : Zeitlicher Verlauf der Bohrlochkonvergenz für verschiedene Modelle.

### 3.2 Numerische Simulation des HFC-Versuchs

Zur Untersuchung der thermisch induzierten Bohrlochkonvergenzen wurde der Erhitzerver- such HFCP (Heated Free Convergence Probe) durchgeführt, bei dem neben der Temperatur auch die Bohrlochkonvergenz gemessen wurden. In diesem Versuch wurde eine 3m lange Erhitzermesssonde mit einer Wärmeleistung von ca. 1700 W/m verwendet. Dabei wurden die Temperaturentwicklung und die Bohrlochkonvergenz an der Bohrlochwand über 22 Tage gemessen. Die Geometrie und die Randbedingungen für die thermomechanische Nach- rechnung dieses Versuchs wurden zusammen mit den Partnern festgelegt.

Weiterhin wurde auch ein 3D Finte-Element Modell für ein Viertel der Versuchsgeometrie und der Erhitzersonde hergestellt und analysiert (Abb. 3.2.1). Wegen der angenäherten Ver- tikalsymmetrie des Versuchsfeldes (ohne Berücksichtigung des geothermischen und lithosta- tischen Gradienten) wurde zunächst nur die obere Hälfte der Erhitzer und der Bohrung mo- delliert. Die Temperaturentwicklung im Versuchsfeld und die hervorgerufenen thermomecha- nischen Effekte wurden mit dem Programmsystem ADINA gekoppelt berechnet. Ziel war, das gekoppelte thermo-mechanische Rechenverfahren in ADINA weiter zu testen. Für die Berechnungen wurde eine räumlich konstante Anfangstemperatur von 40 °C angenommen. Die Daten zur Temperaturrechnung (Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität) des Steinsalz- zes wurden wie in [Lowe & Knowles, 1989] gewählt und sind in Tabelle 3.2.1 dargestellt.

Der Vergleich dieser Rechenergebnisse mit den gemessenen Temperaturen an zwei typi- schen Messstellen wird in Abb. 3.2.2 gezeigt. Abb. 3.2.3 stellt die gemessenen und auch die berechneten Konvergenzen auf halber Höhe der Wärmequelle dar. Um die Entwicklung der Spannungszustände im Salz in der Umgebung des Bohrlochs zu zeigen, werden in den Abb. 3.2.4 und 3.2.5 die Flächen-Plots des Temperaturfeldes, die minimalen Normal- und effektiven Spannungen zum Zeitpunkt 19 Tage nach Versuchsbeginn dargestellt.

Abschließend wurde dabei festgestellt, dass die Güte des Ergebnisses einer dreidimensiona- len gekoppelte thermo-mechanische Modellrechnung entscheidend von der gewählten Ele- ment-Diskretisierung abhängt und daher wurde dieser Einfluss auf die Simulationsergebnis- se nicht weiter untersucht.

Tab. 3.2.1 Zusammenstellung der Materialparametern von Steinsalz für Temperaturrechnung

Temperature	0 °C	50 °C	100 °C	150 °C	200 °C
Thermal Conductivity [W/m°C]	5.734	4.886	4.18	3.621	3.202
Heat Capacity [J/kg°C]	850	860	868	877	885
Salt Density [kg/m <sup>3</sup> ]	2187				

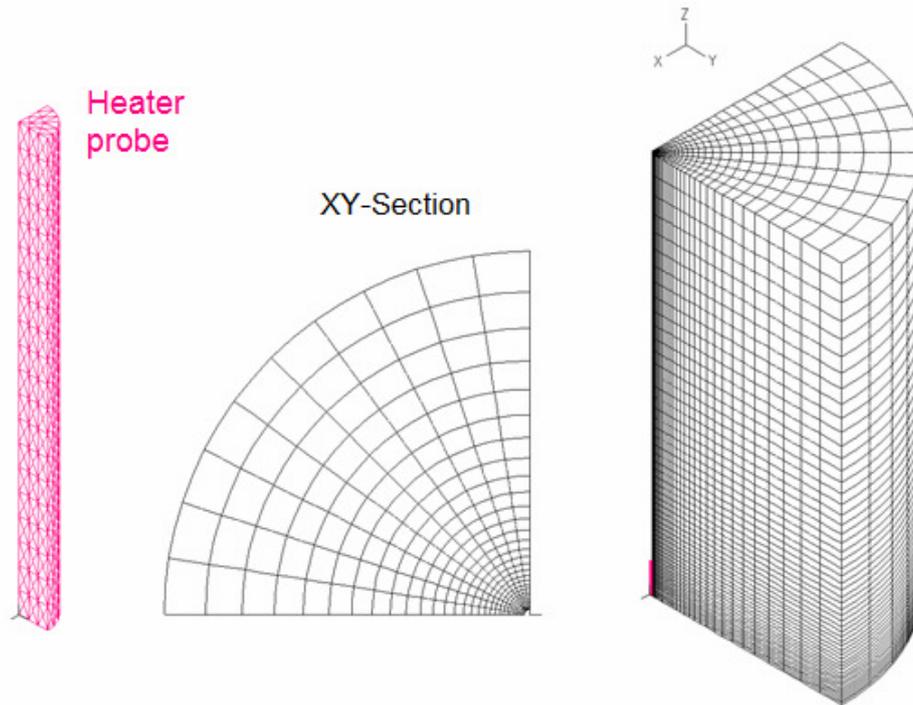


Abb. 3.2.1 Darstellung des 3D-Modells für die gekoppelte thermo-mechanische Berechnung des HFC - Experiments in einer Tiefe von 231 m in Bohrloch. Das Modell stellt einen Viertel der Versuchsgeometrie dar. Der Erhitzer wurde als Monolith modelliert, der Luftspalt zwischen Bohrlochwand und Erhitzer wurde gleich 5 cm angenommen.

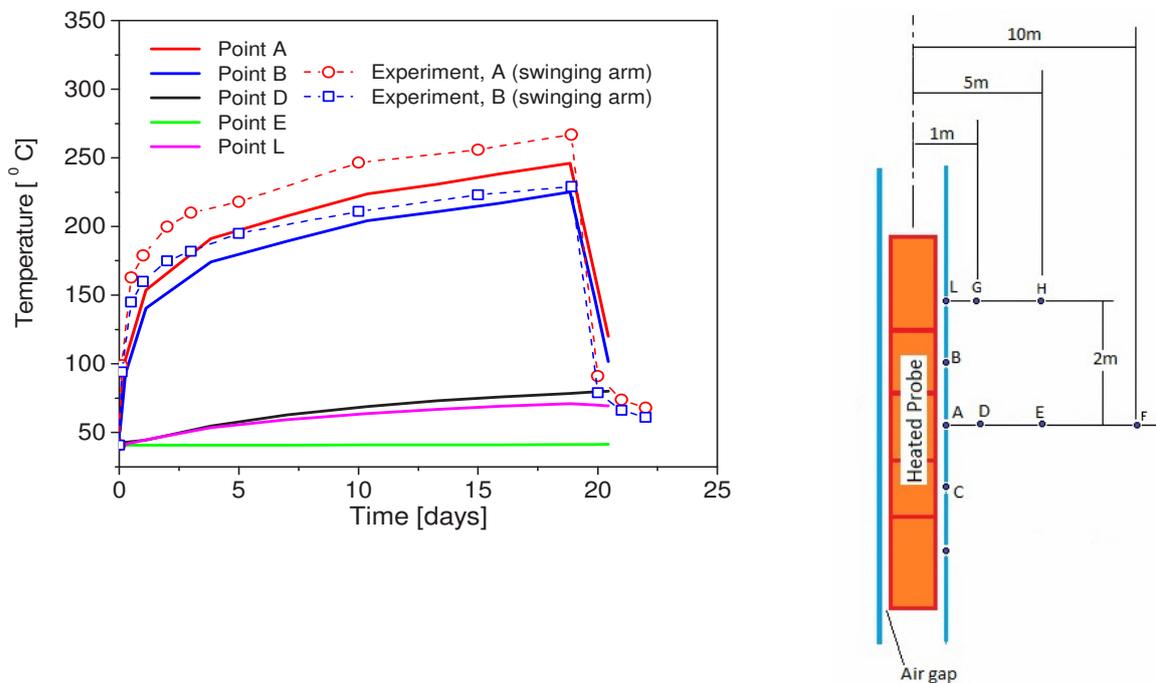


Abb. 3.2.2 HFC-Versuch: Vergleich der Temperaturentwicklung an verschiedenen Positionen im Salz mit in situ Messergebnissen am Erhitzerarm.

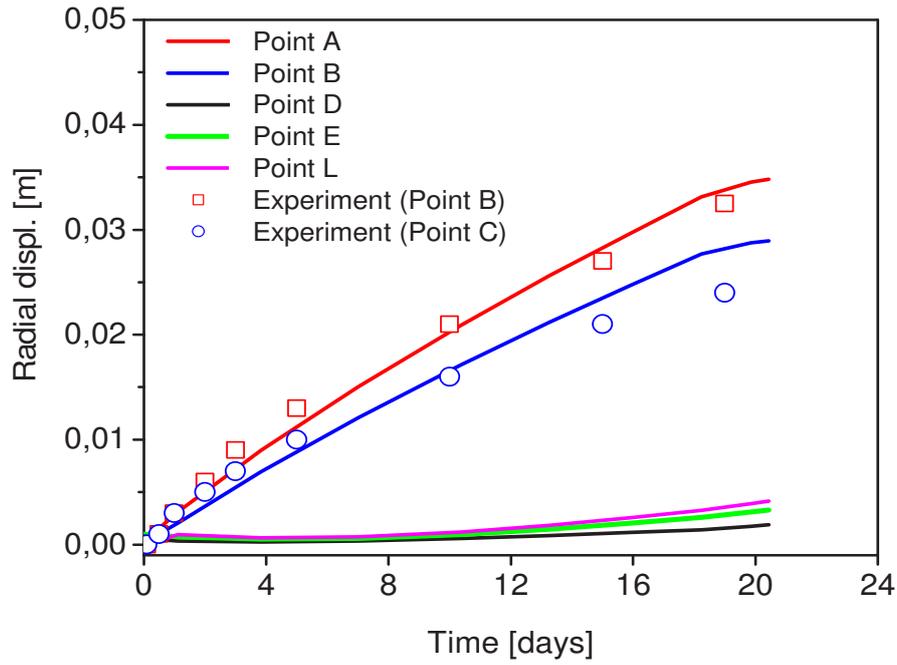


Abb. 3.2.3 Vergleich berechneter und gemessener Bohrlochkonvergenzen an verschiedenen Positionen im Salz

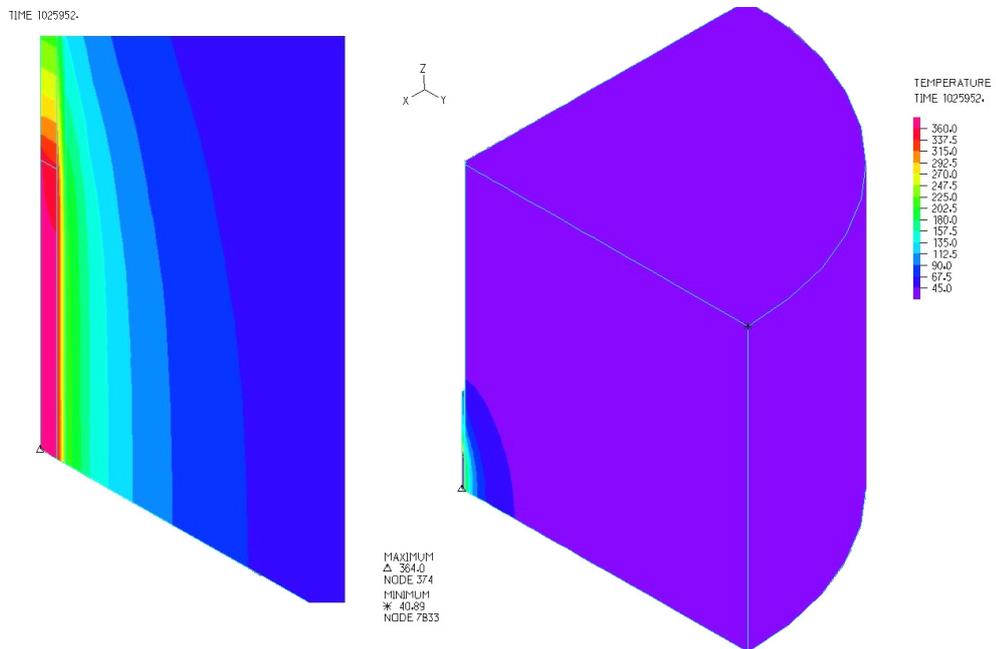


Abb. 3.2.4 Berechnete Verteilung des Temperaturfeldes nach 18 Tagen thermischer Belastung. Links ist eine detaillierte Darstellung des Erhitzer-Bereiches.

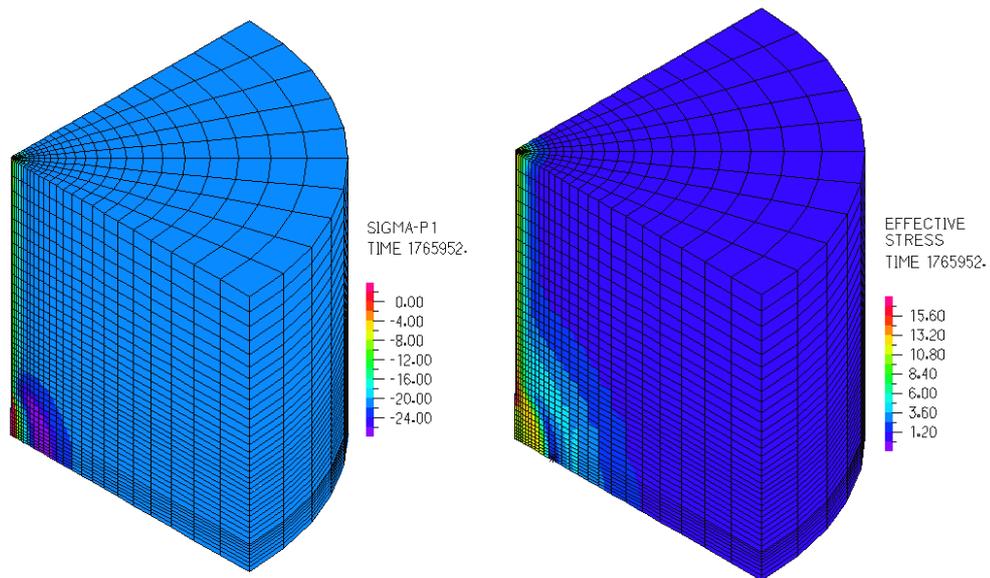


Abb. 3.2.5 Berechnete Verteilung der minimalen Hauptspannung und Effektivspannung nach 19 Tagen thermischer Belastung.

Nachdem mehrere Laborversuche an Asse-Speisesalz vorlagen, wurde die Nachrechnung von neueren Kriechversuchen mit Last wechseln und mit erhöhten Temperaturen simuliert, um die vorhandenen Kriechparameter neu anzupassen. Zur Illustration sind in Abb. 3.2.6 und 3.2.7 die Ergebnisse der numerischen Simulation mit den Versuchsergebnissen verglichen. Es zeigt sich, dass mit einem einheitlichen Parametersatz aller Kriechversuche bei 333 K eine gute Anpassung an die Versuchsergebnisse erreicht wird.

Parallel zu der Anpassung von Kriechkennwerten an neuere IfG-Laborversuche wurden weitere thermo-mechanische Modellrechnungen zum in situ HFCEP-Experiment an Hand von einem gemeinsamen Rechenmodell durchgeführt. Die gemessene zeitliche Entwicklung der Temperatur an der Mittelebene Bohrlochwand wurde als Randbedingung auf eine 3 m Erhitzerhöhe vorgegeben.

Im Folgenden Zeitraum wurde nur ein 2D-axialsymmetrisches Modell, bestehend aus ca. 3200 isoparametrischen Elementen mit 8-Knoten verwendet, so dass die Elemente an der Bohrlochwand (im beheizten Bereich) gleichmäßig quadratisch und nicht größer als ca. 2x2 cm sind. Die sehr feine radiale Unterteilung am Innenrand des Modells war aufgrund großer Temperaturgradienten in der unmittelbaren Bohrlochumgebung erforderlich. Die Vertikalausdehnung des Modells beträgt 50 m. Der äußere Radius wurde mit 20 m angenommen.

Mit Programmsystem ADINA wurden die Temperaturentwicklung im Salz sowie die thermisch induzierten Bohrlochkonvergenzen gekoppelt gerechnet.

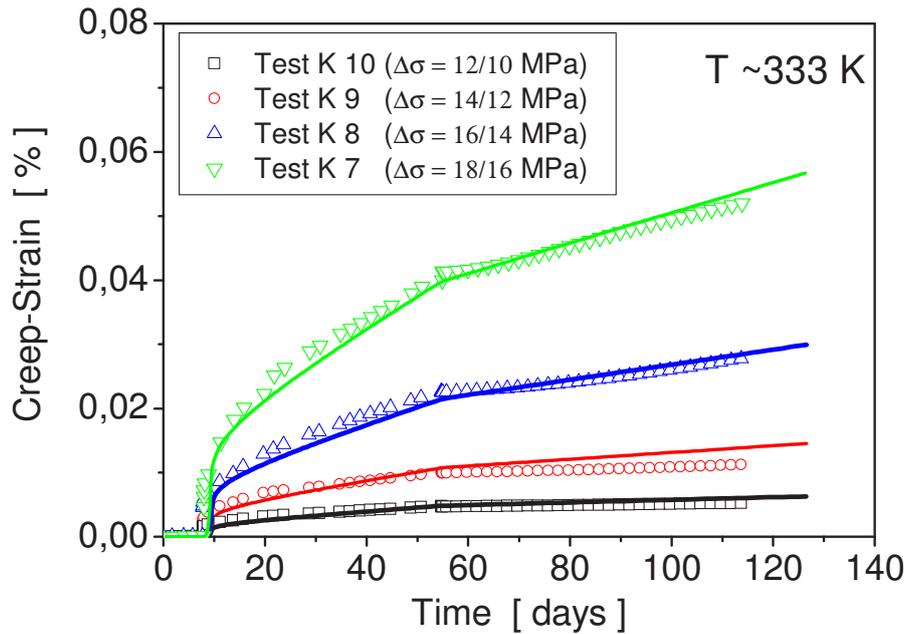


Abb. 3.2.6 Vergleich der berechneten Kriechdehnungen (durchgezogenen Linien) mit der IfG-Kriechversuchen (Symbols) an Asse-Steinsalz.

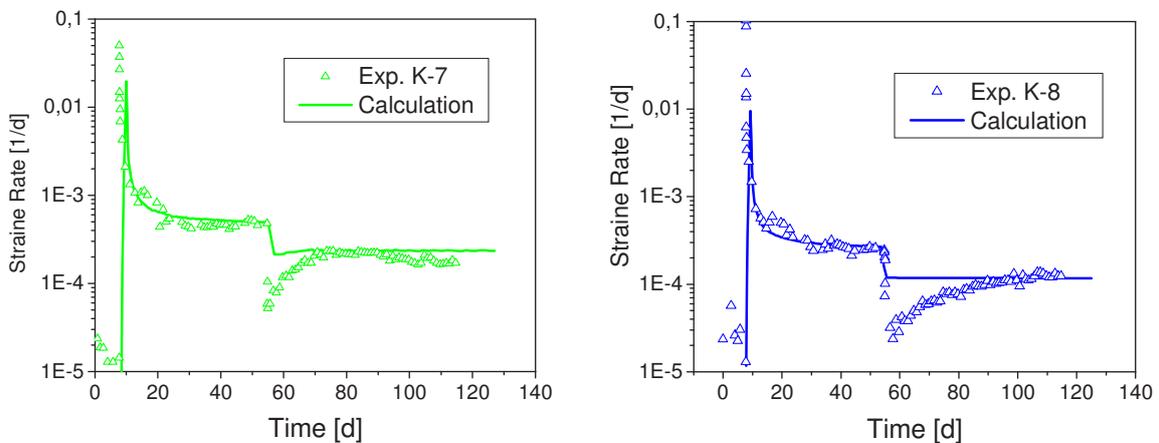


Abb. 3.2.7 Vergleich der gemessenen und berechneten Dehnungsraten für Labortest K-7 und K-8.

Es zeigte sich, dass das transiente Kriechen des Salzes nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Durch die Temperaturerhöhung im Salz am Versuchsort dominiert das sekundäre Kriechen das Konvergenzverhalten des Bohrlochs. In Abbildung 3.2.8 sind die Verläufe der berechneten Temperaturentwicklungen entlang der Bohrlochwand für verschiedene Zeiten nach dem Einschalten des Erhitzers dargestellt. Die entsprechenden Bohrlochkonvergenzen sind in Abbildung 3.2.9 gezeigt.

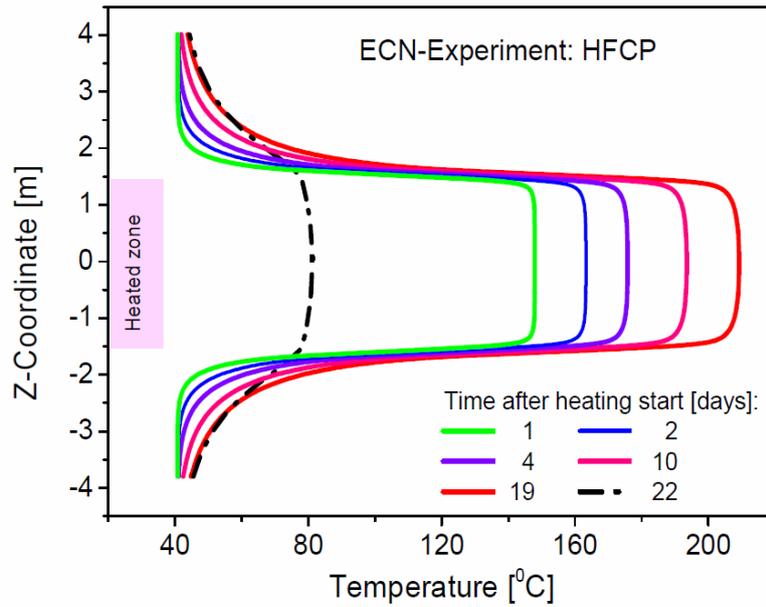


Abb. 3.2.8 Vertikaler Verlauf der Temperaturentwicklung an der Bohrlochwand.

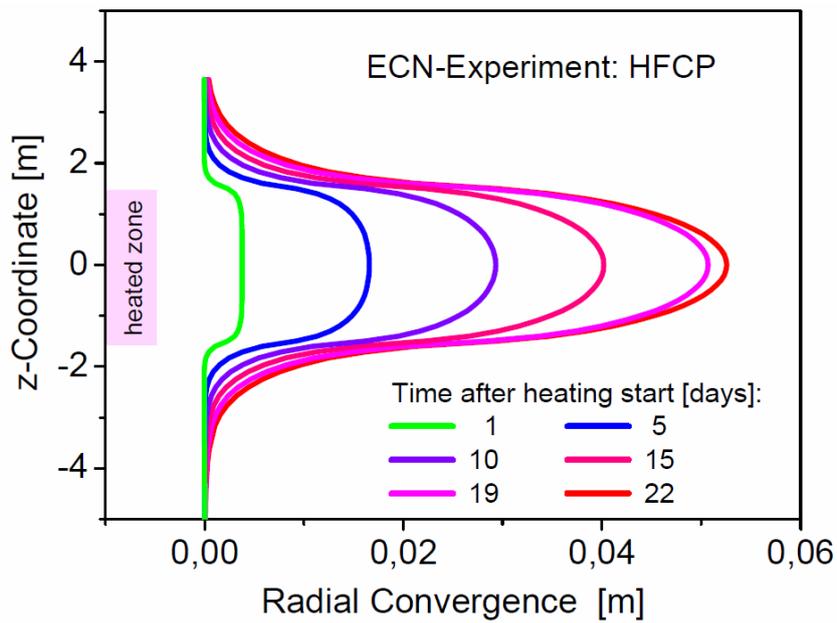


Abb. 3.2.9 Vertikaler Verlauf der Bohrlochkonvergenz am Erhitzerbereich.

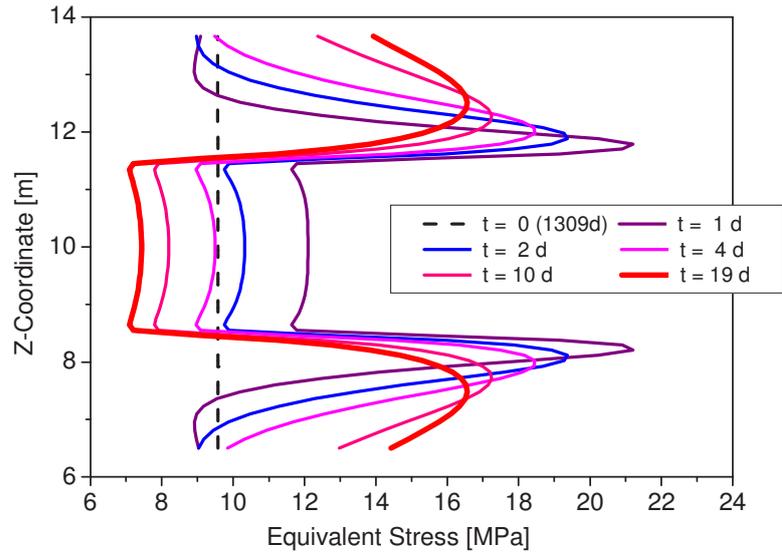


Abb. 3.2.10 Vertikaler Verlauf der berechneten Äquivalentspannungen entlang der Bohrlochwand am Erhitzerbereich.

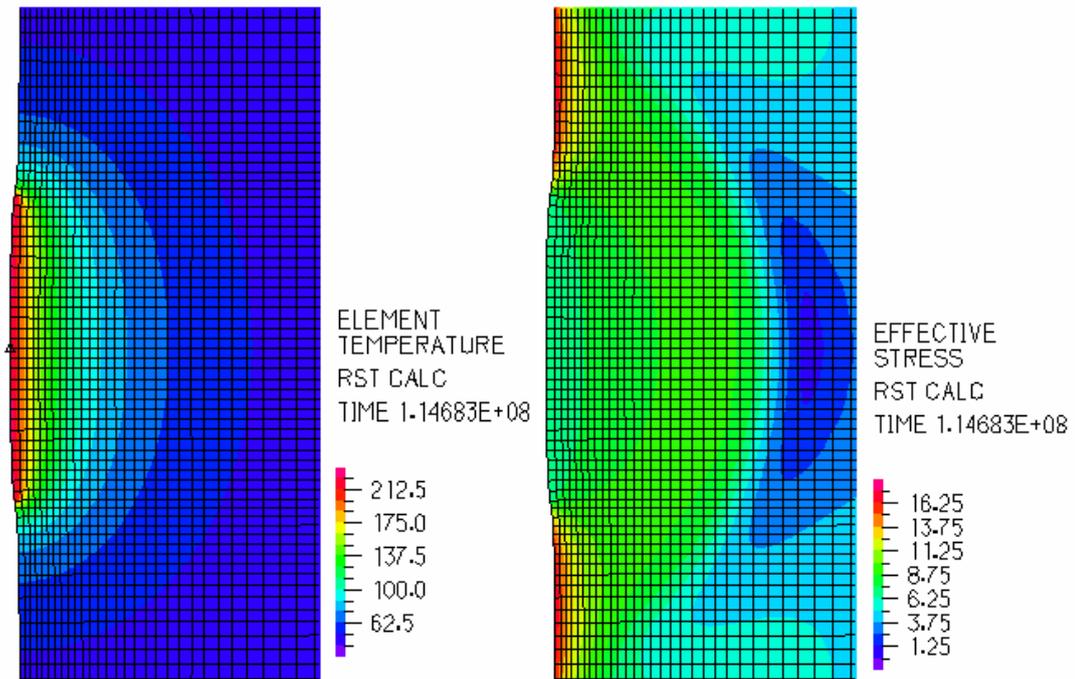


Abb. 3.2.11 Berechnete Temperatur- und Effektivspannungen in Erhitzerumgebung nach ca. 19 Tagen

## 4. Dammjoch Modell in der Schachtanlage Asse II

Zur Untersuchung der Ausdehnung einer Auflockerungszone und deren Verheilung um die untertage Hohlräume in Steinsalz wurden die Verhältnisse am so genannten „Dammjoch“ in der Schachtanlage Asse II modelliert.

Im Jahr 1911 wurde die ca. 35 m lange Strecke aufgefahren und in 1914 erfolgte die Auskleidung eines 25 m langen Abschnitts mit einem Stahlgussrohr und dann wurde der Resthohlraum zwischen Streckenwand und Verrohrung mit Beton verfüllt. Nach ca. 90 Jahren Standzeit wurden die Permeabilität und die Spannungsverhältnisse um die Strecke in der Auflockerungszone untersucht [GRS, 2001].

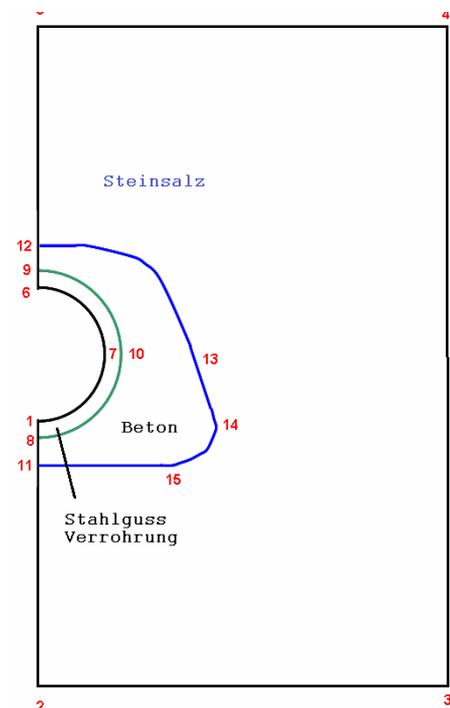


Abb. 4.1 Bild der Strecke mit dem Dammjoch in der Schachtanlage Asse auf 700m Tiefe (links) und rechts die schematische Darstellung der Dammjoch-Strecke.

Aus durchgeführten numerischen Simulationen zu den Spannungs- und Verformungsentwicklungen in der Auflockerungszone werden Informationen über den Ausheilungsprozess über längere Zeiträume gewonnen. In Abb. 4.2 wird ein Bild der heutigen Situation der ausgekleideten Strecke in der Asse gezeigt (links) und eine schematische Darstellung der betrachteten Modellgeometrie (rechts).

Das Rechenmodell entspricht einem Gebirgsbereich von 100 Höhe und 50 m Breite. Für die Berechnungen einigten sich die Partner auf ein einheitliches, von R.-M. Günther (IfG) erstelltes geometrisches Berechnungsmodell, um Ergebnisunterschiede aufgrund verschiedener Diskretisierungen ausschließen zu können. Das FE-Netz für die Berechnung ist in Abb. 4.3

dargestellt. Es wurde nur eine Hälfte der Strecke- und der Dammjochgeometrie modelliert mit einer Streckenhöhe von 2.30 m und ca. 1 m Radius der Verrohrung.

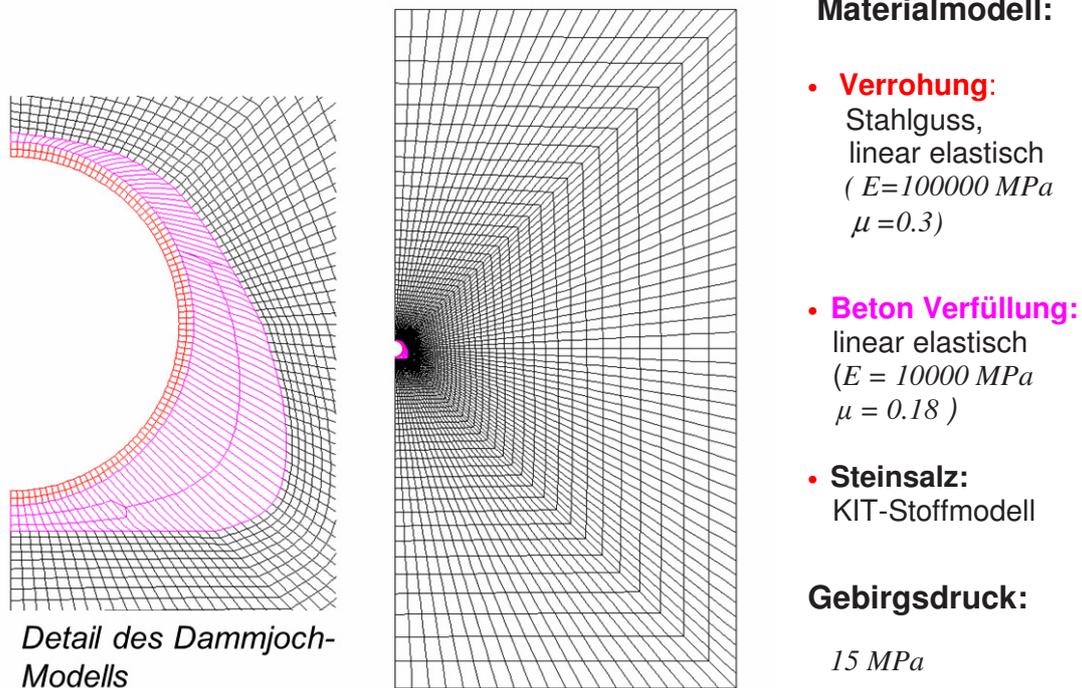


Abb. 4.2 Diskretisiertes Berechnungsmodell für die Dammjoch-Struktur und die verwendeten elastischen Materialkennwerte. Die oberen und äußeren Flächen sind mit dem lithostatischen Druck belastet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die elastischen Kennwerte von Stahlguss und Beton Hinterfüllung von [Lux & Eberth, 2007] verwendet.

Zur Analyse dieser Langzeitsituation war es notwendig, die vorhandenen Stoffmodelle für Steinsalz zu erweitern hinsichtlich der Verheilung von Rissen oder Konsolidation von Auflockerungsbereichen. Gleich nach dem Beginn der numerischen Simulationen wurden bei der TU-Clausthal Triaxialexperimente an Asse Steinsalz-Proben begonnen, um diese Effekte qualitativ und quantitativ zu untersuchen. Durch Nachrechnung dieser Versuche wurden die neu entwickelten Stoffmodelle für die Verheilung von Rissen verbessert und an die Labor-messdaten angepasst.

#### 4.1 Modellierung der Laborversuche am Asse-Steinsalz

Die Zielstellung der Nachrechnungen der im Labor beobachteten Verheilungsphänomene soll dazu beitragen, vorhandene Stoffgesetzformulierungen zu verbessern und die belastbaren Salzkennwerte zu bestimmen. Einige Rechenergebnisse, die im Zuge der Entwicklungsarbeiten erzielt wurden, werden in Abb. 4.1.1 bis 4.1.4 dargestellt.

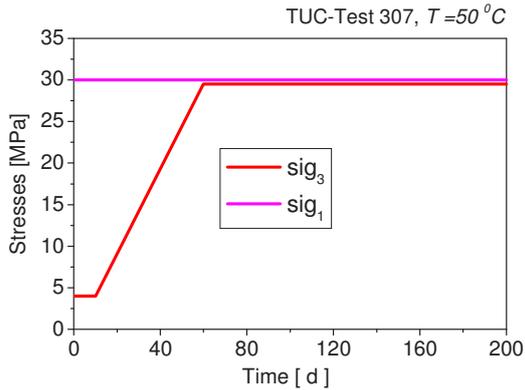


Abb. 4.1.1 Zeitlicher Verlauf der Versuchskörper Belastung (TUC-Test 307).

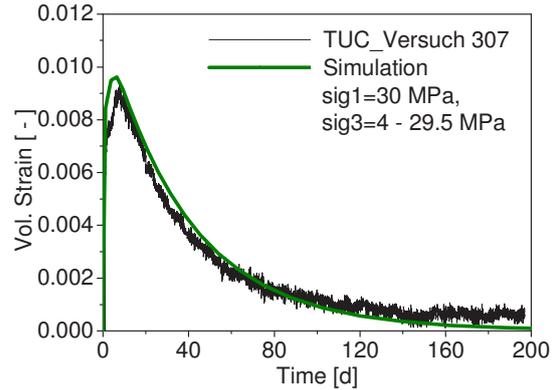


Abb. 4.1.2 Entwicklung der Volumendehnung im Vergleich mit Messungen der TU-Clausthal.

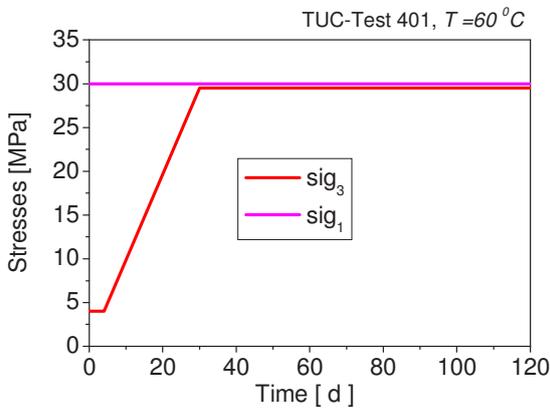


Abb. 4.1.3 Zeitlicher Verlauf der Versuchskörper Belastung (TUC-Test 401).

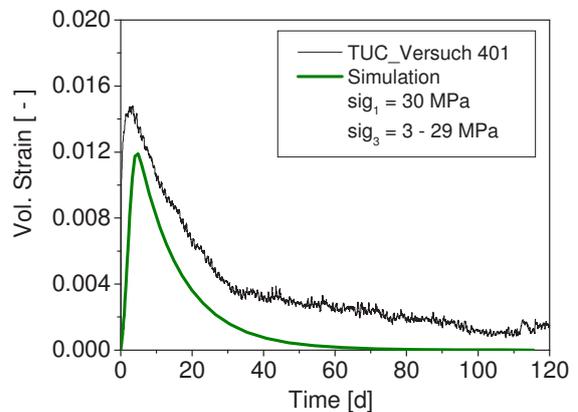


Abb. 4.1.4 Entwicklung der Volumendehnung im Vergleich mit Messungen der TU-Clausthal.

Ein Vergleich der berechneten und der von der TU-Clausthal gemessenen Volumendehnungsabnahme zeigt eine ziemlich gute Übereinstimmung, jedoch entsprachen die Versuchsbedingungen (Belastungen) nicht ganz den erwarteten in situ Spannungen und deren zeitliche Entwicklungen. Die hier verwendeten Stoffkennwerte wurden bei den Berechnungen des „Dammjoch“ Modells verwendet.

## 4.2 Simulation der „Dammjoch“ - Strecke in der Schachanlage Asse II

Zur Ausdehnung der Auflockerungszone und deren Verheilung im Salz wurden die Verhältnisse der so genannten Dammjochstrecke in der Schachanlage Asse II simuliert. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen sollen mit denen der Verbundpartner sowie mit der in situ gemessenen Permeabilität des Salzes verglichen werden.

Zur Festlegung des Referenzmodells wurden die Geometrieparameter vorgegeben und lediglich die Elementunterteilung neu bestimmt. Bei allen Rechnungen mit dem Programm ADINA wurde ein zweidimensionales Ebene-Dehnungs-Modell sowohl für den offenen als auch den ausgebauten Teil der Strecke verwendet. Die elastischen Materialeigenschaften des Dammjochs aus Beton und Gussstahl wurden einheitlich vorgegeben sowie der Anfangszustand (Gebirgsdruck von 15 MPa). Zuerst wurde für Steinsalz das Stoffmodell wie bei der Simulation von IFC- und HFCEP-Versuchen verwendet und zu einem späteren Zeitpunkt erweitert, um die Verheilung der Auflockerungszone genauer zu beschreiben. Zuerst wurde die Simulation der Streckenkonvergenz, Spannungs- Schädigungsentwicklung in Steinsalz ohne Dammjoch über eine Standzeit von 90 Jahren untersucht. In einer zweiten Simulation wurde vorausgesetzt, dass der Einbau des Stahlgussrohres und der Betonhinterfüllung drei Jahre nach der Streckenerstellung vorgenommen wurden. Die eventuelle Reibung zwischen Salzgestein und dem Beton oder die Abbind-Wärme des Betons wurden dabei nicht berücksichtigt.

### Ergebnisse der Offen-Strecke

Im Folgenden werden nur exemplarisch einige Rechenergebnisse dargestellt und erläutert, die im Zuge der Entwicklungsarbeiten am Stoffmodell erzielt wurden. Die zeitliche Entwicklung der Streckenkonvergenz und Effektivspannungen im Salz sind in Abb. 4.2.1 und 4.2.2 dargestellt.

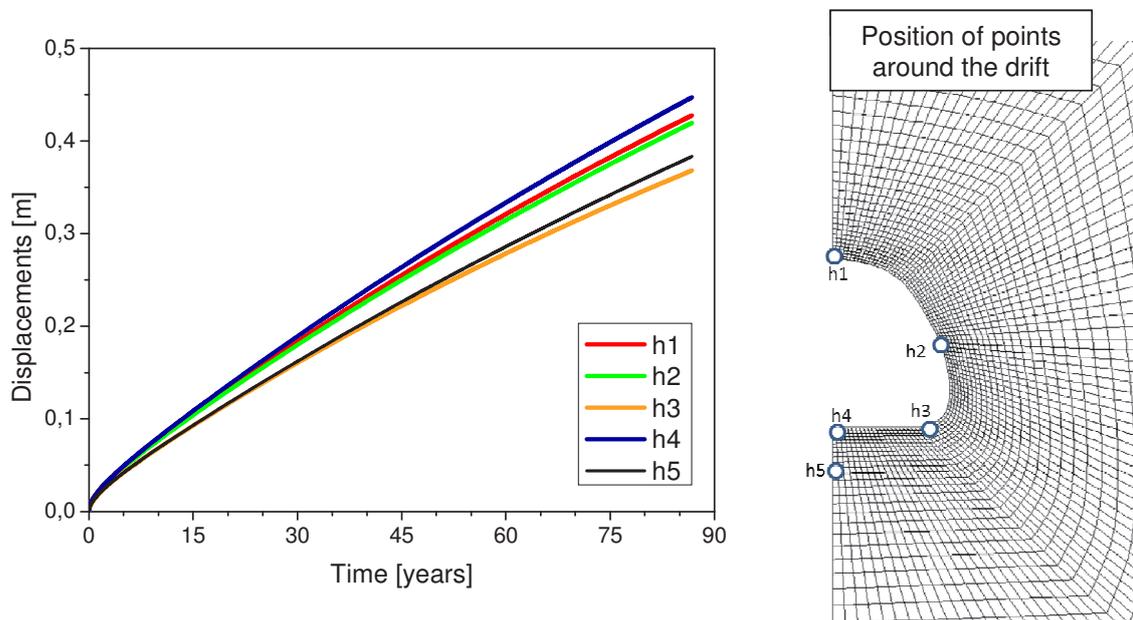


Abb. 4.2.1 Zeitliche Entwicklung der Streckenkonvergenz an verschiedenen Positionen des offenen Streckenmodells.

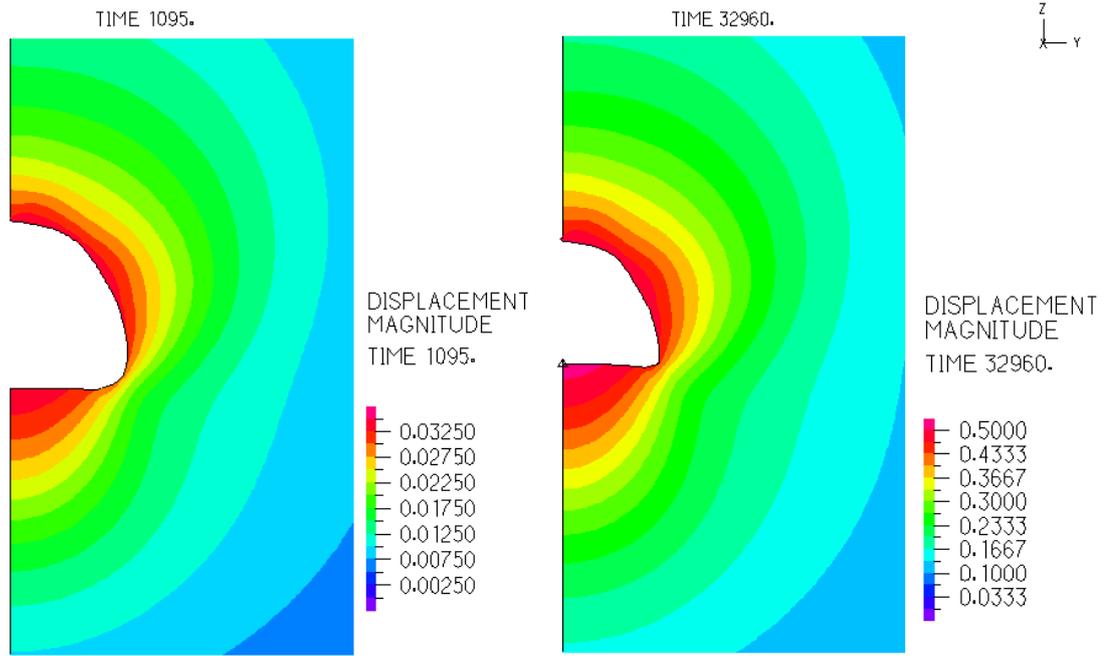


Abb. 4.2.2 Entwicklung der Verschiebungen um die offene Strecke nach 3 und nach 90 Jahren.

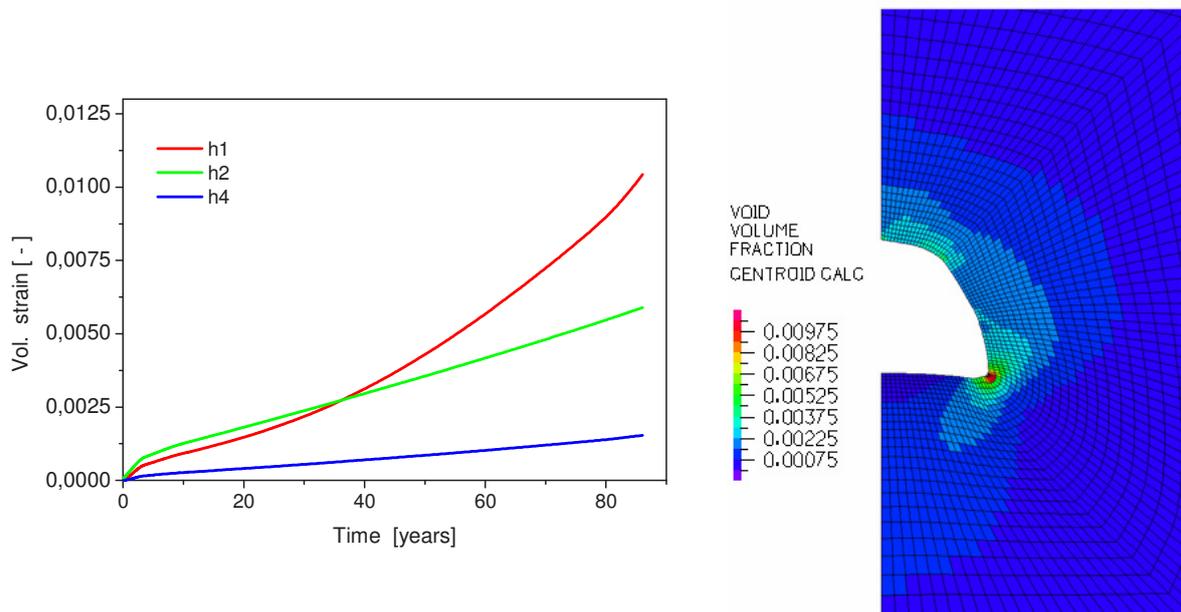


Abb. 4.2.3 Zeitliche Entwicklung der Dilatanz an verschiedenen Positionen für das offene Streckenmodell und die berechnete Volumendehnung um die Strecke nach 88 Jahren.

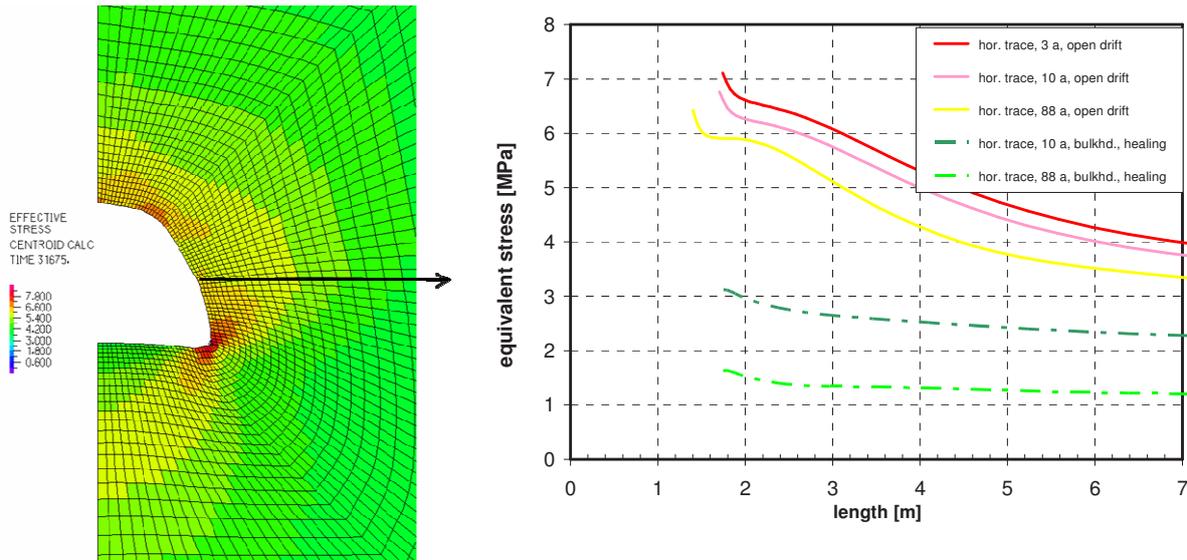


Abb. 4.2.4 Berechnete Äquivalentsspannungen um die offene Strecke und der horizontale Verlauf der Spannungen auf halber Strecken zu verschiedenen Zeitpunkten sowohl für die offene als auch für die ausgebaute Strecke.

### Ergebnisse zur ausgebauten Strecke

Mit dem Modell von Abb. 4.2 wurden folgende Simulationen durchgeführt: 3 Jahre freie Streckekonvergenz ohne Dammjoch, anschließend 85 Jahre mit eingebautem Dammjoch. Das Aufkriechen des Steinsalzes auf das Dammjoch führte zum Wiederanstieg der Normalspannungen und zur Reduktion der Vergleichsspannung sowie zu einem Dilatanz- und Schädigungsrückgang, der allerdings nach 88 Jahren noch nicht vollständig abgeschlossen ist (siehe Abb. 4.2.5 und Abb. 4.2.6) wie auch die Messungen der GRS (2004) belegen.

Die berechneten Volumendehnungen sind damit deutlich niedriger als die typischen Werte für eine Auflockerungszone. Das deutet auf geringe Permeabilität des Salzes in der Umgebung des Dammjochs und ist die Folge eines Spannungszustandes, der durch eine hohe Normalspannung und eine vernachlässigbare deviatorische Spannung charakterisiert wird. Diese Aussage konnte nur durch begleitende in situ Messungen bestätigt werden.

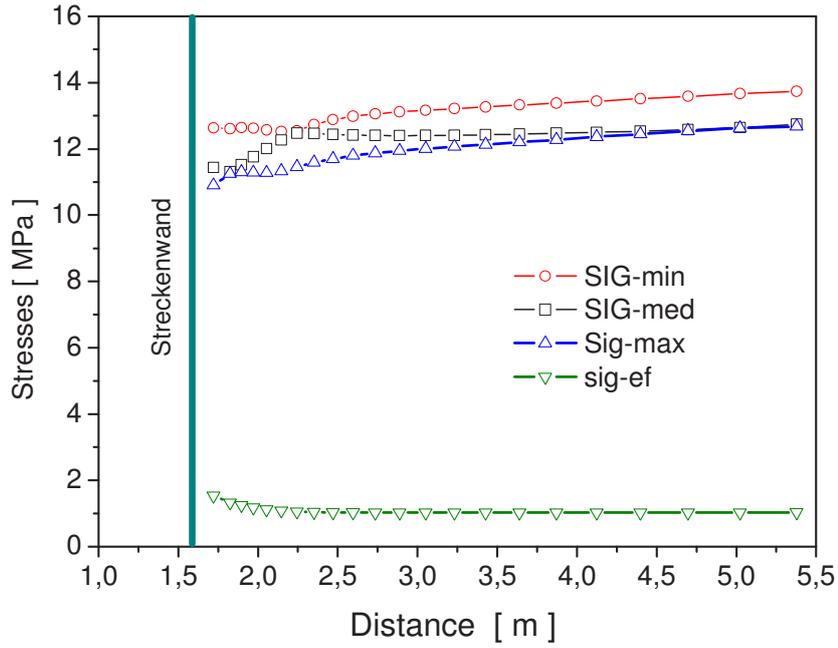


Abb. 4.2.5 Berechnete Normal- und Effectivspannungen entlang einer schrägen Spur nach 88 a.

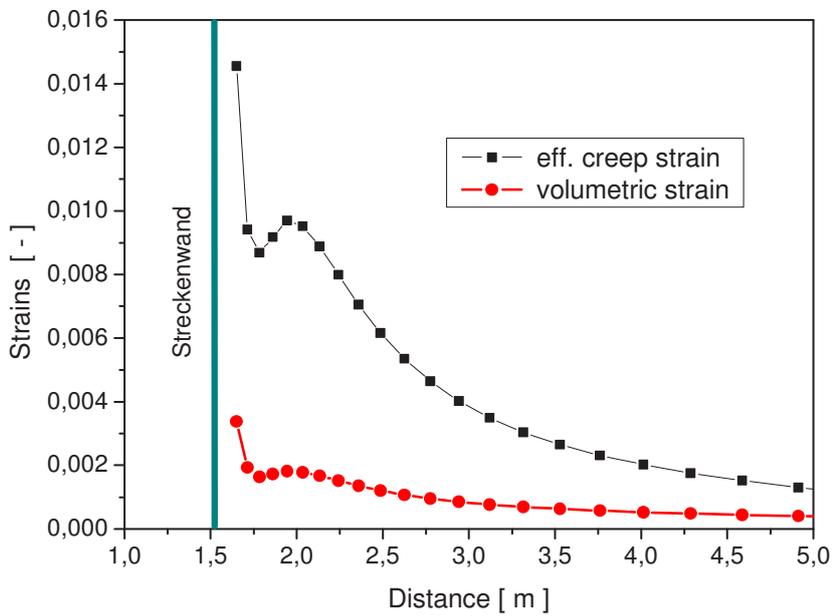


Abb. 4.2.6 Berechnete effektive Kriech- und Volumendehnung entlang einer schrägen Spur (45°) nach 88 Jahren.

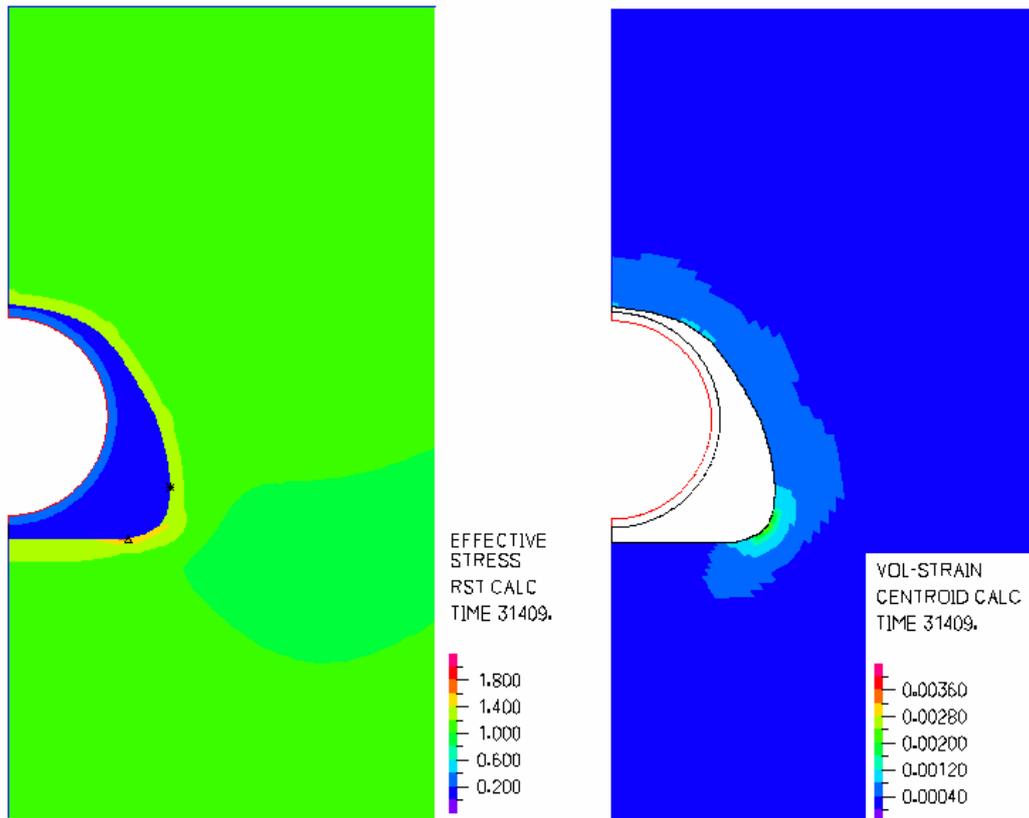


Abb. 4.2.7 Volumendehnung im Steinsalz in der Umgebung des Dammjochs 3 und 83 Jahren nach der Streckenerstellung.

Die berechneten Volumendehnungen sind damit deutlich niedriger als die typischen Werte für eine Auflockerungszone. Das deutet auf geringe Permeabilität des Salzes in der Umgebung des Dammjochs ist die Folge eines Spannungszustandes, der durch eine hohe Normalspannung und eine vernachlässigbare deviatorische Spannung charakterisiert wird. Diese Aussage konnte durch begleitende in situ Messungen bestätigt werden.

## 5. Modellierung von In-situ Situationen im Endlager WIPP

Im Rahmen der Deutsch-Amerikanischen Zusammenarbeit wurden Modellberechnungen zu zwei gut dokumentierten Untertagestrukturen „Room B“ und „Room D“ in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), dem US-amerikanischen Endlager für Transurane und hochradioaktive Abfälle im Steinsalz durchgeführt [Argüello & Holland, 2015]. Es handelt sich um zwei horizontale Strecken in einer Tiefe von 646 m unter der Oberfläche. Die Salado-Salzformation in Carlsbad, New Mexico, ist charakterisiert durch eine alternierende Flachlagerung von Steinsalz-, Salzton-, Anhydrit-, und Polyhalit Schichten. Das Projekt startet mit einer intensiven Laboruntersuchung zur Ermittlung der thermomechanischen Eigenschaften von WIPP charakteristischen Salztypen: „clean salt“ and „argillaceous salt“. Die triaxial, mehrstufigen Kriech- und Festigkeitsversuche an WIPP – Prüfkörpern wurden vom IfG – Leipzig und den TU-Clausthal Partnern durchgeführt. Ziel dieser Arbeiten war, die bereits vorhandenen amerikanischen Stoffmodellkennwerte an die neueren Messdaten anzupassen.

### 5.1 Nachrechnung der Laborversuche und Parameterbestimmung

Die Auswertung der Laborergebnisse zum thermo-mechanischen Verhalten von Salztypen aus der WIPP und deren Nachrechnung zur Bestimmung der Stoffmodellparameter zum Kriech- und Festigkeitsverhalten von „clean salt“ and „argillaceous salt“ auch bei höheren Temperaturen wurde numerisch durchgeführt. In Abb. 5.1.1 wird ein Beispiel für diese Vorgehensweise gezeigt. Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind mit den Versuchsergebnissen verglichen. Es sind Triaxialversuche mit drei Stufen Lasterhöhung und bei Temperaturen zwischen 24°C und 80°C an „clean salt“ dargestellt. Die Ergebnisse der numerischen Simulation sind mit den Versuchsergebnissen über 120 Tagen dargestellt. Weiterhin wurden die Kriechversuche der TU-Clausthal an „argillaceous salt“ nachgerechnet und exemplarisch in Abb. 5.1.2 und 5.1.3 dargestellt. Die Berechneten Kriechraten sind ebenfalls gezeigt. Die Nachrechnung der neueren Laborversuchsergebnisse bei höheren Temperaturen wurde weitergeführt. Die Auswertung von zahlreichen Kriechversuchen an beiden Salztypen aus WIPP erlaubte die Ermittlung von benötigte Stoffparametern zu weitere Durchführung von Modellberechnungen der Room D und B Strukturen. In Abbildung 5.1.4 sind die ermittelten sekundären Kriechraten als Funktion der differential Stress und der Temperatur dargestellt. Ein Vergleich der ermittelten Kriechraten mit denen von allem Projektpartner und die Messungen sind in Abb. 5.1.5 und Abb. 5.1.6 dargestellt. Im Vergleich mit früheren Laborversuchsdaten des IfG mit Asse-Speisesalz zeigte sich beim „clean salt“ eine um den Faktor 2 bis 3 höhere stationäre Kriechrate.

In Abhängigkeit von mathematischer Formulierung des Kriechstoffmodells, die Extrapolation der Kriechkurven im Bereich von niedrigere differential Spannungen fallen sehr unterschiedlich aus. Es ist zu Hoffen, dass im nächsten Verbundprojekt diese Differenzen durch neuere Messungen reduziert werden können.

In den nächsten Schritt wurden die von IfG-Leipzig und TU-Clausthal Festigkeitsversuchen ausgewertet um die Stoffparameter für Dilatanzgrenze von „clean salt“ und „argillaceous salt“ zu bestimmen.

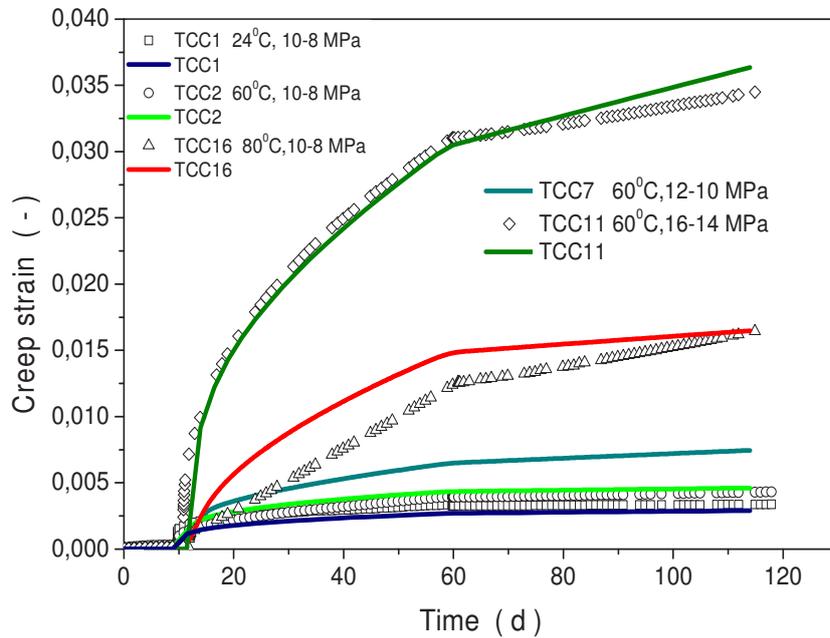


Abb. 5.1.1 Nachrechnung der IfG-Kriechversuche an „clean salt“ bei Temperaturen von 24 °C, 60 °C und 80 °C und unterschiedlichen Manteldrücken.

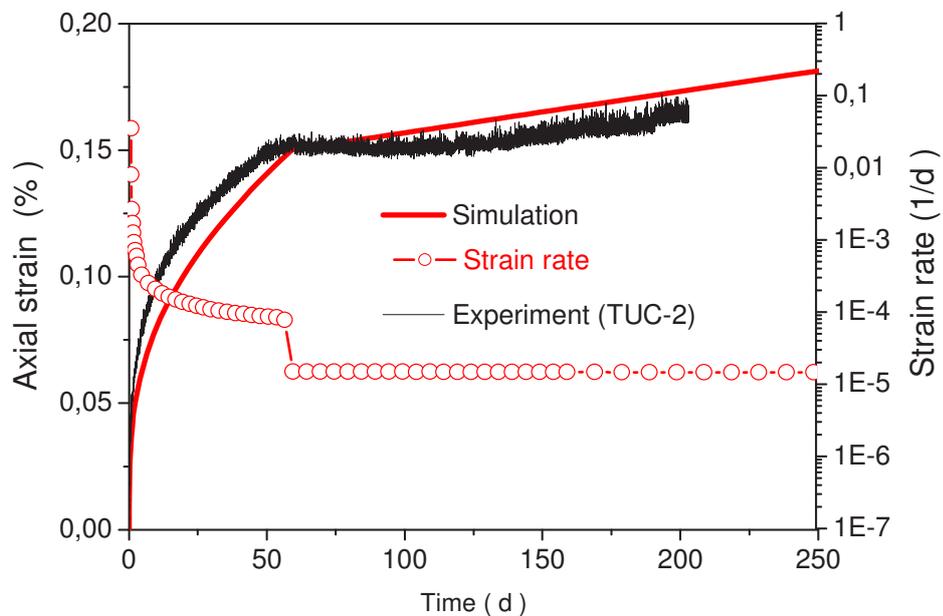


Abb. 5.1.2 Nachrechnung eines zwei Stufen Kriechversuchs an „argilaceous salt“ bei Raumtemperaturen zusammen mit der berechneten Dehnungsrate.

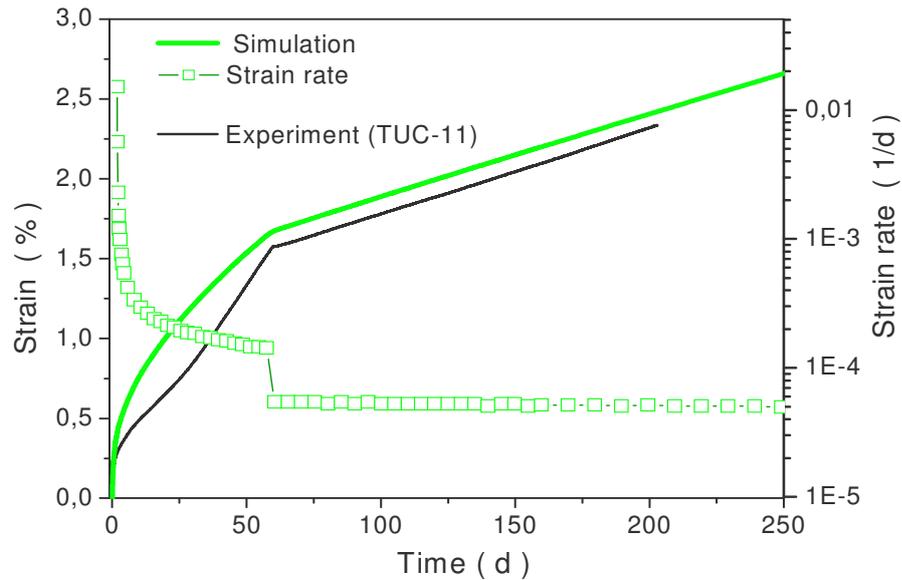


Abb. 5.1.3 Nachrechnung eines zwei Stufen Kriechversuchs an „argilaceous salt“ bei Raumtemperaturen mit der berechneten Dehnungsrate.

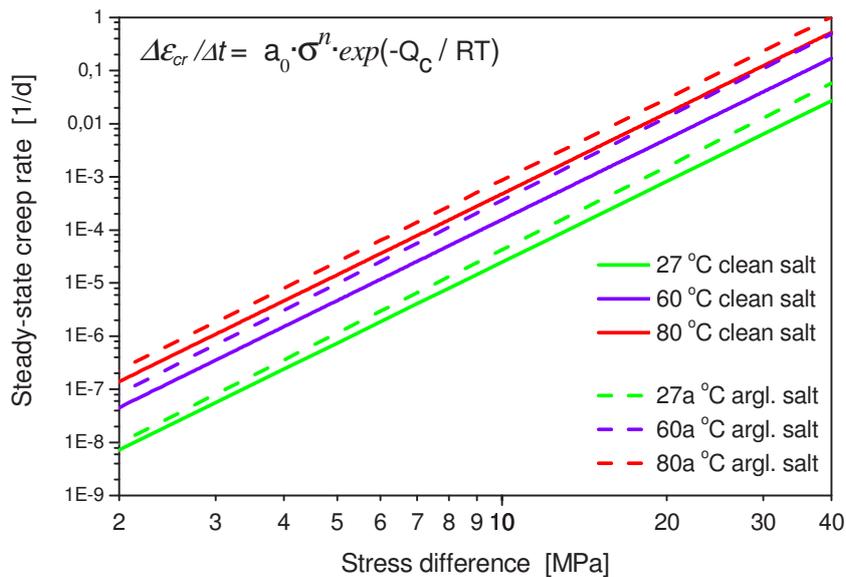


Abb. 5.1.4 Sekundäre Kriechdehnungsrate als Funktion der Differentialspannung und bei drei Temperaturen

Zur Illustration sind in Abb. 5.1.7 und 5.1.8 die Gegenüberstellungen von Messdaten und Rechnungen der Festigkeitsversuche dargestellt. Die neu ermittelten Dilatanzgrenzen für „clean salt“ und „argillaceous salt“ sind zusammen mit dem vom INE verwendetenASSE Steinsalz in Abb. 5.1.9 gezeigt.

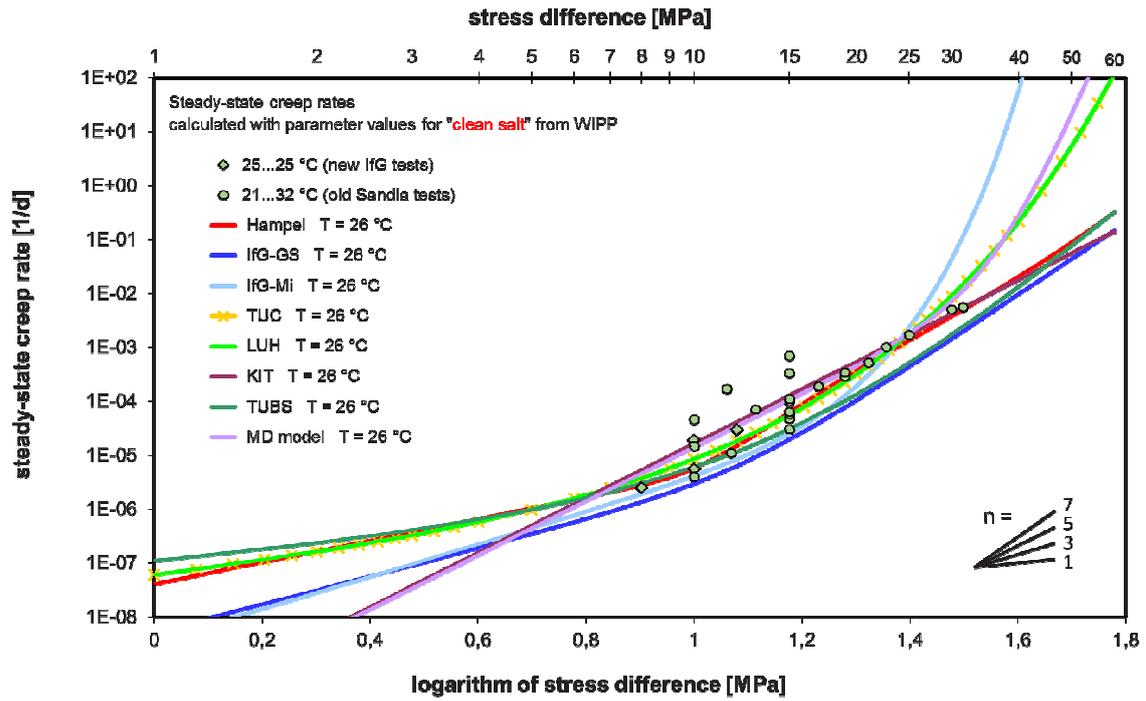


Abb. 5.1.5 Gegenüberstellung von gemessenen und von allen Partner verwendeten sekundären Kriechdehnungsraten bei Raumtemperatur.

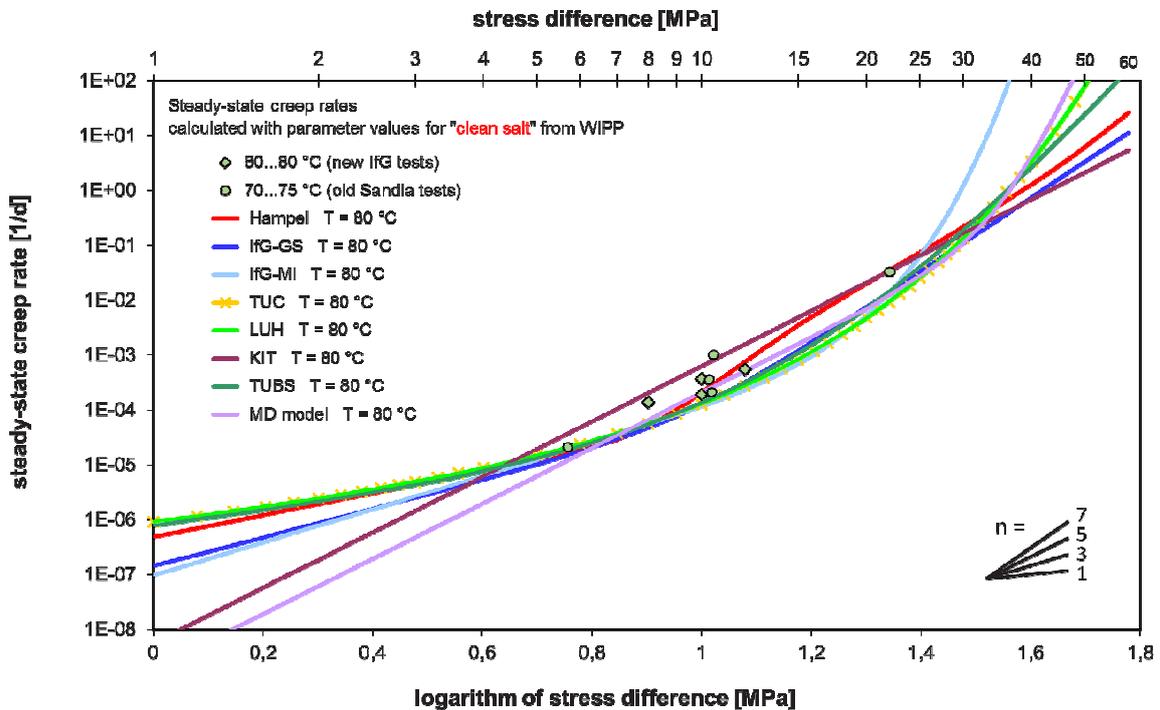


Abb. 5.1.6 Gegenüberstellung von gemessenen und von allen Partner verwendeten sekundären Kriechdehnungsraten bei 80 °C.

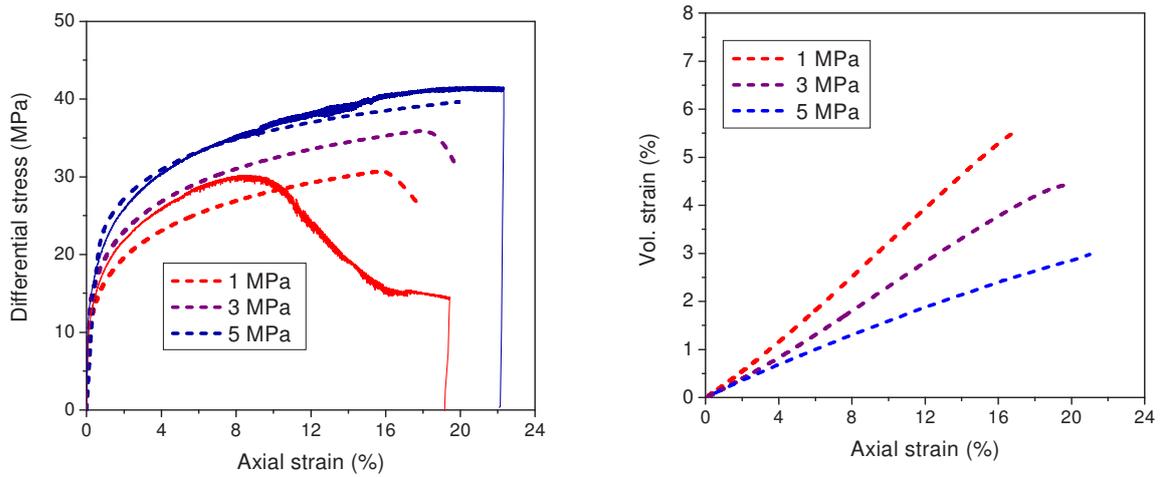


Abb. 5.1.7 Simulation der Festigkeitsversuche bei unterschiedlichen Manteldrücken und Vergleich mit den Messergebnissen. Links sind die berechneten volumetrischen Verformungen dargestellt.

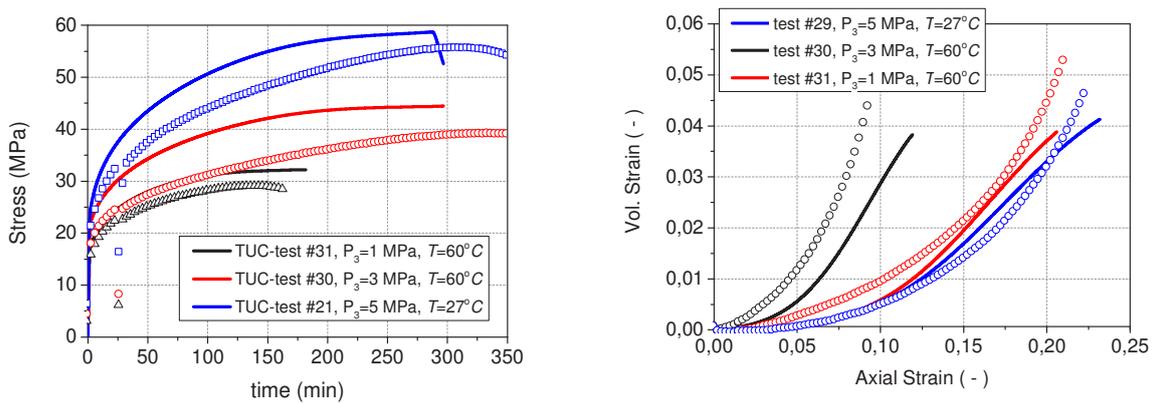


Abb. 5.1.8 Die Simulation der TU-Clausthal Festigkeitsversuche bei unterschiedlichen Manteldrücken und Temperaturen und Vergleich mit den Messergebnissen. Links sind die berechneten und gemessenen volumetrischen Verformungen dargestellt.

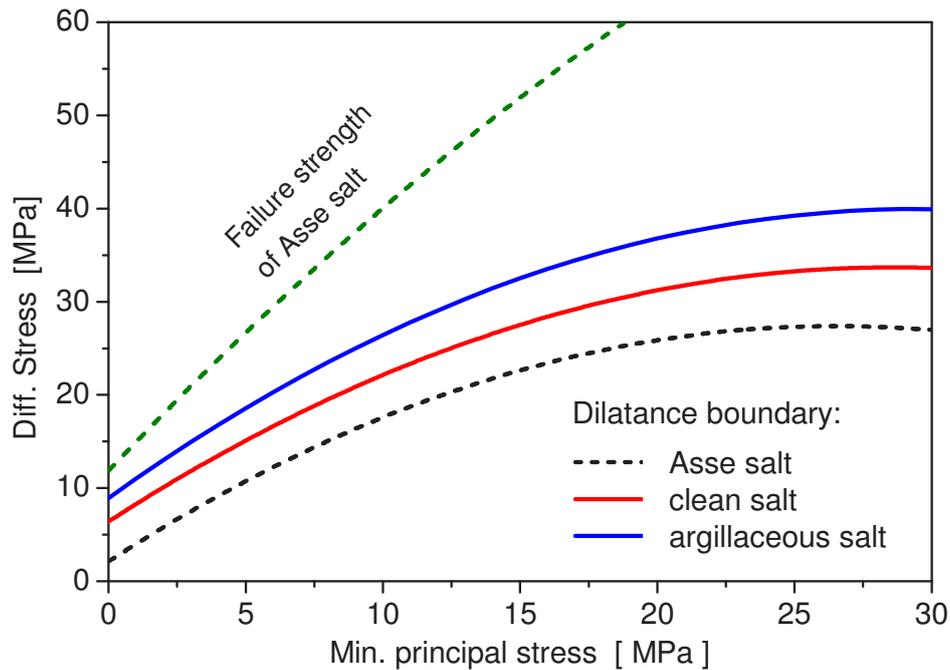


Abb. 5.1.9 Bruch- und Dilatanzfestigkeit in Abhängigkeit von der Minimalspannung für Asse Salz und WIPP clean und argillaceous salt

## 5.2 Simulation von „Room D“

Bei den bisherigen Untersuchungen der thermomechanischen Phänomene im Nahbereich einer Strecke wurde das umgebende Salzgebiet als homogenes Steinsalz betrachtet. Wie aus zahlreichen Veröffentlichungen [Munson, 1988; Rath & Argüello, 2012], bekannt ist, weist der Innenbau der Salzformation in der WIPP Anlage neben den Bereichen aus homogenem Steinsalz auch Bereiche mit inhomogenem, stratigrafischem Aufbau auf. Meist handelt es sich um Salzton und Anhydritschichten sowie Polyhalit. Vor allem die Anhydritlagen und die Tonschichten können bis zu meterdicken Schichten vorkommen. Das vom amerikanischen Partner vorgegebene Modell des „Room D“, zeigt eine sehr inhomogene Stratigraphie (Abb. 5.2.1, links).

Das Verhalten dieser Schichten hinsichtlich der mechanischen und thermischen Eigenschaften unterscheidet sich deutlich von Steinsalz. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Modellrechnungen mit dem ADINA Programm durchgeführt, um die Einflüsse von Anhydritschichten auf die Spannungs- und Verformungsfelder in der Umgebung einer offenen Strecke über ca. 1400 Tagen zu ermitteln.

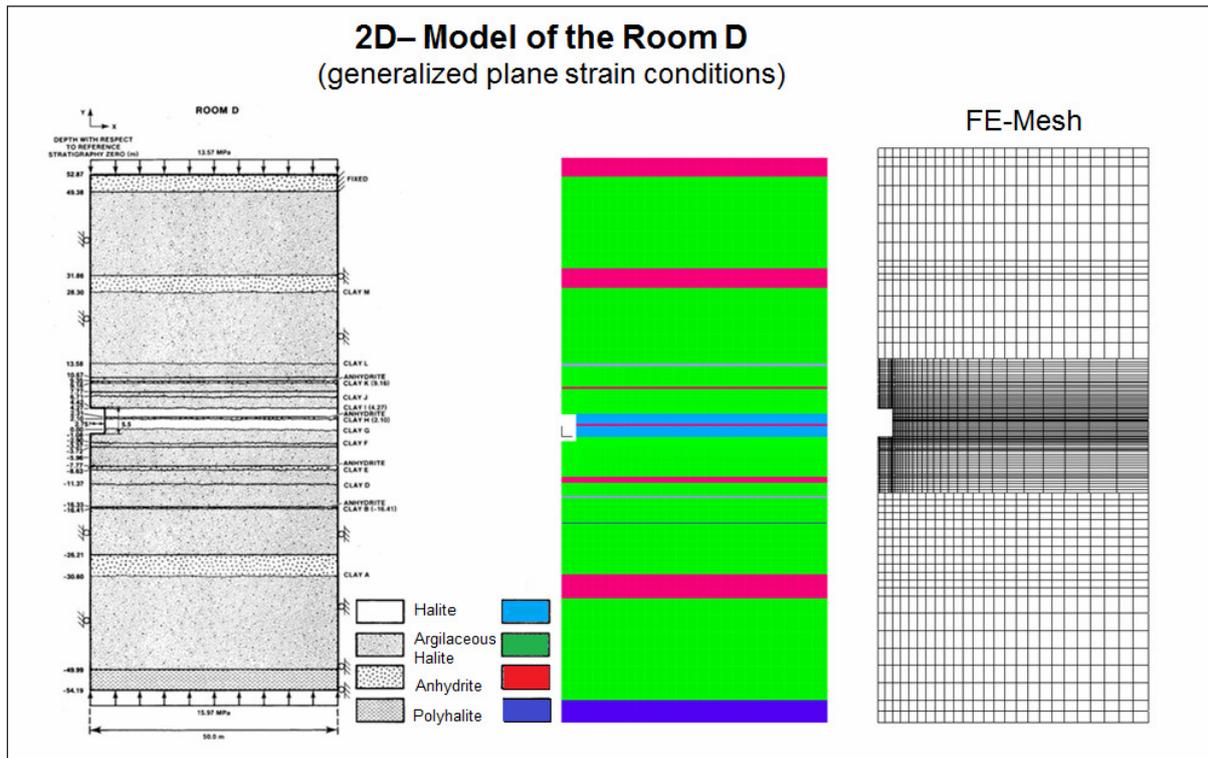


Abb. 5.2.1 Modellgeometrie und geologische Struktur der Salzformation in der Umgebung von „Room D“ und das bei der numerischen Simulation verwendete Element-Netz.

Das numerische Modell stellt eine Endlagerstrecke in der WIPP-Anlage in eine Tiefe von 650m vor. Der Strecken-Querschnitt beträgt 5 x 5 m und hat eine Länge von ca. 93m. Für die Simulation der Strecke D wurde ein 2D- Modell mit der vertikalen Symmetrielinie durch die Streckenmitte erstellt. Die Randbedingungen des Modells sind ebenfalls in Abb. 5.2.1 gezeigt. Bis endgültige Labordaten zur Verfügung standen, wurde vereinbart, dass alle Partner zuerst Modellrechnungen für eine homogene Struktur, d. h. ohne Berücksichtigung der Stratigraphie der Salzformation als Referenzfall (D1) durchführen. Anschließend wurden neue Simulationen (D2) bei dem das kompletten SANDIA-Modell verwendet wurde, jedoch ohne die Zwischenschicht als Gleitfläche an der Strecken-Mittelebene und ohne Tonschichten. Das Materialverhalten von Anhydrit und Polyhalit wurde als elastisch-plastisch mit dem Drucker-Prager Flieskriterium beschrieben. Für die Berechnungen im Rahmen dieser Arbeit wurden die Kennwerte von Anhydrit und Polyhalit von SANDIA [Argüello & Holland, 2015] verwendet. Die Materialeigenschaften sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 5.2 Stoffparameter für Anhydrit und Polyhalit

	Anhydrite	Polyhalite
E-Modul [MPa]	75100	55300
Poisson's Ratio	0.33	0.35
Winkel der inneren Reibung, $\phi$	0.450	0.473
Kohäsion [MPa]	1.35	1.42

In Abb. 5.2.2 sind die gerechneten horizontalen und vertikalen Konvergenzen der Strecken für die beiden Modellvarianten dargestellt. Die berechneten Konvergenzwerte im Vergleich mit den in situ Messungen der Streckenkonvergenz liegen um den Faktor 1/3 niedriger.

Die berechneten Effektivspannungen entlang drei Traversen in vertikalen und horizontalen Richtungen 1470 Tage nach Streckenerstellung sind in Abb. 5.2.3 gezeigt. Weitere Rechenergebnisse wie zum Beispiel zeitliche und örtliche Entwicklung der Spannungen, Dehnungen und Volumendehnungen zur verschiedenen Positionen in der Umgebung der Strecke werden im Vergleich mit denen der anderen Partner dargestellt und im Rahmen des Syntheseberichts bewertet.

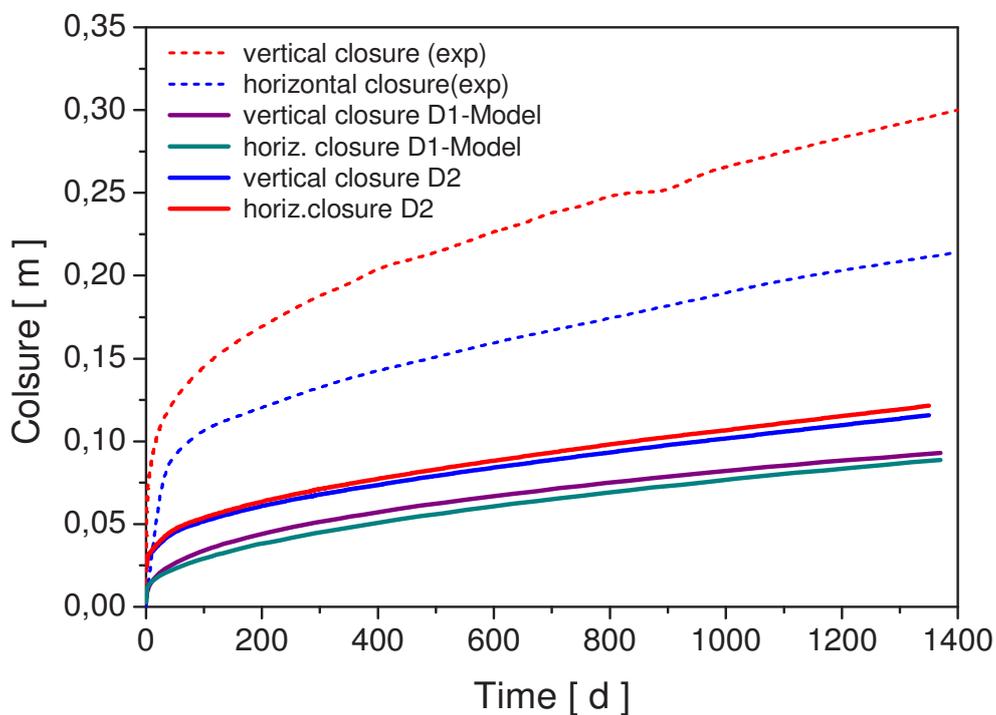


Abb. 5.2.2 Vergleich der gemessenen Konvergenzen (gestrichelte Linien) in Room D des WIPP-Endlager mit denen aus Berechnung (durchgehende Linien) mit Modell D1 und D2.

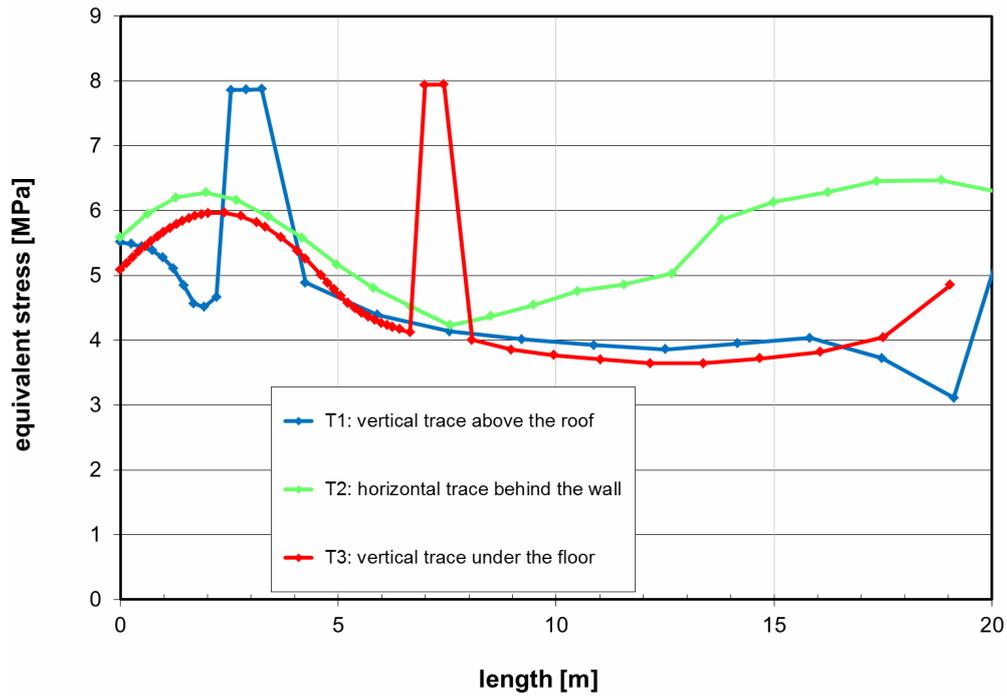


Abb. 5.2.3 Berechneten äquivalent Spannungen entlang drei Traversen vertikal und horizontal nach 1470 Tagen nach Streckenerstellung.

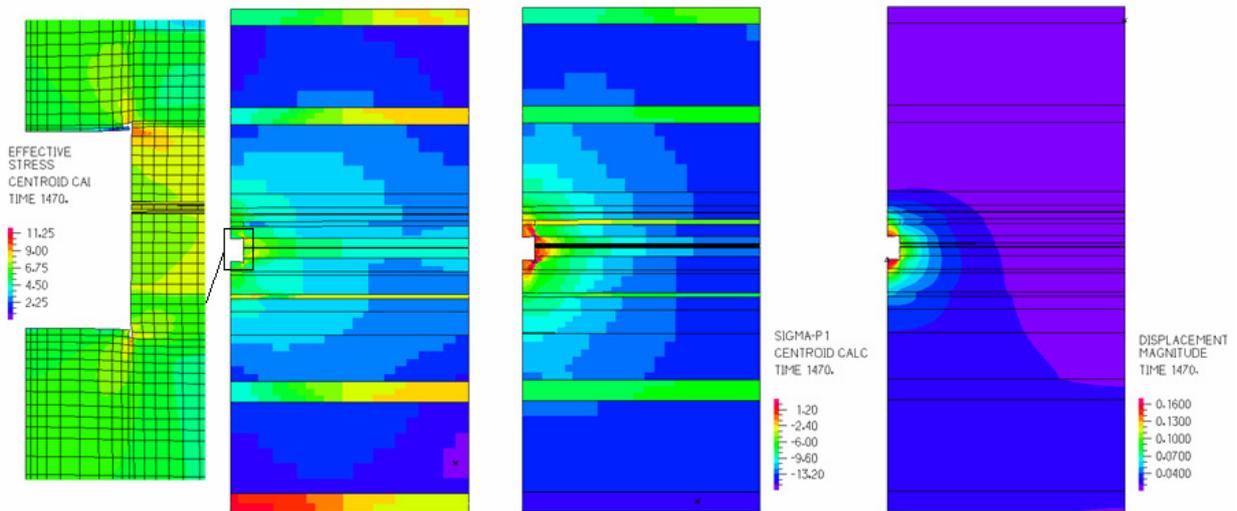


Abb. 5.2.4 Berechnete Effektiv- und Minimalnormalspannungen sowie die Verschiebung nach 1470 Tagen Versuchszeit („Room D“, Modell D2).

### 5.3 Simulation der „Room B“

Die Modellrechnungen zum thermomechanischen Verhalten des „Room B“ in dem WIPP-Untertageversuchsfeld wurden ebenfalls mit dem ADINA Programm durchgeführt. Die Geometrie und die Abmessung des Rechenmodells ist fast identisch mit der von „Room D“ aber im diesem Fall wurde ein Elektrischer Erhitzer in ca. 2m Tiefe in der Sohle der Versuchsstrecke angebracht. Die Erhitzerhöhe beträgt 2,59 m, Durchmesser ist 0,18 m und die Wärmeleistung 700 W/m. Die Temperaturentwicklung und die thermisch induzierte Verformungen und Spannungen wurden an zahlreichen Stellen um die Versuchsstrecke gemessen. Die Materialparameter für Temperaturrechnung wurden von SANDIA [Argüello & Holland, 2015] aus früheren Simulationen übernommen [Munson at al.1990]. Wie schon bei der Simulation des ECN-Versuch, HFCP wurde die Wärmequelle nicht expliziert modelliert, sondern das Modell wurde mit der in situ gemessenen Erhitzer Temperatur belastet. Die Streckenkontur im dieses Modell wurde abgerundet, um die Bildung von zu hohen Zugspannungen in den Streckenecken zu vermeiden. Das entspricht auch der in situ Streckengeometrie. In Abb. 5.3.1 ist das neue Modell mit den Temperaturrandbedingungen dargestellt. Es wurde auf einige dünne Zwischenschichten verzichtet. Das Modell ist an zwei Seiten eingespannt analog zu „Room D“. An oberen und unteren vertikalen Seiten wurden die Gebirgsspannungen angebracht.

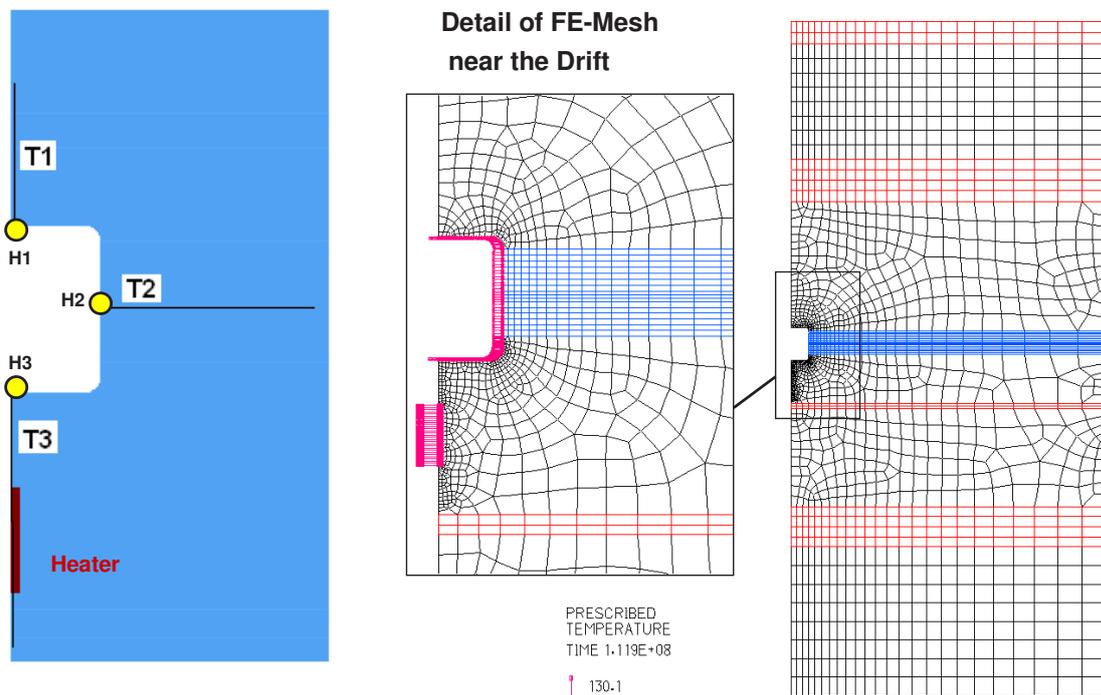


Abb. 5.3.1 Modellgeometrie, das FE-Netz und die Temperatur-Randbedingungen für Rechnung B1. Die Anhydritschichten wurden als argillaceous salt angenommen (Links in Bild sind die Punkte und die Traversen für die Auswertung der Rechenergebnisse eingetragen)

Die Temperaturerhöhung im Nahbereich der Versuchsstrecke führt zu höheren Kriechgeschwindigkeiten des Salzes und damit zu Höheren Konvergenzraten und schnellerem Spannungsabbau in der Streckenumgebung.

In den folgenden Abschnitten werden die ermittelten Konvergenzen und die Konvergenzraten der Strecke im Vergleich mit den in situ Messungen dargestellt. Die Differenz zwischen den Rechnungen und Messungen nach dem Einschalten des Erhitzers ist nicht mehr so groß wie im Falle des „Room D“ (Abb. 5.3.2 und 5.5.3)

Die thermisch induzierten Konvergenzraten stimmen sehr gut überein. Man beachte, dass in der isothermalen Zeitspanne (ca. 400 Tage) die Differenz zwischen Mess- und Simulationsergebnissen konstant bleibt. In Abb. 5.3.4 ist die zeitliche Entwicklung der Temperatur an einigen Positionen unter der Streckensohle im Vergleich mit gemessenen Temperaturen dargestellt. Die Abb. 5.3.5 stellt die berechneten Verschiebungen entlang drei Spuren dar. In Abb. 5.3.6 werden die Flächenplots der Verschiebung, der Temperatur und der Effektivspannung in der Umgebung des „Room B“ ca.1000 Tage nach Einschalten des Erhitzers dargestellt.

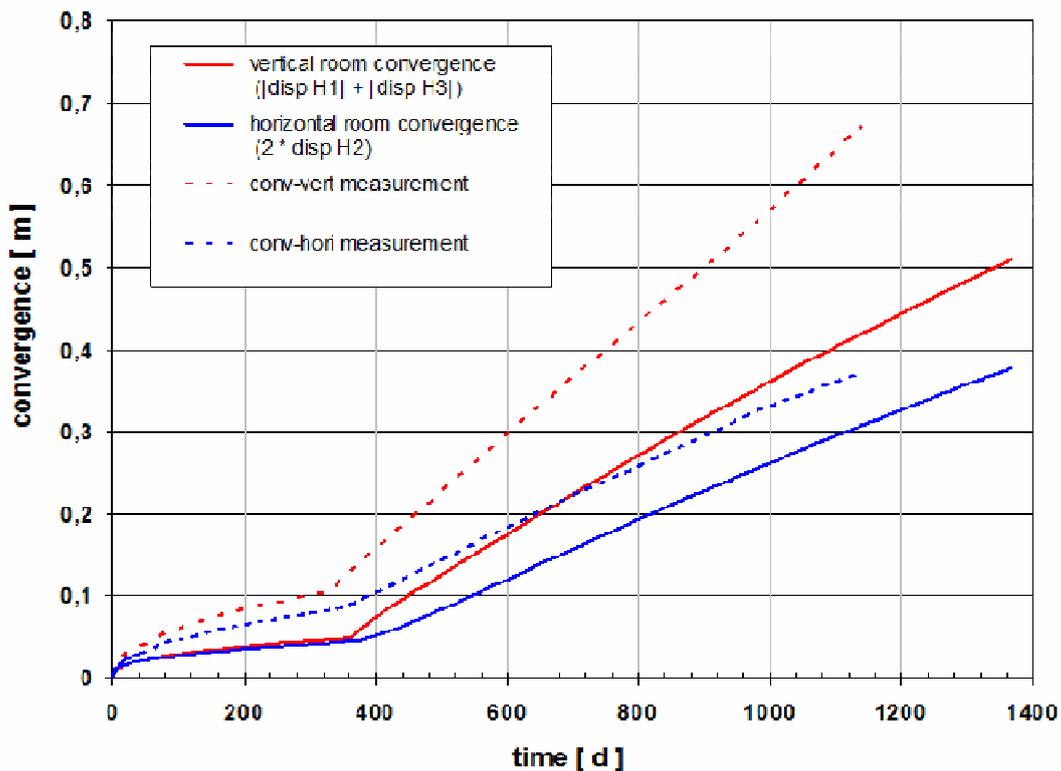


Abb. 5.3.2 Vergleich der berechneten vertikalen und horizontalen Streckenkonvergenz (durchgezogene Kurven) mit in situ Messungen (gestrichelte Kurven).

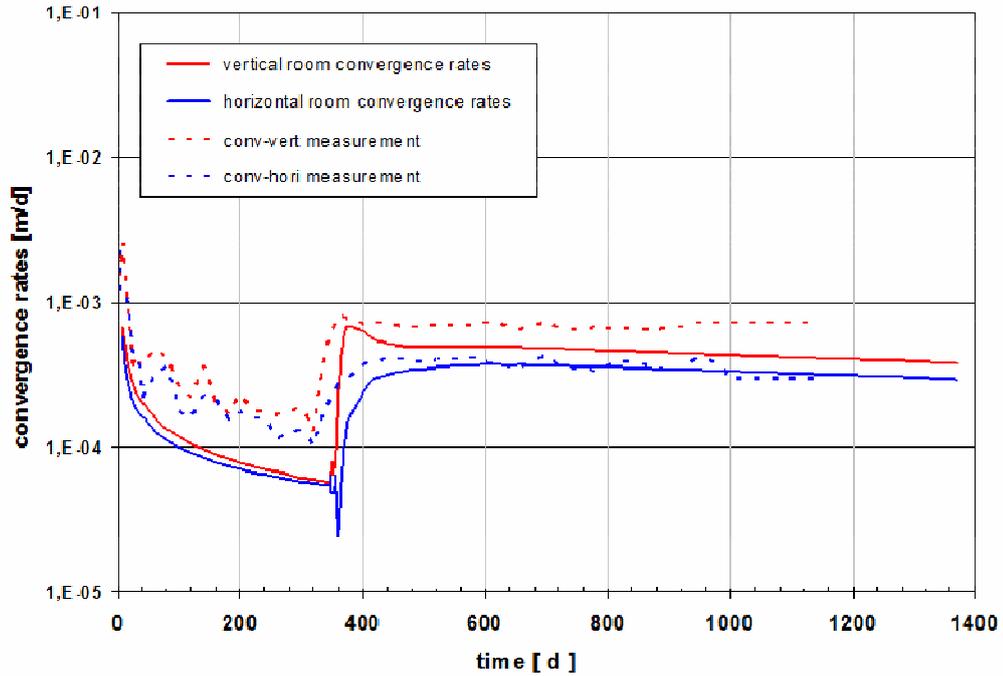


Abb. 5.3.3 Vergleich der berechneten und gemessenen Konvergenzraten für Modell B1

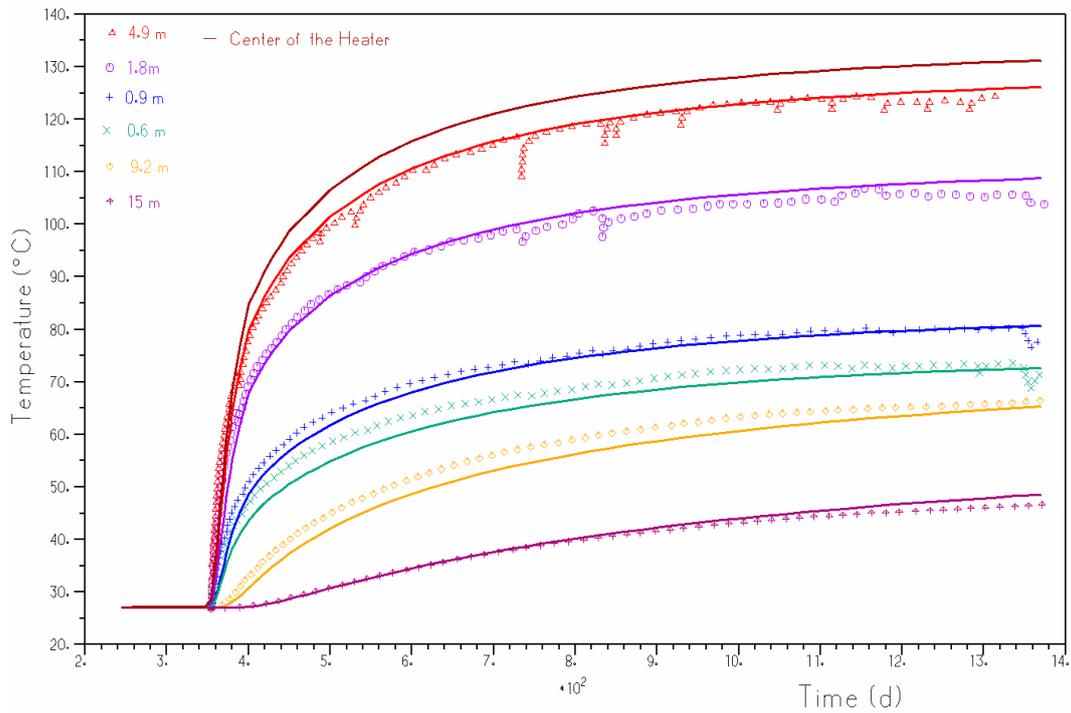


Abb. 5.3.4 Vergleich von berechneten und gemessenen zeitlichen Temperaturentwicklungen an mehreren Positionen unter der Streckensohle. Die Kurve „Mitte der Erhitzer“ stellt die vorgegebene Erhitzer-Temperaturbelastung dar.

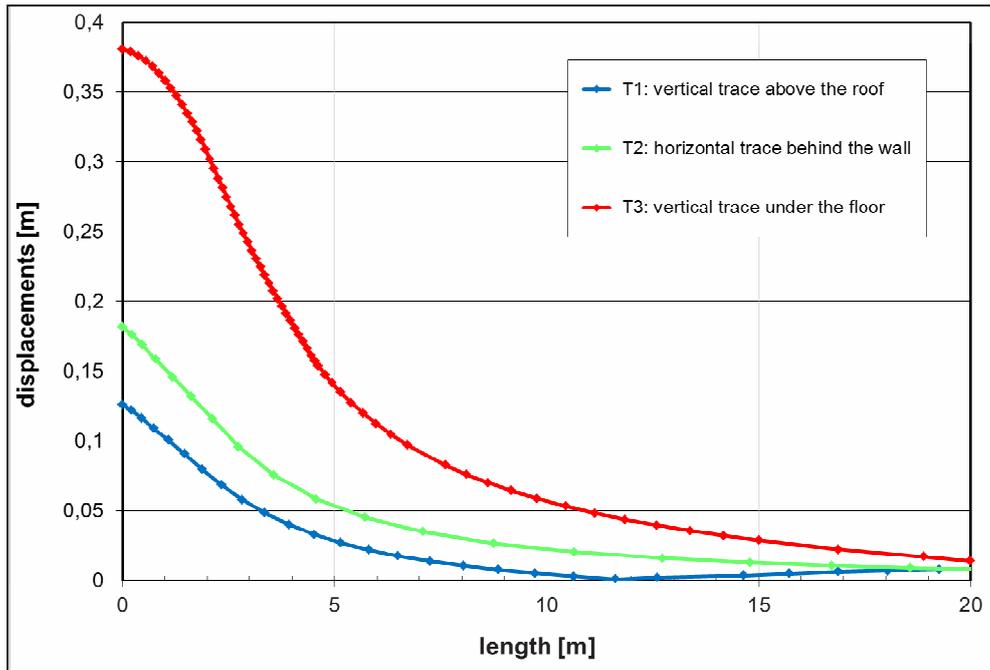


Abb. 5.3.5 Berechnete Verschiebungen entlang der Spuren T1, T2 und T3, Tausend Tage nach dem Anschalten des Erhitzers.

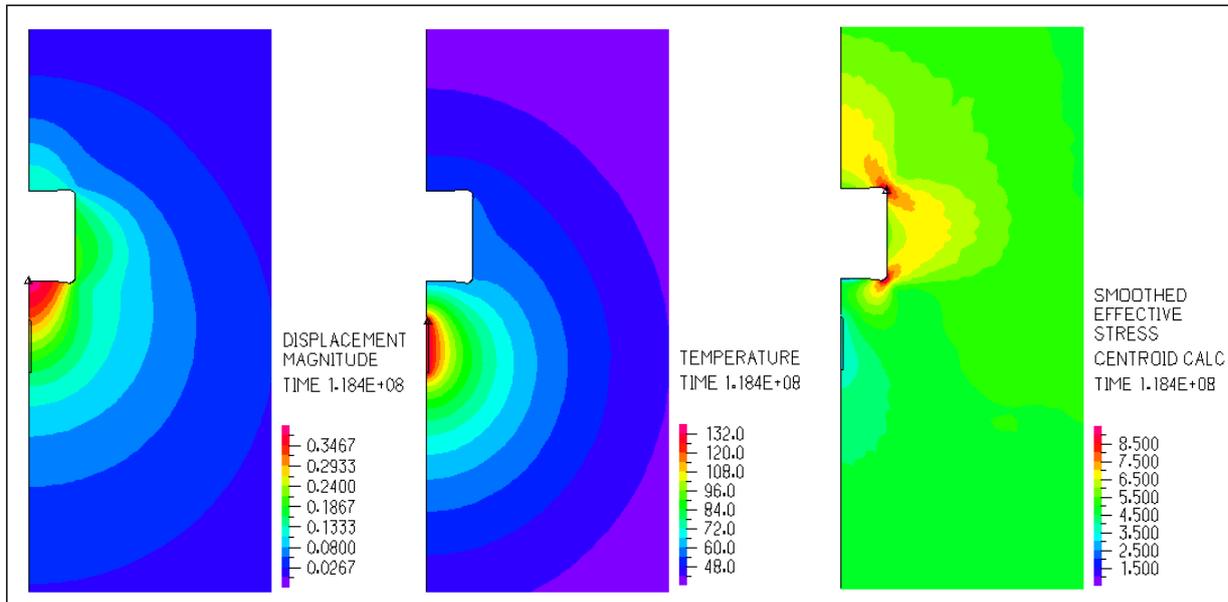


Abb. 5.3.6 Flächenplot der Verschiebung, Temperatur und Effektivspannung ca. 1400 Tage nach der Streckenerstellung.

In einem nachfolgenden Berechnungsschritt sollen die verschiedenen Salz- und die Anhydritschichten berücksichtigt werden. Das Programm ADINA berechnet keine Temperatur und thermischen Spannungen weder im Drucker-Prager noch im Mohr-Coulombs-Stoffmodell. Die entsprechenden Ergänzungen konnten im Berichtszeitraum nicht mehr ausgeführt werden.



## 6. Zusammenfassung

Durch den Bergwerksaufschluss wird der Primärspannungszustand im Salzgebirge gestört und ruft eine Schädigung des Salzes in der Umgebung von Hohlräumen hervor und es findet gleichzeitig eine Spannungsumlagerung statt, die von dem technischen Endlagerkonzept (Hohlraumgeometrie, Bauverfahren) beeinflusst wird, und deren Auswirkungen für die spätere Entwicklung der Spannungen und Verformungen im Endlagerbereich entscheidend sind. Schließlich führen die in die Endlagerformation eingebrachten radioaktiven Abfälle wegen ihrer Wärmeabgabe über lange Zeiträume zu einem Erwärmen des Einlagerungsbereiches bis zu 200 °C. Unter Druck- und Temperaturbelastung nimmt die Kriechfähigkeit des Steinsalzes zu und in Folge der höheren Kriechverformungen des umliegenden Salzes konvergieren die vorhandenen offenen Hohlräume schneller.

Zur Analyse der zeitlichen und räumlichen Entwicklung von Temperatur, Verformungen und Spannungen im Endlager unter verschiedenen Bedingungen stehen bereits numerische Rechenprogramme auf der Grundlage der Differenzen- und Finite-Element-Verfahren sowie Stoffgesetze für Steinsalz zur Verfügung. Schwerpunktmäßig wurden die folgenden Effekte auf das Verhalten von Steinsalz systematisch untersucht:

- Einfluss der Temperaturerhöhung auf das Kriechen, die Dilatanz- und die Schädigungsentwicklung
- Verheilung von Rissen oder Re-Konsolidation von Auflockerungsbereichen mit Porosität und Permeabilitätsabnahme.

Die Leistungsfähigkeit der Rechenprogramme und der implementierten Stoffmodelle wurden in diesem Folgevorhaben zum Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz demonstriert. Es wurden folgenden Arbeitspakete durchgeführt:

- Gekoppelte thermo-mechanische Benchmark Rechnungen zu Spannungs-, Verformungs-, Dilatanz- und Schädigungsentwicklung im Steinsalz. Das Hauptziel dieser Rechnung ist die Bewertung der Rechenmodelle und der erweiterten Stoffgesetze für Steinsalz durch Vergleich der Rechenergebnisse mit den Messungen aus den ECN-Erhitzerexperimenten in einer 300 m tiefen Bohrung in der Schachanlage Asse.
- Im ersten Versuch, IFC (Isothermal Free Convergence) wurde die Konvergenz des Bohrlochs an mehreren Positionen über einen Zeitraum von ca. 1200 Tagen gemessen und in der ersten Phase des Project simuliert.
- Zur Untersuchung der thermisch induzierten Bohrlochkonvergenzen wurde der Erhitzerversuch HFCEP (Heated Free Convergence Probe) modelliert, bei dem neben der Temperatur auch die Bohrlochkonvergenzen gemessen wurden.
- Für die Analyse der Auflockerungszone und deren Verheilung im Salz wurden die Verhältnisse am so genannten Dammjoch auf der 700m Sohle in der Schachanlage Asse modelliert.

- In der letzten Phase des Verbundprojekts, im Rahmen einer Deutsch-Amerikanischen Zusammenarbeit wurden Modellberechnungen zu zwei gut dokumentierten Untertagestrukturen „Room B“ und „Room D“ in der WIPP-Anlage untersucht. „Room D“ ist eine unbeheizte Referenzstrecke, in der bei natürlichen Gebirgstemperatur Vergleichsmessungen durchgeführt wurden. Bei den Simulationen des „Room B“ wurde der Temperatureinfluss auf die Dilatanz- und Schädigungsentwicklung berücksichtigt. Aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens des WIPP-Steinsalzes wurden zuerst spezifische Laborversuche zum thermo-mechanischen Verformungsverhalten der beiden Hauptsalztypen „clean salt“ und „argillaceous salt“ durchgeführt.

Die erhaltenen Rechenergebnisse zeigen, dass die Entwicklung von Stoffmodellen für Steinsalz mit den hier vorgestellten Gleichungen noch nicht als abgeschlossen betrachtet werden kann. Im Institut für Nukleare Entsorgung werden die künftigen wichtigen Arbeiten nicht mehr weitergeführt.

# Literatur

ADINA R & D, Inc., Report ARD 01-9, Watertown, MA, US, [www.adina.com](http://www.adina.com), 2015.

Argüello, J.G. & Holland, J. (2015): Two problems to benchmark numerical codes for use in potential HLW salt repositories. In L. Roberts, K. Mellegard & F. Hansen (eds.): *The Mechanical Behavior of Salt VIII, Proceedings of the 8th Conference, 26-28 May 2015*, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, USA, p. 361-371. London: Taylor & Francis Group (Balkema).

Bathe K.-J. (2002): *Finite-Elemente-Methoden*. 2. Aufl., Springer, ISBN 3-540-66806-3.

Cristescu, N. & U. Hunsche (1998): *Time Effects in Rock Mechanics*. Series: Materials, Modelling and Computation, John Wiley & Sons, 342, Chichester, UK.

Doeven, I., Soullié, P.P. & Vons, L.H. (1983): Convergence Measurements in the dry-drilled 300 m borehole in the Asse II Saltmine. *European Appl. Res. Rept. Nucl. Sci. Technol.* 5(2), 267–324.

Düsterloh, U., Herchen, K., Lux, K.-H., Salzer, K., Günther, R.-M., Minkley, W., Hampel, A., Argüello, J.G. & Hansen, F.D. (2015): Joint Project III on the Comparison of Constitutive Models for the Thermo-Mechanical Behavior of Rock Salt - III. Extensive laboratory test program with argillaceous salt from WIPP and comparison of test results. In L. Roberts, K. Mellegard & F. Hansen (eds.): *The Mechanical Behavior of Salt VIII, Proceedings of the 8th Conference, 26-28 May 2015*, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, p. 13-21. London: Taylor & Francis Group (Balkema).

GRS, (2001): *Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszonen um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit von Hohlraumabstand und Spannungszustand (ALPHA 2)*. Final Report BMBF-Research-Project 02E9118.

Hampel, A., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Leuger, B., Zapf, D., Staudtmeister, K., Rokahr, R., Herchen, K., Wolters, R., Düsterloh, U. (2010): *Abschlussbericht zum BMBF Verbundprojekt II (FZK 02C177-1617), Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*.

Hampel, A., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Leuger, B., Zapf, D., Staudtmeister, K., Rokahr, R., Herchen, K., Wolters, R., Lux, K.-H., Schulze, O., Heemann, U. & Hunsche, U. (2010): *Benchmarking of Geomechanical Constitutive Models for Rock Salt*. In *Proc. 44th US Rock Mechanics Symposium, Salt Lake City, June 2010*, ARMA10-287, p. 27-30. American Rock Mechanics Association (ARMA).

Hampel, A., Argüello, J.G., Hansen, F.D., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Lux, K.-H., Herchen, K., Düsterloh, U., Pudewills, A., Yildirim, S., Staudtmeister, K., Rokahr, R., Zapf, D., Gährken, A., Missal, C. & Stahlmann, J. (2013): *Benchmark Calculations of the Thermo-Mechanical Behavior of Rock Salt - Results from a US-German Joint Project*. In L.J. Pyrak-Nolte, A. Chan, W. Dershowitz, J. Morris & J. Rostami (eds.): *Proc. of the 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, 23-26 June 2013, San Francisco, USA*, ARMA 13-456. American Rock Mechanics Association (ARMA).

Hampel, A., Günther, R.-M., Salzer, K., Minkley, W., Pudewills, A., Yildirim, S., Rokahr, R., Gährken, A., Missal, C., Stahlmann, J., Herchen, K. & Lux, K.-H. (2015): *Joint Project III on the Comparison of Constitutive Models for the Thermo-Mechanical Behavior of Rock Salt - I. Overview and results from model calculations of healing of rock salt*. In L. Roberts, K. Mellegard & F. Hansen (eds.): *The Mechanical Behavior of Salt VIII, Proc. of the 8th Conference, 26-28 May 2015*, South Dakota School of Mines & Technology, Rapid City, SD, p. 349-359. London: Taylor & Francis Group (Balkema).

- Hein, H. J. (1991): Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat. Dissertation, RWTH Aachen.
- Hunsche, U. (1993): Strength of rock salt at low mean stress. Geotechnik-Sonderheft, Glückauf, Essen, pp. 160-163.
- Hunsche, U. & Schulze, O. (2005): 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: 97892289487948, Office for Official Publications.
- Lowe, M.J.S. & Knowles, N.C. (1989): COSA II: Further benchmark exercises to compare geomechanical computer codes for salt. Final report EUR 12135 EN. ISBN 92-825-9943-4. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Lux. K.-H. & Eberth, S. (2007): Fundamentals and first application of a new healing model for rock salt. Proc. of the 6<sup>th</sup> Conf. on Mech. Behavior of Salt, Hannover, Germany.
- Munson, D.E., Jones, R.L., Ball, J.R., Clancy, R.M., Hoag, D.L. & Petney, S.V. (1990): Overtest for Simulated Defense High-Level Waste (Room B): In Situ Data Report (May 1984 - February 1988), Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Thermal/Structural Interactions Program. Report SAND89-2671, Sandia National Laboratories.
- Munson, D.E., Jones, R.L., Hoag, D.L. & Ball, J.R. (1988): Mining Development Test (Room D): In Situ Data Report (March 1984 - May 1988), Waste Isolation Pilot Plant (WIPP), Thermal/Structural Interactions Program. Report SAND88-1460 (UC-70), Sandia National Laboratories.
- Pudewills, A. (2007): Modeling of hydro-mechanical behavior of rock salt in the near field of repository excavations. Proc. of the 6<sup>th</sup> Conf. on Mech. Behavior of Salt, Hannover, Germany. p. 119-127.
- Pudewills, A. (2011): Numerische Simulation zum mechanischen Langzeitverhalten eines realen Untertagebauwerks im Steinsalz, BMBF - Verbundprojekt 02C1597, Einzelbericht zum Teilprojekt 3, KIT Scientific Reports, KIT-SR 7579.
- Rath, J.S. & Argüello, J.G. (2012): Revisiting Historic Numerical Analyses of the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) Room B and D in-situ Experiments Regarding Thermal and Structural Response. Report SAND2012-7525, Sandia National Laboratories.

## TABELLENVERZEICHNIS

- Tab. 1      *Physikalische Eigenschaften von Steinsalz, verwendet in der ADINA- Analyse.*
- Tab. 3.2.1    *Zusammenstellung der Materialparametern von Steinsalz für Temperaturrechnung.*
- Tab. 5.2      *Stoffparameter für Anhydrit und Polyhalit.*

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abb. 2.1    *Spannungsdiagramm für Steinsalz zur Darstellung der Bedingungen, unter denen die Verformungsphänomene auftreten [Hunsche & Schulze,2005].*
- Abb. 3.1    *Anordnung der betrachteten ECN-Versuchen in 300m tiefe Bohrloch in der Asse Schachtanlage II.*
- Abb. 3.1.1   *IFC-Test: FE-Netz für 3D Rechnung. Abb. 3.1.3    IFC-Versuch : Zeitlicher Verlauf der Bohrlochkonvergenz für verschiedene Modelle.*
- Abb. 3.1.2   *Zeitlicher Verlauf der Bohrlochkonvergenz für verschiedene Kriechgesetze bei einem Gebirgsdruck von 21 MPa.*
- Abb. 3.1.3   *IFC-Versuch: Zeitlicher Verlauf der Bohrlochkonvergenz für verschiedene Modelle.*
- Abb. 3.2.1   *Darstellung des 3D-Modells für die gekoppelte thermo-mechanische Berechnung des HFC - Experiments in einer Tiefe von 231 m in Bohrloch. Das Modell stellt einen Viertel der Versuchsgeometrie dar. Der Erhitzer wurde als Monolith modelliert, der Luftspalt zwischen Bohrlochwand und Erhitzer wurde gleich 5 cm angenommen.*
- Abb. 3.2.2   *HFC-Versuch: Vergleich der Temperaturentwicklung an verschiedenen Positionen im Salz mit in situ Messergebnissen am Erhitzerarm.*
- Abb. 3.2.3   *Vergleich berechneter und gemessener Bohrlochkonvergenzen an verschiedenen Positionen im Salz.*
- Abb. 3.2.4   *Berechnete Verteilung des Temperaturfeldes nach 18 Tagen thermischer Belastung. Links ist eine detaillierte Darstellung des Erhitzer-Bereiches.*
- Abb. 3.2.5   *Berechnete Verteilung der minimalen Hauptspannung und Effektivspannung nach 19 Tagen thermischer Belastung.*
- Abb. 3.2.6   *Vergleich der berechneten Kriechdehnungen (durchgezogenen Linien) mit der IfG-Kriechversuchen (Symbols) an Asse-Steinsalz.*
- Abb. 3.2.7   *Vergleich der gemessenen und berechneten Dehnungsraten für Labortest K-7 und K-8.*
- Abb. 3.2.8   *Vertikaler Verlauf der Temperaturentwicklung an der Bohrlochwand.*
- Abb. 3.2.9   *Vertikaler Verlauf der Bohrlochkonvergenz am Erhitzer-Bereich.*
- Abb. 3.2.10   *Vertikaler Verlauf der berechneten Äquivalentsspannungen entlang der Bohrlochwand am Erhitzerbereich.*

- Abb. 3.2.11 *Berechnete Temperatur und Effektivspannungen in der Erhitzerumgebung nach ca. 19 Tagen.*
- Abb. 4.1 *Bild der Strecke mit dem Dammjoch in der Schachtanlage Asse auf 700m Tiefe (links) und rechts die schematische Darstellung der Dammjoch-Strecke.*
- Abb. 4.2 *Diskretisiertes Berechnungsmodell für die Dammjoch-Struktur und die verwendeten elastischen Materialkennwerte. Die oberen und äußeren Flächen sind mit dem lithostatischen Druck belastet.*
- Abb. 4.1.1 *Zeitlicher Verlauf der Versuchskörper Belastung (TUC-Test 307).*
- Abb. 4.1.2 *Entwicklung der Volumendehnung im Vergleich mit Messungen der TU-Clausthal.*
- Abb. 4.1.3 *Zeitlicher Verlauf der Versuchskörper Belastung (TUC-Test 401).*
- Abb. 4.1.4 *Entwicklung der Volumendehnung im Vergleich mit Messungen der TU-Clausthal.*
- Abb. 4.2.1 *Zeitliche Entwicklung der Streckenkonvergenz an verschiedenen Positionen des offenen Streckenmodells.*
- Abb. 4.2.2 *Entwicklung der Verschiebungen um die offene Strecke nach 3 und nach 90 Jahren.*
- Abb. 4.2.3 *Zeitliche Entwicklung der Dilatanz an verschiedenen Positionen für das offene Streckenmodell und die berechnete Volumendehnung um die Strecke nach 88 Jahren.*
- Abb. 4.2.4 *Berechnete Äquivalentspannungen um die offene Strecke und der horizontale Verlauf der Spannungen auf halber Strecken zu verschiedenen Zeitpunkten sowohl für die offene als auch für die ausgebaute Strecke.*
- Abb. 4.2.5 *Berechnete Normal- und Effektivspannungen entlang einer schrägen Spur nach 88 a.*
- Abb. 4.2.6 *Berechnete effektive Kriech- und Volumendehnung entlang einer schrägen Spur (45°) nach 88 Jahren.*
- Abb. 4.2.7 *Volumendehnung im Steinsalz in der Umgebung des Dammjochs 3 und 83 Jahren nach der Streckenerstellung.*
- Abb. 5.1.1 *Nachrechnung der IfG-Kriechversuche an „clean salt“ bei Temperaturen von 24 °C, 60 °C und 80°C und unterschiedlichen Manteldrücken.*
- Abb. 5.1.2 *Nachrechnung eines zwei Stufen Kriechversuchs an „argilaceous salt“ bei Raumtemperaturen zusammen mit der berechneten Dehnungsrate.*
- Abb. 5.1.3 *Nachrechnung eines zwei Stufen Kriechversuchs an „argilaceous salt“ bei Raumtemperaturen mit der berechneten Dehnungsrate.*
- Abb. 5.1.5 *Gegenüberstellung von gemessenen und von allen Partner verwendeten sekundären Kriechdehnungsraten bei Raumtemperatur.*
- Abb. 5.1.6 *Gegenüberstellung von gemessenen und von allen Partner verwendeten sekundären Kriechdehnungsraten bei 80 °C.*

- Abb. 5.1.7 *Simulation der Festigkeitsversuche bei unterschiedlichen Manteldrücken und Vergleich mit den Messergebnissen. Links sind die berechneten volumetrischen Verformungen dargestellt.*
- Abb. 5.1.8 *Die Simulation der TU-Clausthal Festigkeitsversuche bei unterschiedlichen Manteldrücken und Temperaturen und Vergleich mit den Messergebnissen. Links sind die berechneten und gemessenen volumetrischen Verformungen dargestellt.*
- Abb. 5.1.9 *Bruch – und Dilatanzfestigkeit in Abhängigkeit von der Minimalspannung für Asse Salz und WIPP clean und argillaceous salt.*
- Abb. 5.2.1 *Modellgeometrie und geologische Struktur der Salzformation in der Umgebung von „Room D“ und das bei der numerischen Simulation verwendete Element-Netz.*
- Abb. 5.2.2 *Vergleich der gemessenen Konvergenzen (gestrichelte Linien) in Room D des WIPP-Endlager mit denen aus Berechnung (durchgehende Linien) mit Modell D1 und D2.*
- Abb. 5.2.3 *Berechneten äquivalent Spannungen entlang drei Traversen vertikal und horizontal nach 1470 Tagen nach Streckenerstellung.*
- Abb. 5.2.4 *Berechnete Effektiv- und Minimalnormalspannungen sowie die Verschiebung nach 1470 Tagen Versuchszeit („Room D“, Modell D2).*
- Abb. 5.3.1 *Modellgeometrie, das FE-Netz und die Temperatur-Randbedingungen für Rechnung B1. Die Anhydritschichten wurden als argillaceous salt angenommen (Links in Bild sind die Punkte und die Traversen für die Auswertung der Rechenergebnisse eingetragen).*
- Abb. 5.3.2 *Vergleich der berechneten vertikalen und horizontalen Streckenkonvergenz (durchgezogene Kurven) mit in situ Messungen (gestrichelte Kurven).*
- Abb. 5.3.3 *Vergleich der berechneten und gemessenen Konvergenzraten für Modell B1.*
- Abb. 5.3.4 *Vergleich von berechneten und gemessenen zeitlichen Temperaturentwicklungen an mehreren Positionen unter der Streckensohle. Die Kurve „Mitte der Erhitzer“ stellt die vorgegebene Erhitzer-Temperaturbelastung dar.*
- Abb. 5.3.5 *Berechnete Verschiebungen entlang der Spuren T1, T2 und T3, Tausend Tage nach dem Anschalten des Erhitzers.*
- Abb. 5.3.6 *Flächenplot der Verschiebung, Temperatur und Effektivspannung ca. 1400 Tage nach der Strecken Erstellung.*



ISSN 1869-9669  
ISBN 978-3-7315-0542-6

ISBN 978-3-7315-0542-6



9 783731 505426 >