



Technische
Universität
Braunschweig

Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS)

(Verbundprojekt: Teilvorhaben 5)

Endbericht des Teilvorhabens

Institut für Geomechanik und Geotechnik
Technische Universität Braunschweig

Ida Epkenhans, M.Sc.

Svenja Wacker, M.Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann

Förderkennzeichen 02E11446

01.04.2016 bis 31.03.2019, verlängert bis 31.03.2022

Braunschweig, März 2022

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Betreut von:



PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 02E11446D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Stoffmodell TUBSsalt	7
2.1	Beschreibung	7
2.1.1	Elastisches Verhalten	9
2.1.2	Primäres Kriechen und Erholungskriechen	9
2.1.3	Sekundäres Kriechen	10
2.1.4	Tertiäres Kriechen	10
2.1.5	Kriech- und Schubbruch	11
2.1.6	Verheilung	12
2.1.7	Zugbruch	13
2.1.8	Temperatur	13
2.2	Grenzen der Anwendbarkeit	14
3	AP 1 Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen	15
3.1	Aufstieg eines Salzstocks	15
3.2	Versuchsprogramm zum Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen	18
3.2.1	Orientierende Versuche	18
3.2.2	Langzeitkriechversuch TCC34	19
3.2.3	Nachrechnung des TCC34 mit dem Stoffmodell TUBSsalt	21
3.2.4	Konsolidationstest TCC41	22
3.2.5	Versuchsreihen zur Untersuchung des Verformungsverhaltens bei kleinen Deviatorspannungen	22
3.3	Weiterverarbeitung Ergebnisse	23
4	AP 2 Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung	24
4.1	Versuche Asse765 und Asse769	24
4.2	Nachrechnung der Versuche Asse 765 und Asse 769 mit dem Stoffmodell TUBSsalt	25
4.3	Versuche der Series 1 bis 3 zur Untersuchung der Schädigungsrückbildung	26
4.3.1	Versuchsablauf und Ergebnisse der Serien 1 bis 3	26
4.3.2	Anpassung des Stoffmodells	29
4.3.3	Nachrechnung der Versuchsergebnisse der Serie 1 bis 3 mit dem Stoffmodell TUBSsalt	30
4.4	Versuche der Serie 4 zur Untersuchung der Schädigungsrückbildung	32
4.4.1	Versuchsablauf und Ergebnisse	32
4.4.2	Nachrechnung der Versuchsergebnisse	36

4.5	Nachrechnung der Verheilungsversuche an einem Zylinderausschnitt (Druckplattenversuche)	37
4.6	Würfelberechnungen zur Richtungsabhängigkeit der Schädigung und der Schädigungsrückbildung	40
5	AP 3 Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen	47
5.1	Berechnung von Spaltzugversuchen (Brazilian Test)	47
5.1.1	Berechnungsergebnisse Modell V1	47
5.1.2	Berechnungsergebnisse Modell V2	48
5.1.3	Berechnungsergebnisse Modell V3	49
5.2	Berechnung eines Biegebalkens	51
5.3	Berechnung des Versuchs Heated Free Convergence Probe (HFCP)	56
5.4	Berechnung des Modells Room D	57
6	AP 4 Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)	60
7	AP 5 Virtuelle Demonstratoren	61
7.1	Entwicklung des virtuellen Demonstrators 1	61
7.1.1	Modell auf Basis Room D	61
7.1.2	Modell TUBS	62
7.1.3	Modell LUH	64
7.2	Finale Berechnungen Virtueller Demonstrator 1	68
7.2.1	Ergebnisse der Berechnungen am finalen Modell des Virtueller Demonstrators 1	69
7.3	Entwicklung des virtuellen Demonstrators 2	72
7.3.1	Modell IfG	72
7.4	Finale Berechnungen Virtueller Demonstrator 2	73
7.4.1	Ergebnisse der Berechnungen am Virtueller Demonstrator 2	73
8	Zusammenfassung und Ausblick	78
9	Summary	79
10	Literaturverzeichnis	80
11	Symbolverzeichnis	81
	Anhang A1 - Parametersatz Asse Speisesalz	84
	Anhang A2 - Parametersatz WIPP clean salt (Virtuelle Demonstratoren)	85
	Anhang B - Veröffentlichungen	86
	Anhang C – Formeln	87

APArbeitspaket
HFCPHeated Free Convergence Probe
IfGInstitut für Gebirgsmechanik mbH
JP III Joint Project III
LUH..... Leibniz Universität Hannover

TUBS..... Technische Universität Braunschweig
TUC.....Technische Universität Clausthal
WIPP..... Waste Isolation Pilot Plant

1 Einleitung

Das Verbundprojekt „Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS)“ hat das Ziel, die existierenden Stoffmodelle für den Nachweis zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und zu qualifizieren.

Numerische Modellberechnungen sind in allen Phasen eines Endlagers relevant und damit ein wichtiges Instrumentarium bei der Planung, der Errichtung, dem Betrieb und dem Nachweis eines langfristig sicheren Einschusses der eingelagerten Abfälle. Die Stoffmodelle sollen in der Lage sein, das thermo-mechanische und hydraulische Verhalten des Wirtsgesteins in Simulationsberechnungen abzubilden und verlässlich in die Zukunft zu extrapolieren.

In den vorangegangenen Projekten haben die Partner ihre Stoffmodelle anhand von Daten aus Laborversuchen und in-situ-Messungen sowie den Vergleich der Stoffmodelle miteinander überprüft und optimiert. Im Rahmen des Verbundprojektes WEIMOS wurde diese Arbeit weitergeführt, um die Stoffmodelle zu zuverlässigen Instrumentarien bei der Berechnung von Strukturen in untertägigen Steinsalzformationen im Rahmen der Endlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen weiterzuentwickeln. Der Fokus der Untersuchungen lag auf dem Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen sowie dem Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung. Weiterhin wurde das Verformungsverhalten bei Extensionsbelastung sowie der Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung untersucht.

Das Institut für Geomechanik und Geotechnik der Technischen Universität Braunschweig beteiligt sich mit dem Stoffmodell *TUBSsalt*. Das Stoffmodell *TUBSsalt* wurde anhand der neuen Erkenntnisse aus den Laborversuchen, sowie den Berechnungen von in-situ-Beispielen und der Diskussion mit den Projektpartnern stetig weiterentwickelt.

2 Stoffmodell TUBSsalt

2.1 Beschreibung

Das Stoffmodell *TUBSsalt* wurde am Institut Geomechanik und Geotechnik (vormals Institut für Grundbau und Bodenmechanik) der Technischen Universität Braunschweig entwickelt und im Rahmen dieses und des vorangegangenen Verbundprojektes „Vergleich aktueller Stoffgesetze anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz“ [Missal, Gährken und Stahlmann, 2016b] weiterentwickelt. Weitere Anpassungen wurden im Rahmen der Dissertationen [Gährken, 2018] und [Missal, 2019] vorgenommen. Entsprechend der von [Missal, 2019] eingeführten Bezeichnung trägt die aktuellste Version des Stoffmodells den Namen *TUBSsalt_perm*. Da im Projekt WEIMOS keine Berechnungen zur Permeabilität vorgenommen wurden, wird im Folgenden weiterhin der Name *TUBSsalt* geführt.

TUBSsalt ist in der Lage Kriechanteile aus primärem, sekundärem und tertiärem Kriechen, sowie Schädigung, Bruch und Verheilung abzubilden. Ebenfalls kann der Einfluss der Temperatur berücksichtigt werden. Abbildung 2-1 zeigt *TUBSsalt* als Rheologisches Modell, bestehend aus einem Maxwell und mehreren Bingham-Körpern, mit den dazugehörigen Kenngrößen in Form von Steifigkeit E , Viskosität η oder Fließfunktion F . Die einzelnen Verformungsanteile werden *TUBSsalt* additiv verknüpft und sollen im Folgenden vorgestellt werden.

Die in *TUBSsalt* verwendeten Konstanten können Tabelle 2-1 entnommen werden. Tabelle 2-2 gibt eine Übersicht der in *TUBSsalt* verwendeten Parameter, die für jeden Salztyp anhand von Laborversuchen sowie Berechnungen von in-situ Beispielen bestimmt werden müssen. Informationen zur Parameterbestimmung sind [Gährken, Missal und Stahlmann, 2015], [Missal, Gährken und Stahlmann, 2016a] und [Missal, Gährken und Stahlmann, 2016b] zu entnehmen.

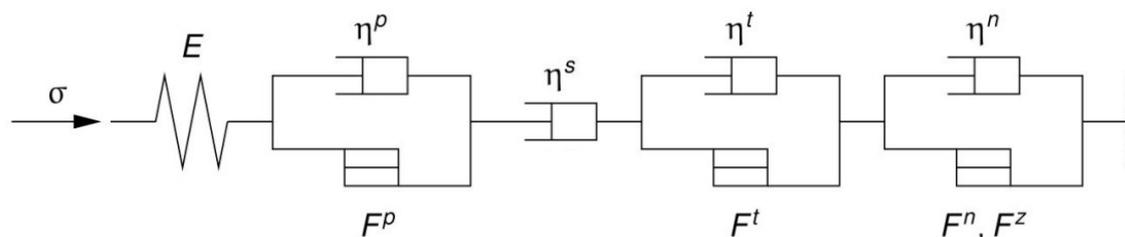


Abbildung 2-1: Rheologisches Modell *TUBSsalt* (nach [Missal, Gährken und Stahlmann, 2016b])

Tabelle 2-1: Übersicht der Konstanten für *TUBSsalt*

Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit
p_0	Dimensionskonstante	1	MPa
η_0	Referenzviskosität	86400	MPa·d
$\dot{\epsilon}_0$	Referenzrate	1,0E-5	1/s
$\epsilon_{eq,min}^p$	Mindestverfestigung des primären Kriechens	0,0001	-
R	Gaskonstante	8,314	J/(K·mol)
T_0	Referenztemperatur	300	K
T_m	Schmelztemperatur von Steinsalz	1070	K
FA	Faktor für Temperaturabhängigkeit	-0,73	-

Tabelle 2-2: Übersicht der in TUBSsalt verwendeten Parameter

Nr.	Symbol	Bezeichnung	Bezeichnung (englisch)	Einheit
Elastisches Verhalten				
1	K_0	Kompressionsmodul	Bulk modulus	MPa
2	G_0	Schubmodul	Shear modulus	MPa
3	p^{el}	Schädigungsexponent	Damage exponent	-
Primäres Kriechen				
4	η^p	Viskosität des primären Kriechens	Viscosity of primary creep	MPa·d
5	E^p	Verfestigungsmodul	Hardening modulus	MPa
6	$\sigma_{eq,0}^p$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^p	Start of the slope change	MPa
7	p^p	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^p	Curvature parameter for the stress dependence of n^p	-
Sekundäres Kriechen				
8	η^s	Viskosität des sekundären Kriechens	Viscosity of secondary creep	MPa·d
9	$\sigma_{eq,0}^s$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^s	Start of the slope change	MPa
10	p^s	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^s	Curvature parameter for the stress dependence of n^s	-
Tertiäres Kriechen				
11	η^t	Viskosität des tertiären Kriechens	Viscosity of tertiary creep	MPa·d
12	t_0	Anfangssteigung der Dilatanzgrenze	Initial Slope of the damage boundary	°
13	t_1	Maximale Fließspannung der Dilatanzgrenze	Maximum yield stress of the damage boundary	MPa
14	m^t	Schädigungsbeiwert	Damage coefficient	-
15	ψ	Dilatanzwinkel	Angle of dilatancy	°
16	$\varepsilon_{v,d,b}$	Bruchvolumendehnung	Volumetric strain at failure	-
Verheilung				
17	η^v	Viskosität der Verheilung	Viscosity of healing	MPa·d
18	m^v	Verheilungsbeiwert	Healing coefficient	-
19	v^1	Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit		-
Zugbruch, Kriech und Schubbruch				
20	η^n	Viskosität im Nachbruch	Viscosity after failure	MPa·d
21	n_0	Anfangssteigung der Nachbruchfestigkeit	Initial slope	°
22	n_1	Maximale Nachbruchfestigkeit	Maximum yield stress	MPa
23	m^n	Nachbruchbeiwert	Post failure coefficient	-
24	σ_0^z	Zugfestigkeit	Tensile strength	MPa
Sonstige				
25	Q	Aktivierungsenergie	Activation energy	J/mol
26	ρ	Dichte	Density	Gg/m ³

2.1.1 Elastisches Verhalten

Die elastischen Verzerrungen werden nach Gleichung (2.1) berechnet, wobei D der Steifigkeitsmatrix entspricht. Das elastische Verhalten wird über die beiden Parameter Kompressionsmodul K (2.2) und Schubmodul G (2.3) gesteuert. Aufgrund der Entfestigung von Steinsalz infolge Schädigung werden Kompressions- und Schubmodul in Abhängigkeit vom Grad der Schädigung bis auf das Niveau der Restfestigkeit abgemindert, die 10% der ursprünglichen Moduln entspricht. Der Grad der Schädigung wird als Verhältnis der aktuellen Schädigungsvolumendehnung $\varepsilon_{v,d}$ zur Bruchvolumendehnung $\varepsilon_{v,d,b,*}$ ausgedrückt.

$$\dot{\varepsilon}^{el} = D^{-1} \cdot \dot{\sigma} \quad (2.1)$$

$$K = q^{el} \cdot \left(\frac{K_0 - K_r}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}}\right)^{\frac{1}{p^{el}}}\right)^{p^{el}}} + K_r \right) \quad (2.2)$$

$$G = q^{el} \cdot \left(\frac{G_0 - G_r}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}}\right)^{\frac{1}{p^{el}}}\right)^{p^{el}}} + G_r \right) \quad (2.3)$$

2.1.2 Primäres Kriechen und Erholungskriechen

Das Primäre Kriechen wird in *TUBSsalt* entsprechend Gleichung (2.4) berechnet. Primäres Kriechen und Erholung treten ausschließlich nach einem Wechsel der Belastung auf. Durch eine Erhöhung des Spannungsdeviators ist mit hohen primären Kriechraten zu rechnen, mit fortschreitender Verformung klingen die Raten ab, bis keine primären Verformungen mehr auftreten. Dies wird in *TUBSsalt* über die Fließfunktion F^p (2.5) abgebildet. Die primäre Kriechrate wird außerdem von der Viskosität η_*^p (2.8) beeinflusst. Die Viskosität wird bei zunehmender Verfestigung größer, was durch das Verhältnis aus aktuellen primären Verzerrungen $\varepsilon_{eq,Lode}^p$ (2.6) zu maximalen primären Verzerrungen $\varepsilon_{eq,max}^p$ (2.7) ausgedrückt wird. Die Berücksichtigung des Belastungszustands über den Lodewinkel ermöglicht ein erneutes Einsetzen der Verfestigung beim Wechsel der Spannungsgeometrie. Zusätzlich berücksichtigt die Viskosität die Belastungsgeschwindigkeit k und über den Exponenten n^p (2.9) ist eine Abhängigkeit von der Äquivalenzspannung σ_{eq} implementiert. Die Richtung der Verformung wird über die Ableitung des Spannungstensors bestimmt.

$$F^p > 0: \quad \{\dot{\varepsilon}^p\} = \frac{F^p}{\eta_*^p} \cdot \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.4)$$

$$F^p = p_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{eq}}{p_0} \cdot q^p\right)^{n^p} \cdot (\varepsilon_{eq,max}^p - \varepsilon_{eq,Lode}^p) \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{eq,Lode}^p = \left\langle \frac{\theta}{30^\circ} \cdot \varepsilon_{eq,tc}^p \right\rangle + \left\langle \frac{-\theta}{30^\circ} \cdot \varepsilon_{eq,te}^p \right\rangle + \left(1 - \left| \frac{\theta}{30^\circ} \right| \right) \cdot \varepsilon_{eq,t0}^p \quad (2.6)$$

$$\varepsilon_{eq,max}^p = \left(\frac{\sigma_{eq}}{E^p} \cdot q^p \right)^{n^p} + \varepsilon_{eq,min}^p \cdot q^p \quad (2.7)$$

$$\eta_*^p = \eta_0 + (\eta^p - \eta_0) \cdot \left(\frac{\varepsilon_{eq,Lode}^p}{\varepsilon_{eq,max}^p} \right)^{\left(\frac{1000 \cdot k}{n^p} \right)^{0,125}} \quad (2.8)$$

$$n^p = 1 + \frac{4}{1 + \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{eq,0}^p} \right)^{p^p}} \quad (2.9)$$

Die maximalen primären Verzerrungen $\varepsilon_{eq,max}^p$ werden in Abhängigkeit der Äquivalenzspannung bestimmt. Bei einem Wechsel der Belastungsstufe kann diese Abhängigkeit dazu führen, dass $\varepsilon_{eq,max}^p$ einen niedrigeren Wert annimmt als im vorherigen Spannungszustand, sodass die primäre Verzerrung des vorherigen Spannungszustandes größer ist als die nun gültige maximale primäre Verzerrung. In diesem Fall tritt Erholungskriechen auf. In der Berechnung wird nun die primäre Viskosität η_{rec}^p (2.10) bestimmt. Dies führt dazu, dass sämtliche Verformungen des sekundären Kriechens zunächst durch inverse primäre Verformungen kompensiert werden, bis die für dieses Spannungsniveau überschüssigen primären Verformungen abgebaut sind.

$$\eta_{rec}^p = - \frac{F^p \cdot \eta^s}{F^s \cdot q^s} \quad (2.10)$$

2.1.3 Sekundäres Kriechen

Das sekundäre Kriechen wird entsprechend der Gleichung (2.11) berechnet. Sekundäres Kriechen ist immer aktiv, sobald ein Spannungsdeviator vorhanden ist. Die Größe der sekundären Kriechrate ist abhängig von der Vergleichsspannung, wobei diese, vergleichbar zum primären Kriechen, über einen Spannungsexponent n^s (2.13) berücksichtigt wird. Analog zum primären Kriechen wird n^s mit einer Funktion dargestellt, die abhängig von der Vergleichsspannung σ_{eq} im Bereich $1 \leq n^s \leq 5$ verläuft.

$$\{\dot{\varepsilon}^s\} = \frac{F^s}{\eta^s} \cdot \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \{\sigma\}} \cdot q^s \quad (2.11)$$

$$F^s = p_0 \cdot \left(\frac{\sigma_{eq}}{p_0} \right)^{(n^s \cdot q^s)} \quad (2.12)$$

$$n^s = 5 + \frac{1-5}{1 + \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{eq,0}^s} \right)^{p^s}} \quad (2.13)$$

2.1.4 Tertiäres Kriechen

Das tertiäre Kriechen (2.14) tritt auf, sobald die Fließfunktion F^t (2.15) (Dilatanzbedingung) einen positiven Wert annimmt. Die Dilatanzbedingung ist in Abhängigkeit der Oktaedernormal- und Oktaeder Schubspannung formuliert. Der Faktor Θ (2.16) beschreibt den Belastungszustand im Hauptspannungsraum und berücksichtigt damit die Spannungsgeometrie. Der Faktor A_{F^t} (2.17) berücksichtigt den Einfluss der Belastungsrichtung, es wird in Extension und Kompression unterschieden. Der Einfluss der Entfestigung infolge des tertiären Kriechens wird in der tertiären Viskosität η_*^t (2.18) berücksichtigt,

welche bei einer Zunahme der Schädigungs-Volumendehnung $\varepsilon_{v,d}$ bis zum Erreichen der Bruchvolumendehnung $\varepsilon_{v,d,b,*}$ (2.23) auf einen minimalen Wert η_0 sinkt.

Da das tertiäre Kriechen sich nicht volumentreu verhält, wird die Volumenzunahme in Abhängigkeit vom Dilatanzwinkel ψ_*^t (2.19) als Anteil in den Richtungsableitungen des Spannungstensors (2.21) berücksichtigt. Im Parameter k (2.20) fließt die Belastungsgeschwindigkeit ein.

$$F^t > 0: \quad \{\dot{\varepsilon}^t\} = \frac{F^t \cdot k^t}{\eta_*^t \cdot q^t} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.14)$$

$$F^t = \Theta^{0,125} \cdot \left(\frac{\sigma_o}{\frac{1}{\tan(t_0)} + \frac{1}{t_1} |\sigma_o|} - \sigma^z \right) \cdot A_{F^t} + \tau_o \quad (2.15)$$

$$\Theta = \left| \frac{-3 \cdot \sqrt{3} \cdot I_3}{(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 + 2(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{xz}^2))^{\frac{3}{2}}} \right| \quad (2.16)$$

$$A_{F^t} = 0,825 + \frac{\theta}{30^\circ} \cdot 0,175 \quad (2.17)$$

$$\eta_*^t = \eta^t + (\eta_0 - \eta^t) \cdot \tanh \left(m_*^t \cdot e^{\frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_o + \sqrt{2} \cdot \tau_o}{2 \cdot p_o}} \cdot \frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right) \quad (2.18)$$

$$\psi_*^t = \psi + \left(\frac{\psi^{max}}{q^t} - \psi \right) \cdot \tanh \left(\frac{m^t}{q^t} \cdot e^{\frac{\sqrt{3} \cdot \sigma_o + \sqrt{2} \cdot \tau_o}{2 \cdot p_o}} \cdot \frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right) \quad (2.19)$$

$$k = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} J_2(\dot{\varepsilon})}{1E-5}} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2 \cdot \sigma_{xx} - \sigma_{yy} - \sigma_{zz}}{3 \cdot \sigma_{eq}} + \frac{\sin(\psi_*^t)}{3} \\ \frac{2 \cdot \sigma_{yy} - \sigma_{zz} - \sigma_{xx}}{3 \cdot \sigma_{eq}} + \frac{\sin(\psi_*^t)}{3} \\ \frac{2 \cdot \sigma_{zz} - \sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{3 \cdot \sigma_{eq}} + \frac{\sin(\psi_*^t)}{3} \\ \frac{3 \cdot \sigma_{xy}}{2 \cdot \sigma_{eq}} \\ \frac{3 \cdot \sigma_{yz}}{2 \cdot \sigma_{eq}} \\ \frac{3 \cdot \sigma_{zx}}{2 \cdot \sigma_{eq}} \end{array} \right\} \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{v,d} = \varepsilon_x^t + \varepsilon_y^t + \varepsilon_z^t \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_{v,d,b,*} = \frac{\varepsilon_{v,d,b}}{q^n} \quad (2.23)$$

2.1.5 Kriech- und Schubbruch

Das Eintreten von Kriech- bzw. Schubbruch wird in Abhängigkeit einer maximal aufnehmbaren Bruchvolumendehnung ermittelt. Sobald die schädigungsbedingte Dilatanz einen vom Salztyp abhängigen

Wert der Bruchvolumendehnung überschritten hat, treten zusätzlich zu den Verformungen aus primärem, sekundärem und tertiärem Kriechen auch Bruchverformungen auf (2.24). Die Größe der Bruchdehnung berechnet sich abhängig von der Fließfunktion der Restfestigkeit F^n (2.25) und einer von der Bruchentfestigung abhängigen Viskosität η_*^n (2.26).

$$\varepsilon_{v,d} \geq \varepsilon_{v,d,b,*}: \quad \{\dot{\varepsilon}^n\} = \frac{F^n \cdot k}{\eta_*^n \cdot q^n} \cdot \frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.24)$$

$$F^n = \Theta^{0,125} \cdot \left(\frac{\sigma_0}{\frac{1}{\tan(n_0)} + \frac{1}{n_1} |\sigma_0|} - \sigma^z \right) + \tau_0 \quad (2.25)$$

$$\eta_*^n = \eta^n + (\eta_0 - \eta^n) \cdot \tanh \left(m_*^n \cdot \frac{\varepsilon_{v,d} - \varepsilon_{v,d,b,*}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right) \quad (2.26)$$

$$m_*^n = \frac{m^n}{q^n} \quad (2.27)$$

$$\psi_*^n = \psi + (0 - \psi) \cdot \tanh \left(m_*^n \cdot \frac{\varepsilon_{v,d} - \varepsilon_{v,d,b,*}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right) \quad (2.28)$$

2.1.6 Verheilung

Verheilung wird im Stoffmodell *TUBSsalt* nach Gleichung (2.29) bestimmt und additiv zu den weiteren viskosen und plastischen Verzerrungsanteilen berücksichtigt, wobei Verheilung als Rückgang der Verzerrung und schadigungsinduzierten Volumendehnung zu verstehen ist. Verheilung setzt ein, sobald der Spannungszustand unterhalb der Verheilungsgrenze liegt und im Verlauf der vorherigen Berechnung bereits Schädigung aufgetreten ist. σ^z (2.40) entspricht der aktuellen Zugfestigkeit. Die Größe der Verheilung wird über die Viskosität (2.30) und den Dilatanzwinkel (2.32) bestimmt und ist damit abhängig von der Schädigung. Im Rahmen des Verbundprojektes wurde die Formulierung der Viskosität außerdem um den Faktor ϑ_v erweitert, um eine stärkere Abhängigkeit von der mittleren Spannung zu erreichen (2.31) (siehe Kapitel 4.3.2). Die einzelnen Komponenten der Richtungsableitung $\frac{\partial Q^v}{\partial \{\sigma\}}$ (2.33) werden berücksichtigt, um sicherzustellen, dass nur in den Richtungen Verheilung stattfindet in denen vorher Schädigung aufgetreten ist.

$$F^t < \sigma^z: \quad \{\dot{\varepsilon}^t\} = \frac{F^t \cdot q^v}{\eta_*^v} \cdot \frac{\partial Q^v}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.29)$$

$$\eta_*^v = \eta^v + (\eta_0 - \eta^v) \cdot \tanh \left(m_*^v \cdot \vartheta_v \cdot \frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right) \quad (2.30)$$

$$\vartheta_v = e^{(v_1 \cdot \sigma_0)} \quad (2.31)$$

$$\psi_*^v = \psi + (\psi_{max}^t - \psi) \cdot \tanh \left(m_*^v \cdot \frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right) \quad (2.32)$$

$$\frac{\partial Q^v}{\partial \{\sigma\}} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{d,1}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_1 - \left(\frac{\varepsilon_{d,2}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_2 - \left(\frac{\varepsilon_{d,3}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_3 \right) \right) \right)}{3 \cdot \sigma_0} + \frac{\sin(\psi_*^v)}{3} \\ \frac{2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{d,2}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_2 - \left(\frac{\varepsilon_{d,3}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_3 - \left(\frac{\varepsilon_{d,1}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_1 \right) \right) \right)}{3 \cdot \sigma_0} + \frac{\sin(\psi_*^v)}{3} \\ \frac{2 \cdot \left(\frac{\varepsilon_{d,3}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_3 - \left(\frac{\varepsilon_{d,1}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_1 - \left(\frac{\varepsilon_{d,2}}{\varepsilon_{d,*}} \cdot \sigma_2 \right) \right) \right)}{3 \cdot \sigma_0} + \frac{\sin(\psi_*^v)}{3} \end{array} \right\} \quad (2.33)$$

$$\varepsilon_{d,*} = \sqrt{(\varepsilon_{d,1})^2 + (\varepsilon_{d,2})^2 + (\varepsilon_{d,3})^2} \quad (2.34)$$

$$m_*^v = m^v \cdot q^v \quad (2.35)$$

2.1.7 Zugbruch

Zugbruch tritt auf, sobald die größte Hauptspannung σ_3 die Zugfestigkeit σ^Z überschreitet. Die Größe der Zugverformungen wird nach Gleichung (2.36) in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit σ^Z bestimmt, wobei die Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der dilatanten Schädigung berechnet wird. Zugverformungen sind rein plastische Dehnungsincremente, welche in Richtung der größten Hauptspannung auftreten. Sobald Zugbruch auftritt, werden in *TUBSsalt* keine anderen Verformungsanteile bestimmt.

$$F^Z > 0 : \quad \{\varepsilon^Z\} = \frac{F^Z}{K + \frac{4}{3} \cdot G} \cdot \frac{\partial Z}{\partial \{\sigma\}} \quad (2.36)$$

$$F^Z = \sigma_3 - \sigma^Z \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \sigma_1} = \frac{\partial Z}{\partial \sigma_2} = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \sigma_3} = 1 \quad (2.39)$$

$$\sigma^Z = \frac{\sigma_0^Z}{\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}} \right)^{\frac{1}{p^{el}}} \right)^{p^{el}}} \quad (2.40)$$

2.1.8 Temperatur

Der Einfluss der Temperatur T wird in allen Verformungsanteilen über den Parameter q berücksichtigt. Für den Parameter q existieren je nach Wirkungsbereich unterschiedliche Formulierungen (Gleichung (2.41) bis (2.45)) Die Referenztemperatur T_0 beträgt 300 K, bei dieser Temperatur ist kein Einfluss der Parameter q vorhanden. T_M ist die Schmelztemperatur von Steinsalz, R die Gaskonstante.

$$q^{el} = 1 + \left(\frac{T - T_0}{T_m} \cdot \frac{T_m}{G_0} \cdot \frac{\partial G}{\partial T} \right) = 1 + \left(\frac{T - T_0}{T_m} \cdot (-0,73) \right) \quad (2.41)$$

$$q^p = \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 \quad (2.42)$$

$$q^s = \left(\frac{T}{T_0}\right) \cdot \frac{e^{\frac{-Q}{R \cdot T}}}{e^{\frac{-Q}{R \cdot T_0}}} \quad (2.43)$$

$$q_*^s = q^t = q^n = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.44)$$

$$q^v = \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.45)$$

2.2 Grenzen der Anwendbarkeit

Im Rahmen der im Projekt durchgeführten Berechnungen, zeigt sich, dass die Versuche zufriedenstellend nachgerechnet werden können, bei der Berechnung der Virtuellen Demonstratoren allerdings, im Vergleich zu den Projektpartnern, geringe Werte für die schädigungsinduzierte Dilatanz berechnet werden. Die Größenordnung der berechneten Schädigung liegt eine Potenz unter der erwarteten Größenordnung bzw. den Ergebnissen der Partner. Die räumliche Ausdehnung des geschädigten Bereichs sowie die berechneten Verformungen scheinen allerdings plausibel.

3 AP 1 Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen

Ziel des AP 1 war die Untersuchung des Kriechverhaltens bei kleinen Deviatorspannungen. Durch IfG wurden neue Kriechstände entwickelt und Langzeitkriechversuche mit Differenzspannungen unter 5 MPa durchgeführt. Außerdem wurde der Einfluss von unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen sollen die Stoffmodelle validiert bzw. weiterentwickelt werden. Die Ergebnisse der Berechnungen von TUBS sind in den folgenden Unterkapiteln aufgeführt.

3.1 Aufstieg eines Salzstocks

Um eine erste Abschätzung zu Beginn des Verbundprojektes zu erhalten, wie die Stoffmodelle Verformungen bei kleinen Deviatorspannungen abbilden, wurde der Aufstieg eines generischen Salzstocks berechnet. Das numerische Modell wurde von IfG entwickelt und allen Partnern zur Verfügung gestellt. Abbildung 3-1 zeigt das betrachtete numerische Modell inklusive der zugrundeliegenden Geologie. Das Modell besteht aus 40000 Zonen bei einer Höhe von 3,5 km und einer Breite von 12 km. Die Berechnung erfolgt im ebenen Verzerrungszustand (plain strain model).

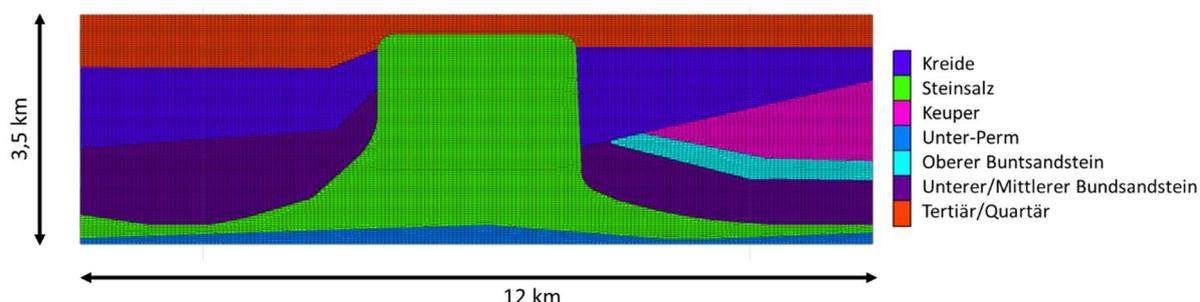


Abbildung 3-1: Numerisches Modell zur Berechnung des Salzaufstiegs mit Kennzeichnung der Geologie

Die zur Modellierung der einzelnen Schichten verwendeten Stoffmodelle sowie die hinterlegten Dichten fasst Tabelle 3-1 zusammen. Erkennbar ist, dass die Dichten der das Steinsalz seitlich überlagernden Schichten deutlich höher sind als die Dichte des Steinsalzes.

Tabelle 3-1: Verwendete Stoffmodelle und Dichten nach geologischer Schicht

Geologische Schicht	Stoffmodell	Dichte [g/cm ³]
Kreide	Mohr-Coulomb Modell	2,32
Steinsalz	Potenzgesetz/ <i>TUBS</i> salt	2,17
Keuper	Mohr-Coulomb Modell	2,32
Unter-Perm	Elastisches Modell	2,45
Oberer Buntsandstein	Mohr-Coulomb Modell	2,45
Unterer/ Mittlerer Buntsandstein	Mohr-Coulomb Modell	2,33
Tertiär/Quartär	Ubiquitous Joint Modell	1,80

Das Modell ist am unteren Rand in vertikaler Richtung, an den seitlichen Rändern in horizontaler Richtung gehalten. Des Weiteren ist ein Temperaturgefälle innerhalb des Salzes über die Höhe des Modells implementiert. An der Spitze des Salzdoms beträgt die Temperatur 16 °C (289 K) und an dessen Unterkante 86 °C (359 K). Dies entspricht einem Gradienten von 2,3 K/100 m.

Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten. Zunächst werden 2.000 Jahre mit dem Stoffmodell BGR(a) für das Steinsalz zur Spannungsanpassung berechnet. Im Anschluss folgt die weitere Berechnung bis zum Endzeitpunkt von 1 Mio. Jahren mit dem jeweiligen Modell der einzelnen Partner, in diesem Fall *TUBS*salt. Über sogenannte ‚History Locations‘ werden an vier Punkten innerhalb des Modells die Ver-

schiebung sowie die Verschiebungsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung beobachtet. Drei Punkte befinden sich an der Oberkante des Modells, ein Punkt innerhalb des Salzstocks, vergleiche Abbildung 3-2.

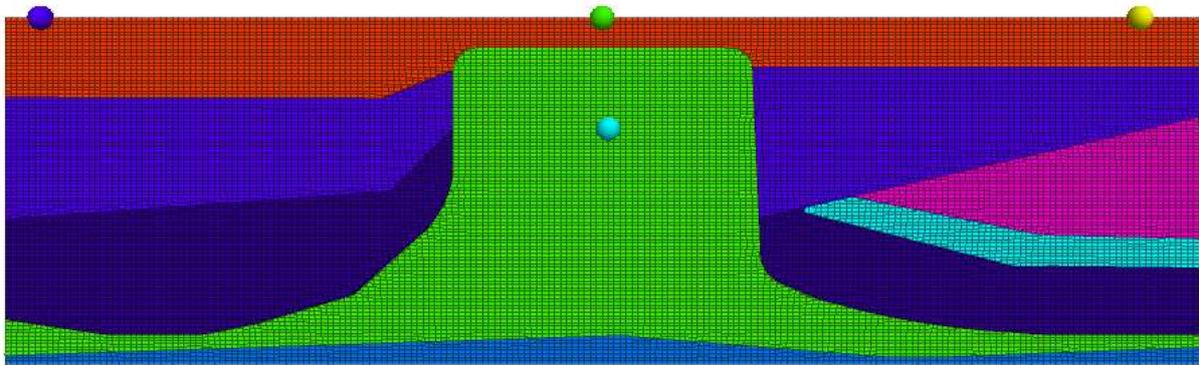


Abbildung 3-2: ‚History Locations‘ zur Beobachtung der Verschiebung und Verschiebungsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung

Abbildung 3-3 zeigt die Verschiebungsgeschwindigkeit an den vier beobachteten Punkten über die gesamte Modellierungsdauer von 1 Mio. Jahre. Nach etwa 160.000 Jahren ($1,5E12$ s) pendelt sich der Wert für die Verschiebungsgeschwindigkeit für den Punkt im Salz (türkise Linie) bei etwa $3,0 E-11$ m/s ein. Dieser Wert entspricht einer Geschwindigkeit von ungefähr 1 mm/a und liegt über der Zielbandbreite von 0,02 bis 0,05 mm/a. Das Maximum der Geschwindigkeit im gesamten Querschnitt zum Zeitpunkt 1 Mio. Jahre beträgt 1,26 mm/a, siehe Abbildung 3-4.

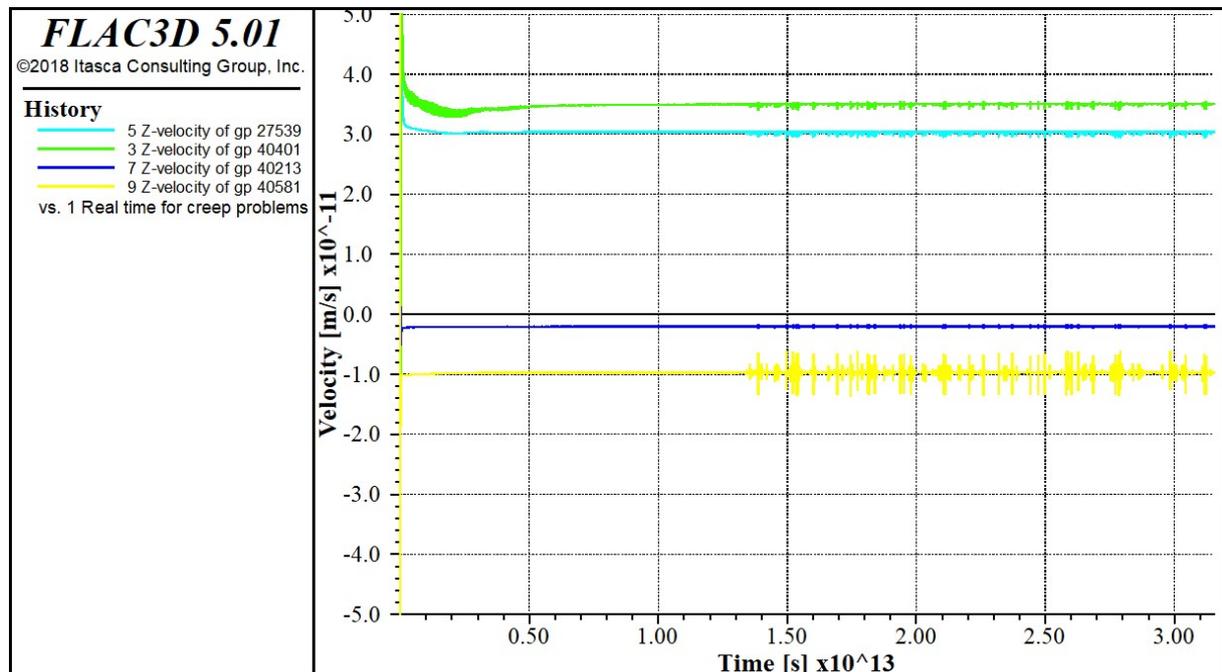


Abbildung 3-3: Verschiebungsgeschwindigkeit der vier beobachteten Punkte über die Zeit

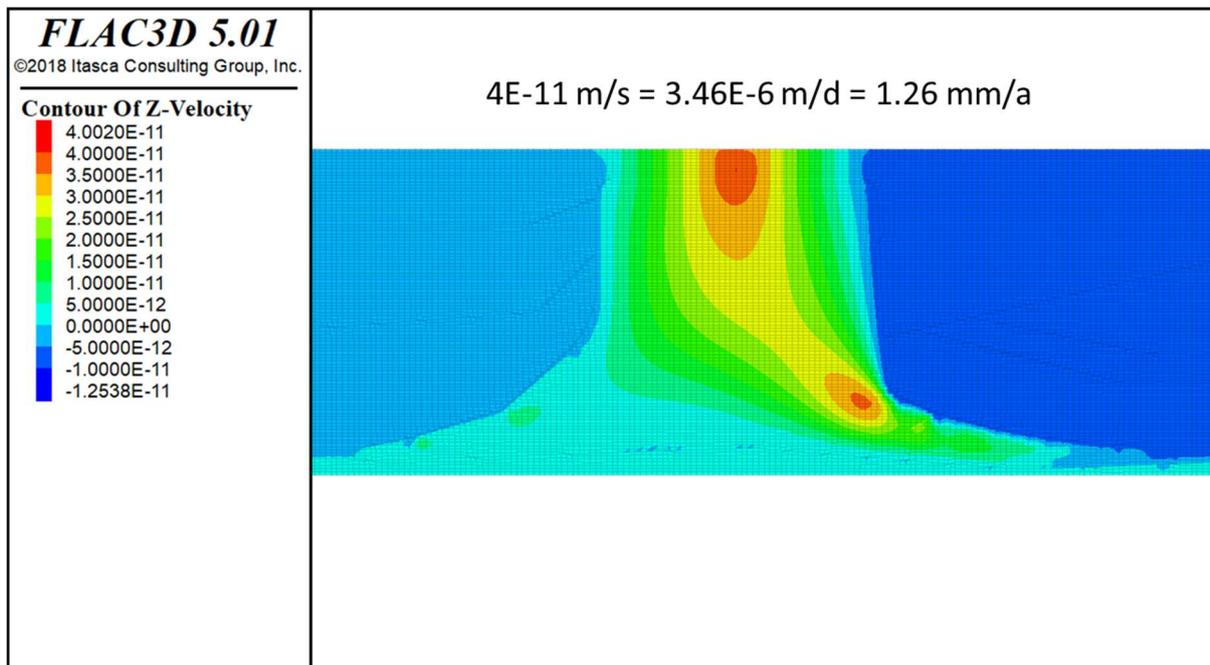


Abbildung 3-4: Geschwindigkeit der vertikalen Verschiebung zum Zeitpunkt 1 Mio. Jahre

Das Diagramm in Abbildung 3-5 zeigt die Kriechrate für Asse-Speisesalz in Abhängigkeit von der Deviatorspannung unter konstanter Temperatureinwirkung. Die berechnete Kriechrate stimmt bei hohen Deviatorspannungen gut mit den gemessenen überein. Für das Niveau der kleinen Deviatorspannungen stehen die Versuchsergebnisse und die damit potentiell einhergehende Modifikation des Stoffmodells aus. Aus diesem Grund wurde das im folgenden beschriebene Versuchsprogramm vorgesehen.

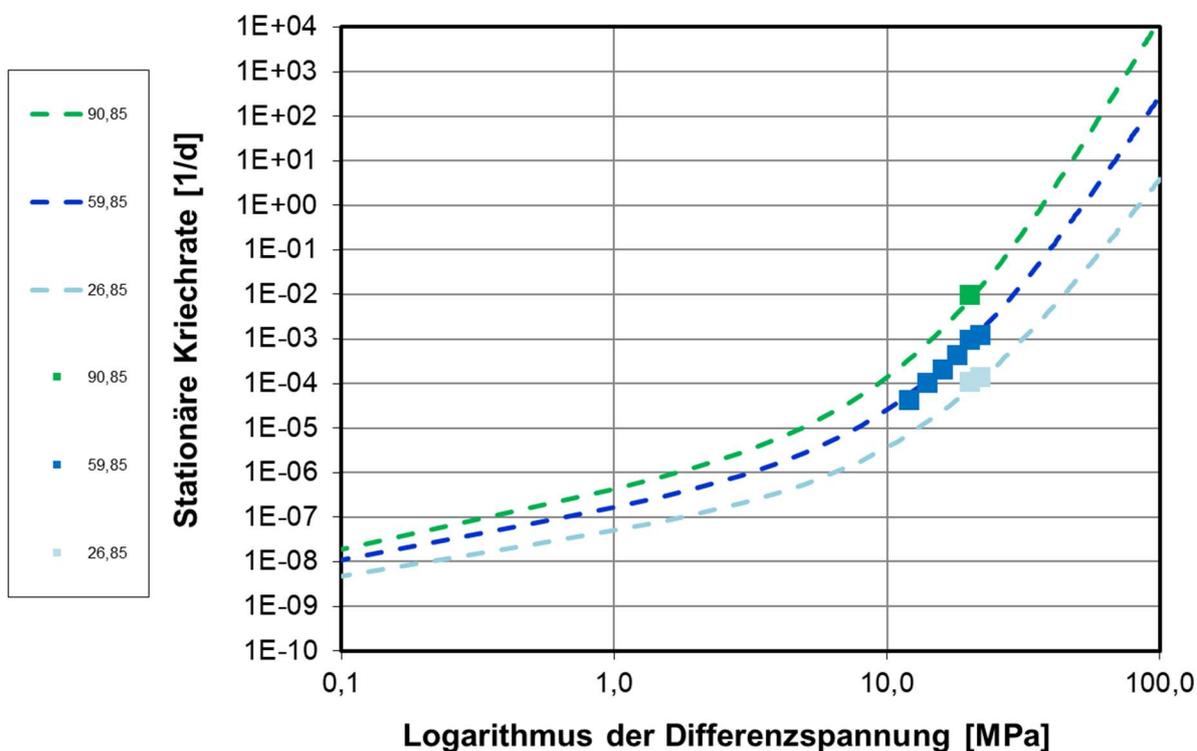


Abbildung 3-5: Berechnete und gemessene Kriechraten des stationären Kriechens für verschiedene Temperaturstufen (300, 333 und 364 K) an Asse-Speisesalz

3.2 Versuchsprogramm zum Verformungsverhalten bei kleinen Deviatorspannungen

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens bei kleinen Deviatorspannungen wurde durch das IfG ein umfangreiches Versuchsprogramm ausgearbeitet und durchgeführt. Details zu den Versuchen können den Veröffentlichungen des IfG entnommen werden. Alle Versuche wurden an Probekörpern aus WIPP clean salt durchgeführt.

3.2.1 Orientierende Versuche

In einer ersten Versuchsreihe wurden zunächst mehrere orientierende Versuche in den Kriechständen des IfG durchgeführt. Tabelle 3-2 gibt eine Auflistung der durchgeführten Versuche inklusive der bestimmten Kriechraten des stationären Kriechens.

Tabelle 3-2: Versuche zu kleinen Deviatorspannungen, durchgeführt am IfG

Versuch	T [°C]	Dauer [d]	σ_1 [MPa]	$\sigma_3 = p$ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Kriechrate [1/d]
TCC24	25	10	20	20	0	-
	25	50	28	20	8	1,16E-5
	25	80	26	20	6	2,28E-6
	25	80	26	22	4	4,95E-7
	60	80	26	22	4	1,01E-5
TCC21	25	10	20	20	0	-
	25	50	26	20	6	6,43E-6
	25	80	24	20	4	1,35E-6
	25	80	24	22	2	1,04E-7
	60	80	24	22	2	2,64E-6
TCC22	25	10	20	20	0	-
	25	50	24	20	4	6,77E-6
	25	80	22	20	2	1,13E-6
	25	80	22	21	1	5,73E-7
	60	80	22	21	1	3,36E-6
TCC23	80	10	20	20	0	-
	80	50	28	20	8	9,24E-5
	80	80	26	20	6	2,24E-5
	80	80	26	22	4	3,38E-6
	80	80	26	20	6	1,53E-5
TCC27	80	10	20	20	0	-
	80	50	26	20	6	4,28E-5
	80	80	24	20	4	6,74E-6
	80	80	24	22	2	1,06E-6
	80	80	24	20	4	2,23E-6
TCC29	80	10	20	20	0	-
	80	50	24	20	4	2,26E-5
	80	80	22	20	2	4,11E-6
	80	80	22	21	1	1,65E-6
	80	80	22	21	1	1,44E-6
TCC28	2	10	20	20	0	-
	25	50	24	20	4	5,37E-6
	40	50	24	20	4	6,86E-6
	60	50	24	20	4	1,63E-5
	80	50	24	20	4	2,50E-5
	100	50	24	20	4	1,79E-5

Abbildung 3-6 zeigt neben den Ergebnissen aus älteren Versuchen (Quadrate) die Ergebnisse der neu durchgeführten orientierenden Versuche (Kreise). Ein Zusammenhang ist erkennbar, allerdings auch eine stärkere Streuung der Ergebnisse im Bereich der kleinen Deviatorspannungen.

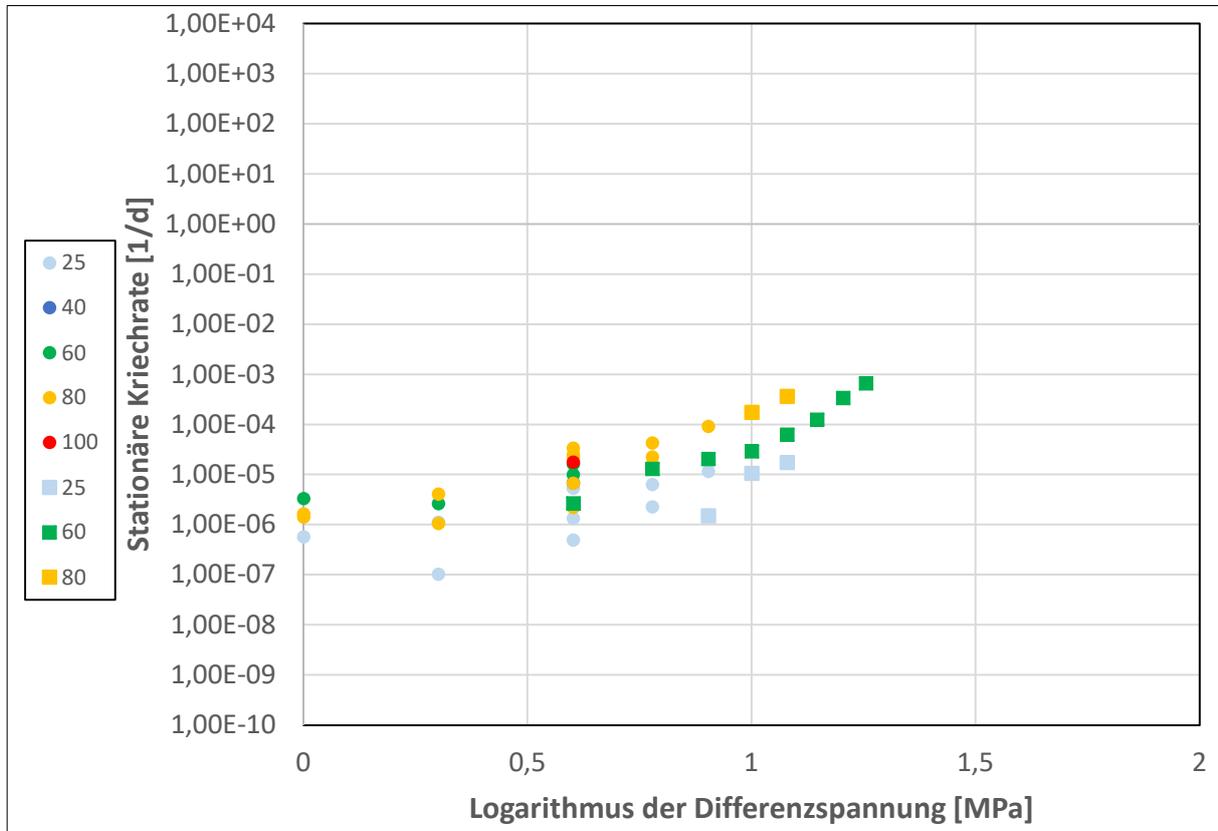


Abbildung 3-6: Ergebnisse der orientierenden Versuche; Kriechrate in Abhängigkeit der Deviatorspannung

3.2.2 Langzeitkriechversuch TCC34

Der Kriechversuch TCC34 wurde als Langzeitversuch ausgelegt. Der Versuch TCC34 hat eine Gesamtdauer von über 1.000 Tagen und beinhaltet zehn Phasen, wobei die Belastungsphasen durch eine deviatorische oder eine temperaturinduzierte Belastung gekennzeichnet sind. Abbildung 3-7 zeigt die gemessenen axialen Verzerrungen über den gesamten Versuchszeitraum. In den ersten beiden Phasen des Versuchs wurde eine isotrope Belastung aufgebracht. In diesen Konsolidationsphasen soll eine bereits bestehende Schädigung zurückgebildet werden. In der zweiten Phase wurde die Temperatur von 298 K auf 393 K erhöht. Eine erhöhte Temperatur führt zu einer schnelleren Verheilung und einem schnelleren abklingen des primären Kriechens. Die anschließenden Belastungsphasen berücksichtigen einen Spannungsdeviator von 4 MPa, wobei zwischen den Belastungsphasen 1 bis 5 die Temperaturen sukzessive (373 K, 353 K, 333 K und 313 K) reduziert wurden. Die Belastungsphasen 6 und 7 dienen der Verifikation der Ergebnisse. Der Tabelle 3-3 können die gemessenen Kriechraten des stationären Kriechens entnommen werden.

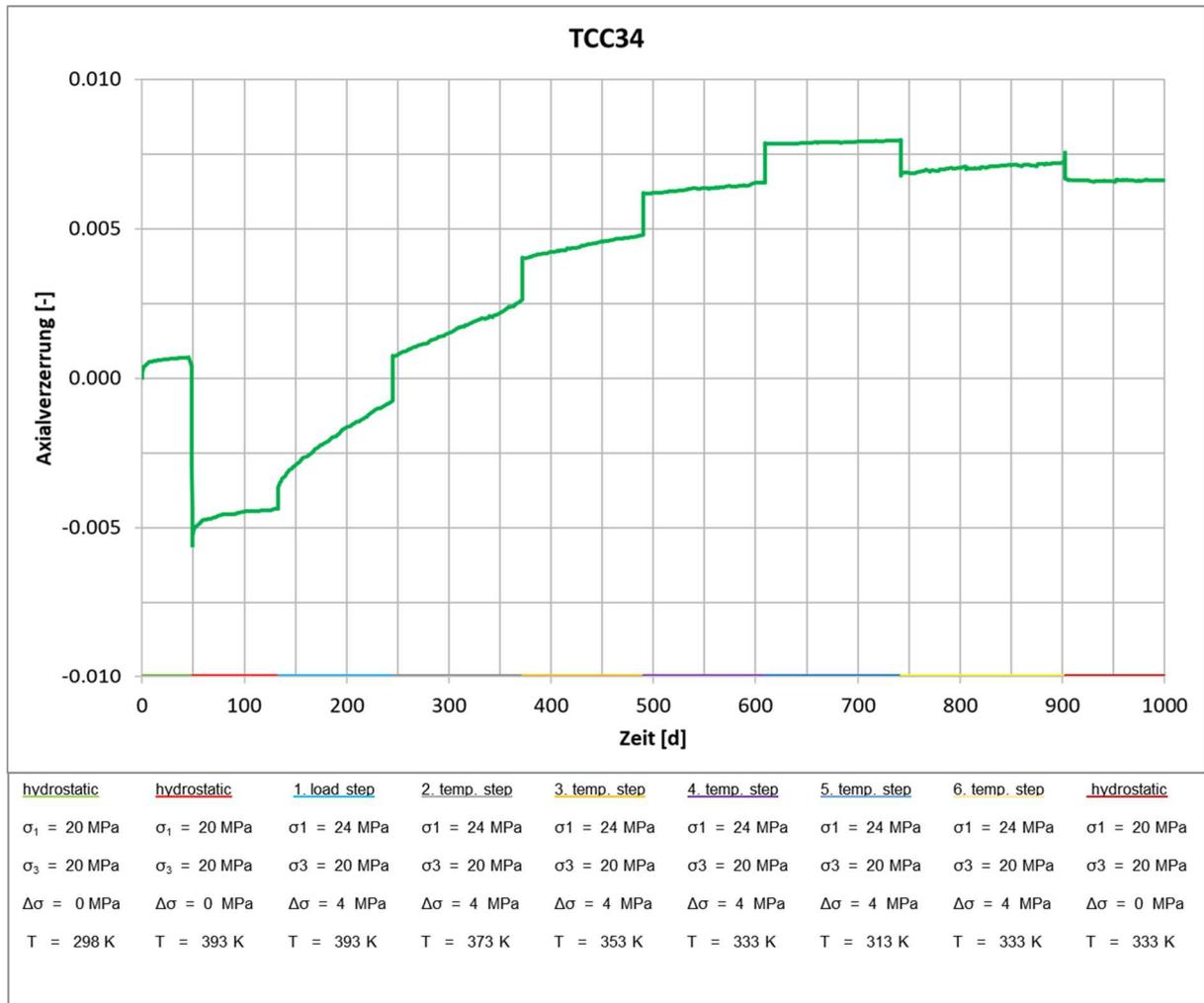


Abbildung 3-7: Verzerrung über die Versuchszeit innerhalb des Versuchs TCC34

Tabelle 3-3: Versuchsablauf des am IfG durchgeführten Versuchs TCC34

Phase	T [°C]	Dauer [d]	σ_1 [MPa]	$\sigma_3 = p$ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Kriechrate [1/d]
1	25	50	20	20	0	2,77E-6
2	120	130	20	20	0	4,01E-6
3	120	245	24	20	4	2,20E-5
4	100	370	24	20	4	1,44E-5
5	80	490	24	20	4	6,63E-6
6	60	610	24	20	4	3,11E-6
7	40	730	24	20	4	9,22E-7
8	60	890	24	20	4	2,06E-6
9	60	-	20	20	0	2,95E-8
10	60	-	24	20	4	-

3.2.3 Nachrechnung des TCC34 mit dem Stoffmodell TUBSsalt

Abbildung 3-8 zeigt die Berechnungs- und Versuchsergebnisse für den Langzeitkriechversuch TCC34. In den ersten beiden Phasen stellt sich bei der Berechnung mit *TUBSsalt* keine Verzerrung ein, da kein Antriebsmechanismus dazu vorliegt. Da keine Deviatorspannung vorliegt und das Salz innerhalb der Berechnung keine Schädigung erfahren hat, kommt es zu keinem Kriechprozess, der sich in einer Verzerrung respektive Kriechrate niederschlagen würde. Die Sprünge in den Messwerten, die aus der Temperaturänderung und der damit verbundenen Ausdehnung der Probe und der Testzelle resultieren, werden bei der Berechnung mit *TUBSsalt* ebenfalls nicht abgebildet. Der Startpunkt der Berechnung liegt somit genau genommen erst bei dem Start der ersten Belastungsphase. Die Berechnungsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen.

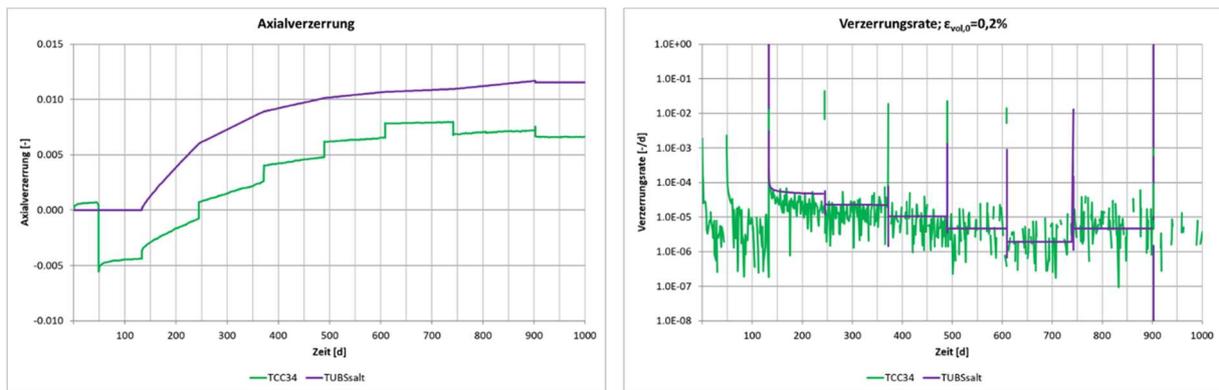


Abbildung 3-8: Versuchsergebnis und Berechnungsergebnis zum Versuch TCC34; links: Verzerrung; rechts: Verzerrungsrate

Die gemessenen Verzerrungen innerhalb der Konsolidationsphasen kann auf eine Vorschädigung der Probe zurückgeführt werden. Eine solche Vorschädigung kann der numerischen Berechnung berücksichtigt werden, um die Kriechprozesse in den ersten beiden Phasen des Versuchs TCC34 abzubilden. Unter der Annahme einer homogenen Vorschädigung von 0,2 % zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Versuchs- und der Berechnungsergebnisse auch für die ersten beiden Phasen, vergleiche Abbildung 3-9.

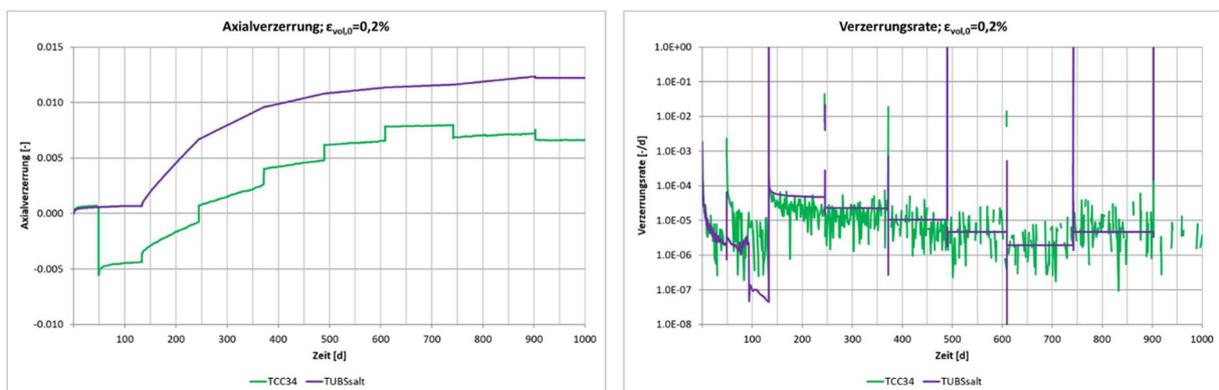


Abbildung 3-9: Versuchsergebnis und Berechnungsergebnis zum Versuch TCC34 unter Berücksichtigung einer Vorschädigung von 0,2 %; links: Verzerrung; rechts: Verzerrungsrate

3.2.4 Konsolidationstest TCC41

Um die Konsolidationsdauer der Prüfkörper besser beurteilen zu können, wurde ein reiner Konsolidationstest TCC41 gestartet. Der Versuch TCC41 läuft unter einer hydrostatischen Beanspruchung von 20 MPa bei einer einwirkenden Temperatur von 120 °C. Er wird beendet, sobald sich die axiale Verzerrung nicht weiter ändert, die Verformungsrate somit null beträgt. Nach 600 Tagen Laufzeit zeigt der Test eine Verzerrungsrate von 2,76E-07. Basierend auf den Zwischenergebnissen des Versuchs wurde festgehalten, dass die Konsolidierungsphase für alle folgenden Versuche mindestens 50 Tage bei 120 °C betragen sollte.

3.2.5 Versuchsreihen zur Untersuchung des Verformungsverhaltens bei kleinen Deviatorspannungen

Im Anschluss an die orientierenden Versuche wurden in den, im Rahmen von WEIMOS neu konstruierten, Kriechständen des IfG weitere Versuche bei geringen Deviatorspannungen durchgeführt. Aufgrund der Erkenntnisse aus den Versuchen TCC34 und TCC41 wurde die Konsolidationsphase auf mindestens 100 Tage ausgelegt. Tabelle 3-4 gibt die Tests der Serie 1 und die ihnen zugrundeliegenden Randbedingungen, sowie die Kriechraten des stationären Kriechens wieder. Tabelle 3-5 stellt die Ergebnisse der Versuchsserie 2 zusammen, die in Anschluss an die orientierenden Versuche (Kapitel 3.2.1) in den alten Versuchsständen des IfG durchgeführt wurden.

Tabelle 3-4: Versuchsprogramm Series 1 in den neu konstruierten Versuchsständen

Versuch	T [°C]	Dauer [d]	σ_1 [MPa]	$\sigma_3 = p$ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Kriechrate [1/d]
TCC36	120	36	20	20	0	5,10E-06
	120	---	24	20	4	-
	80	---	24	20	4	-
TCC40	120	134	20	20	0	8,11E-07
	120	54	24	20	4	1,06E-04
	80	---	24	20	4	
TCC39	120	97	20	20	0	4,23E-06
	120	114	26	20	6	6,58E-04
	80	11	26	20	6	2,80E-05
	120	44	26	20	6	3,01E-04
TCC38	120	97	20	20	0	4,71E-06
	120	114	22	20	2	8,20E-06
	80	377	22	20	2	7,67E-07

Der Versuch TCC36 wurde aufgrund eines Öldurchschlags abgebrochen. Eine erneute Versuchsdurchführung erfolgte mit dem Kürzel TCC40. Auch dieser Versuch wurde wegen eines vermeintlichen Öldurchschlags abgebrochen, da er für die Phase, in welcher die deviatorische Belastung aufgebracht wird, eine sehr hohe Kriechrate zeigt. Ebenfalls eine hohe Kriechrate zeigt sich beim Versuch TCC39 für die Phase der deviatorischen Belastung. Der Versuch wurde jedoch nicht abgebrochen. Bei beiden Versuchen (TCC40 und TCC39) konnte nach Ausbau der Proben bei der Begutachtung der Proben kein Ölaustritt festgestellt werden, sodass die Ergebnisse als valide eingestuft werden können. Die im Weiteren nicht berücksichtigten Werte wurden ausgegraut dargestellt.

Tabelle 3-5: Versuchsprogramm Series 2

Versuch	T [°C]	Dauer [d]	σ_1 [MPa]	$\sigma_3 = p$ [MPa]	$\Delta\sigma$ [MPa]	Kriechrate [1/d]
TCC1	100	117	20	20	0	2,05E-06
	100	122	21	20	1	7,18E-07
TCC2	100	117	20	20	0	1,47E-06
	100	122	23	20	3	5,05E-06
TCC3	100	104	20	20	0	2,00E-06
	100	122	25	20	5	2,54E-05

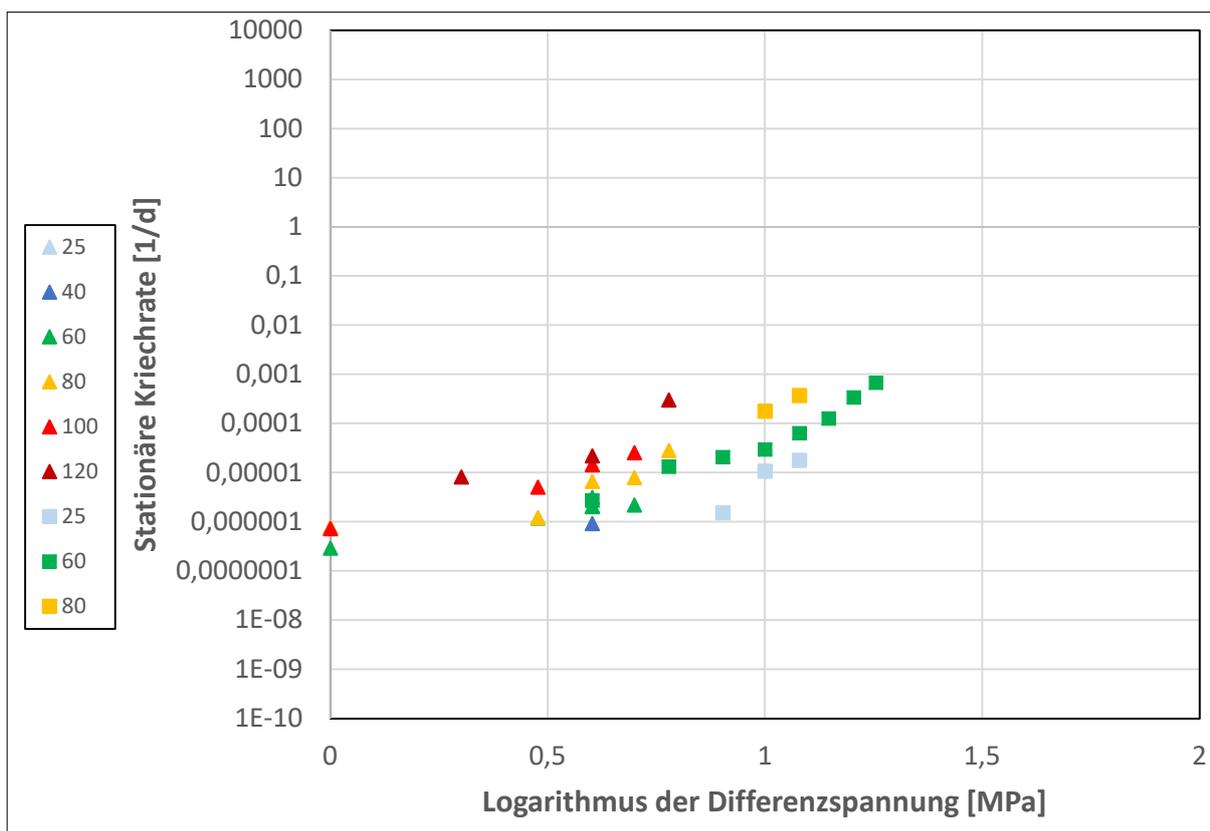


Abbildung 3-10: Ergebnisse neuen Versuchsreihe; Kriechrate in Abhängigkeit der Deviatorspannung

Abbildung 3-6 zeigt neben den Ergebnissen aus älteren Versuchen (Quadrate) die Ergebnisse der neu durchgeführten Versuche der Serien 1 und 2 (Kreise). Im Vergleich zu Abbildung 3-6 zeigen die Ergebnisse der Serien 1 und 2 eine geringere Streubreite.

3.3 Weiterverarbeitung Ergebnisse

Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, zeigen die orientierenden Versuche eine starke Streubreite. Die Ergebnisse der aktuelleren Versuche (Kapitel 3.2.5) wurden verwendet, um die Parameter zur Beschreibung des sekundären Kriechens zu kalibrieren (vgl. Abbildung 3-11). Auf eine Anpassung der Formulierung des sekundären Kriechens konnte verzichtet werden, da die Ergebnisse mit der ursprünglichen Formulierung ausreichend genau abgebildet werden können. Der Parametersatz für WIPP clean salt kann dem Anhang entnommen werden.

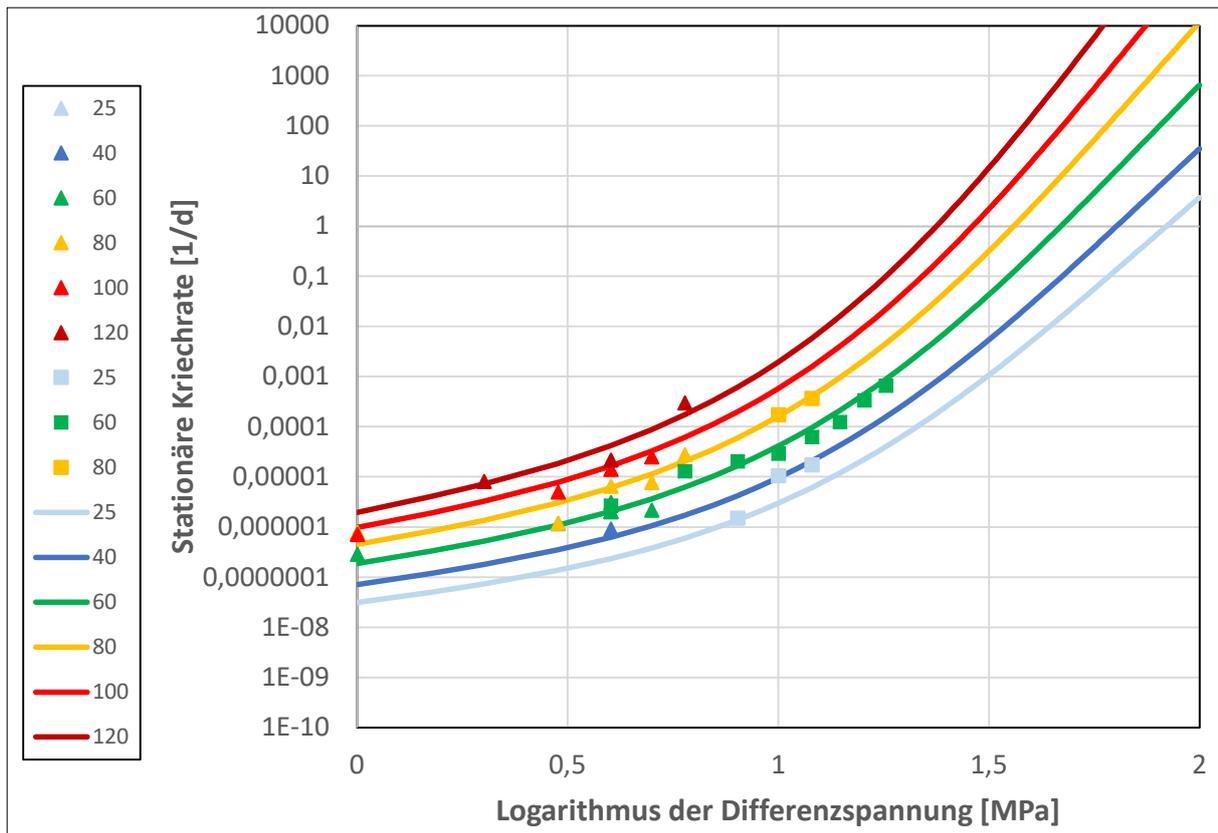


Abbildung 3-11: Berechnete und gemessene Kriechraten des stationären Kriechens für verschiedene Temperaturstufen an WIPP clean salt

4 AP 2 Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung

Ziel des AP 2 war die Verbesserung des grundsätzlichen Verständnisses der Schädigungsrückbildung und die Anpassung der Stoffmodelle. Hierzu wurden systematische Verformungsversuche zur Untersuchung des Einflusses der Spannungsrandbedingung und der Temperatur auf die Schädigungsrückbildung von der TUC durchgeführt. Anschließend wurden Nachrechnungen der Versuche von allen Partnern vorgenommen und, sofern notwendig, Anpassungen an den jeweiligen Stoffmodellen anhand der aus den Versuchen gewonnenen Erkenntnissen vorgenommen.

Informationen zu den durchgeführten Versuchen, den Versuchsergebnissen und insbesondere die Ergebnisse der Nachrechnungen der Versuche mit dem Stoffmodell *TUBSsalt* können den folgenden Abschnitten entnommen werden.

4.1 Versuche Asse765 und Asse769

Die Versuche Asse765 und Asse769 berücksichtigen verschiedene Schädigungs- und Verheilungsphasen, vergleiche Abbildung 4-1. Der Versuch Asse765 startet mit einer Phase, in der keine Schädigung stattfindet. Es folgt eine Schädigungsphase und im Anschluss daran eine Verheilungsphase. Im Versuch Asse769 wird die Probe in den ersten 28 Tagen geschädigt, im Anschluss folgen zwei Verheilungsphasen mit unterschiedlicher mittlerer Spannung, wobei die anliegende Deviatorspannung über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten wurde.

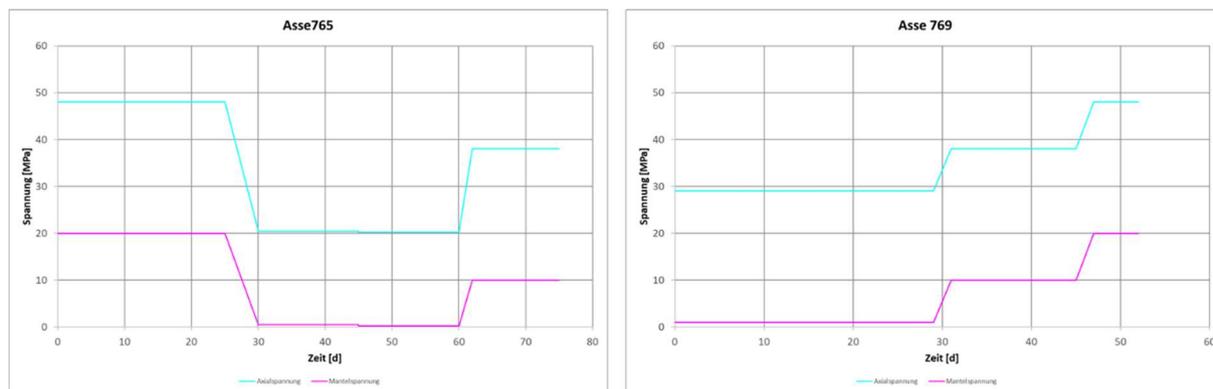


Abbildung 4-1: Versuchsablauf von Asse765 und Asse 769

4.2 Nachrechnung der Versuche Asse 765 und Asse 769 mit dem Stoffmodell TUBSsalt

Die Ergebnisse der Nachrechnung sind Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 zu entnehmen. Dargestellt sind jeweils die Versuchsergebnisse sowie die Berechnungsergebnisse für die Axialverzerrung und die Volumendehnung. Bei der Abbildung der Volumendehnung werden, neben dem jeweiligen Versuchsergebnis, die mit dem Stoffmodell berechneten Größen schädigungsinduzierte Dilatanz $\epsilon_{v,d}$ in Rot sowie totale Volumendehnung ϵ_{vol} in Violett dargestellt.

Für den Versuch Asse765 zeigen sich plausible Verläufe hinsichtlich der berechneten axialen Verzerrung sowie der Volumendehnung.

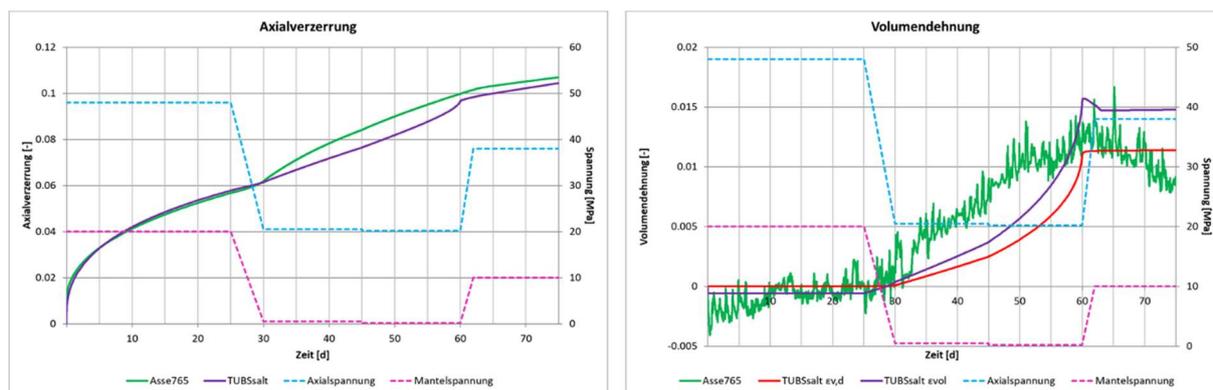


Abbildung 4-2: Versuchsablauf und -ergebnisse für Asse765; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Für den Versuch Asse769 musste zunächst die Dilatanzgrenze angepasst werden, da eine vollständige Nachrechnung des Versuchs andernfalls nicht möglich war. Innerhalb der anfänglichen Schädigungsphase wird die Probe in der Nachrechnung so stark geschädigt, dass es vor dem Lastwechsel zum Kriechbruch kommt. Durch das Hochsetzen der Dilatanzgrenze konnte der Versuch vollständig berechnet werden.

Die Ergebnisse des Versuchs Asse769 zeigen hinsichtlich der Axialverzerrung eine gute Übereinstimmung mit dem Versuchsergebnis. Hinsichtlich des Dilatanzverhaltens zeigt sich eine gute Übereinstimmung der schädigungsinduzierten Dilatanz (rot) mit dem Versuchsergebnis (grün). Vergleicht man hingegen die berechnete totale Volumendehnung (violett) mit dem Versuchsergebnis, zeigt sich eine Überschätzung seitens des Stoffmodells. Zum Zeitpunkt der Berechnung des Versuchs wurde am IGG die berechnete schädigungsinduzierte Dilatanz mit der im Versuch ermittelten Volumendehnung verglichen. Zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt wurde entschieden, dass stattdessen die totale Volumendehnung (lila) betrachtet werden sollte. Dies begründet sich darin, dass im gemessenen Versuchsergebnis auch der elastische Anteil der Volumendehnung enthalten ist, sodass in der berechneten

Größe der elastische Anteil ebenfalls berücksichtigt werden sollte. Mit einer Anpassung des Parametersatzes, wie er beispielsweise nach Anpassung des Stoffmodells für die verschiedenen Verheilungsreihen vorgenommen wurde, kann eine bessere Übereinstimmung zwischen Versuchs- und Berechnungsergebnis hinsichtlich der Volumendehnung (inklusive elastischem Anteil) erzielt werden.

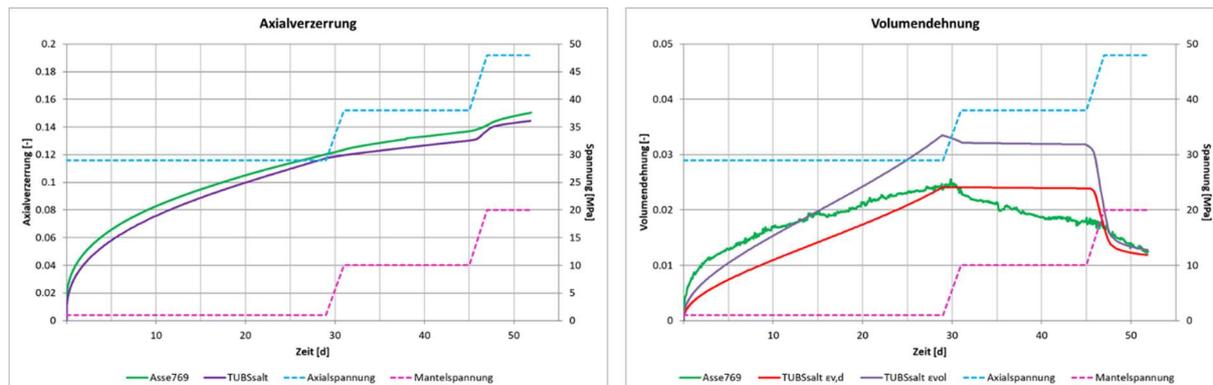


Abbildung 4-3: Versuchsablauf und -ergebnisse für Asse769; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

4.3 Versuche der Series 1 bis 3 zur Untersuchung der Schädigungsrückbildung

4.3.1 Versuchsablauf und Ergebnisse der Serien 1 bis 3

Ziel der Serien 1 bis 3 war die Untersuchung der Schädigungsrückbildung von Asse-Steinsalz. Der Versuchsablauf aller Versuche der Serien 1 bis 3 gliedert sich in eine vorangestellte Rekompaktions-, eine Schädigungs- und eine abschließende Verheilungsphase. Jede Serie umfasst jeweils 4 einzelne Versuche. In der Schädigungsphase wird die Probe, durch Anhebung der Axialspannung, einer deviatorischen Beanspruchung ($\Delta\sigma=28$ MPa) ausgesetzt, die zu dilatanten Verformungen führt. Die Dauer der Schädigungsphase beträgt bei allen Versuchen 11 Tage. In der anschließenden Verheilungsphase, wird ein Spannungszustand erzeugt, der zu einer Rückbildung der Schädigung führt. Die Verheilungsphase wird in den einzelnen Serien unterschiedlich ausgeführt.

Die Serie 1 betrachtet die Schädigungsrückbildung unter einem isotropen Spannungszustand. Die Versuche, Asse466, Asse 470 und Asse 471, wurden an Salzprobekörpern durchgeführt. Ein Versuch der Serie 1 entfällt auf einen Kalibrierversuch an einem Stahldummy. Abbildung 4-4 zeigt den Versuchsablauf, das heißt die anliegende Mantel- und Axialspannung, und die daraus resultierende Axial- sowie Volumendehnung der Probenkörper der drei Einzelversuche.

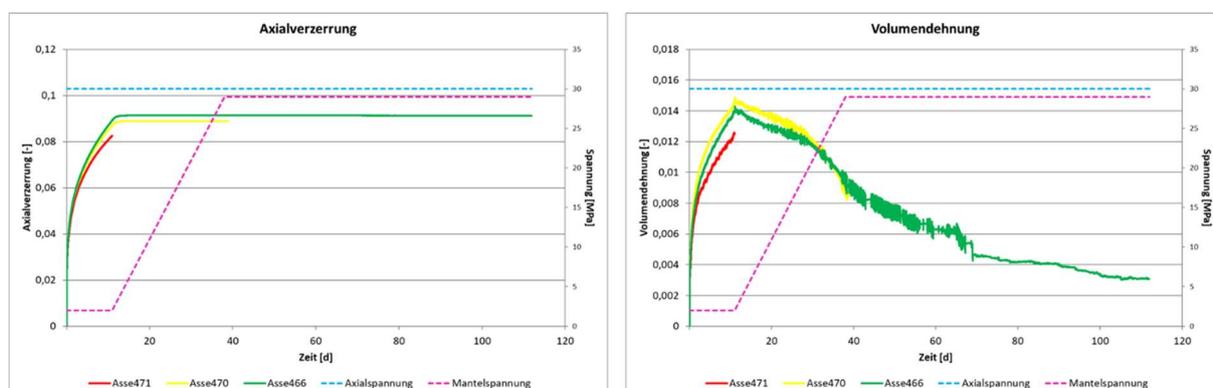


Abbildung 4-4: Versuchsablauf und -ergebnisse der Serie 1; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Die Axialverzerrung liegt mit Ende der Schädigungsphase bei 8,3 bis 8,9 %. Innerhalb der Verheilungsphase tritt lediglich eine geringe Erhöhung der Axialverzerrung auf. Zum Ende des Versuchs Asse 466 weist dieser eine axiale Verzerrung von 9,1 % auf.

Die erreichte schädigungsinduzierte Volumendehnung (Dilatanz) beträgt am Ende der Schädigungsphase 1,2 bis 1,5 %. Mit Ende der Schädigungsphase wurde der Versuch Asse 471 beendet. Die Rückbildung der Schädigung, ist für die beiden weiteren Versuche vergleichbar. Mit dem Ende der Belastungsänderung (Rampe am Übergang der Schädigungs- zu der Verheilungsphase) endet der Versuch Asse 470. Der Versuch Asse 466 zeigt bis zum Ende der Versuchsdurchführung von etwa 110 Tagen eine weitere Rückbildung der Schädigung auf etwa 0,3% mit abnehmender Rate.

In der Serie 2 wurde die Schädigungsrückbildung bei dem Anliegen von unterschiedlichen deviatorischen Spannungszuständen untersucht, vergleiche Abbildung 4-5.

Abbildung 4-6 zeigt die Ergebnisse für die Axial- und die Volumendehnung der einzelnen Versuche. Die axialen Verzerrungen, die sich im Verlauf der Schädigungsphase einstellen, liegen bei etwa 8,7 bis 9,4 %. Sie bleiben bei geringeren anliegenden Deviatorspannungen in der Verheilungsphase (Asse 481 und Asse 480) annähernd konstant, während sie bei den Versuchen Asse 479 und Asse 478, die eine höhere deviatorische Beanspruchung in der Verheilungsphase erfahren, leicht ansteigen.

Bei den Ergebnissen der Volumendehnung zeigen sich für die Versuche Asse 481 und Asse 478 unplausible Verläufe. Versuch Asse 481 zeigt einen starken Abfall der Volumendehnung auf unter 0, was auf ein Öl-Leck in der Versuchseinrichtung zurückzuführen ist. Bei dem Versuch Asse 478 wird ein Rückgang der Volumendehnung gemessen, bevor die Verheilungsphase einsetzt. Zudem fällt die Volumendehnung zu Beginn der Verheilungsphase unverhältnismäßig stark ab. Die Verheilungsrate, die sich in etwa ab dem Tag 30 einstellt, erscheint hingegen plausibel.

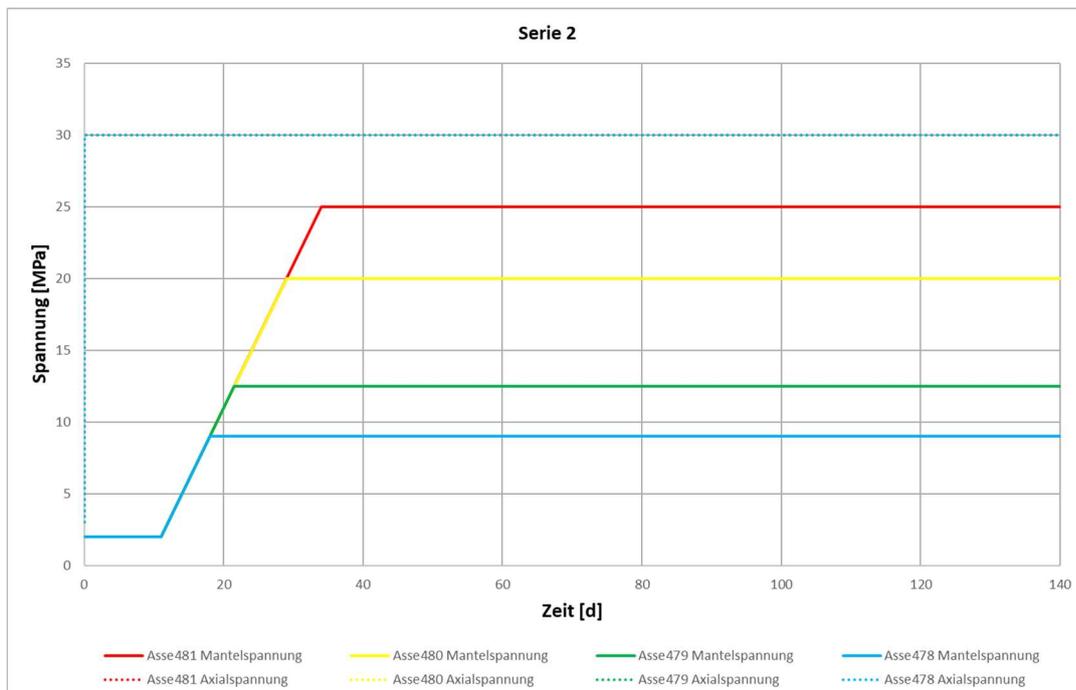


Abbildung 4-5: Versuchsablauf der Serie 2

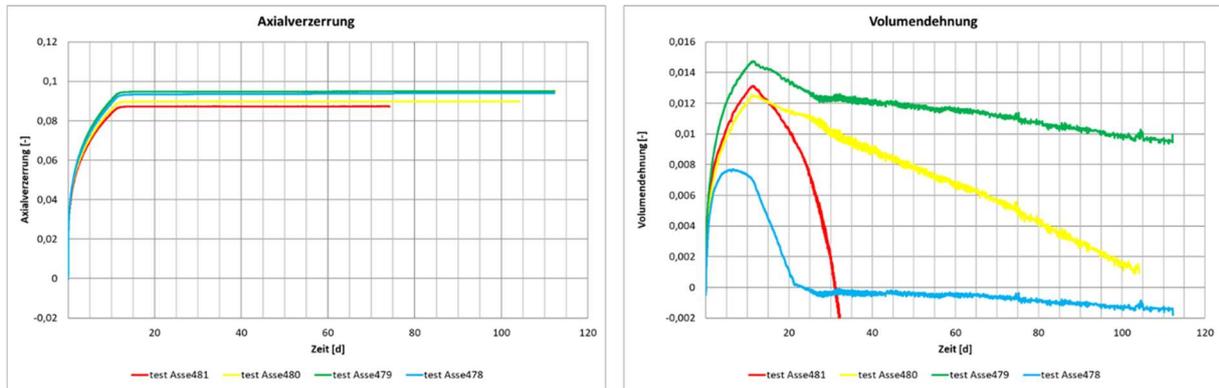


Abbildung 4-6: Versuchsergebnisse der Serie 2; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Die Serie 3 wurde konzipiert um die Schädigungsrückbildung bei unterschiedlichen isotropen Spannungszuständen zu untersuchen, wodurch eine Abhängigkeit der Schädigungsrückbildung von der mittleren Spannung beurteilt werden kann. Zusätzlich wurde eine zweite Verheilungsphase integriert, in der die axiale Spannung instantan auf 30 MPa erhöht wird. Die Spannungszustände der zweiten Verheilungsphase, entsprechen damit annähernd denen der Serie 2. Diese zusätzliche Phase wurde innerhalb der Workshops aufgrund der dort aktuell vorliegenden Ergebnislage beschlossen, um die Ergebnisse der zweiten Verheilungsphase mit denen der Serie 2 vergleichen bzw. gegebenenfalls die Ergebnisse der Serie 2 bestätigen zu können.

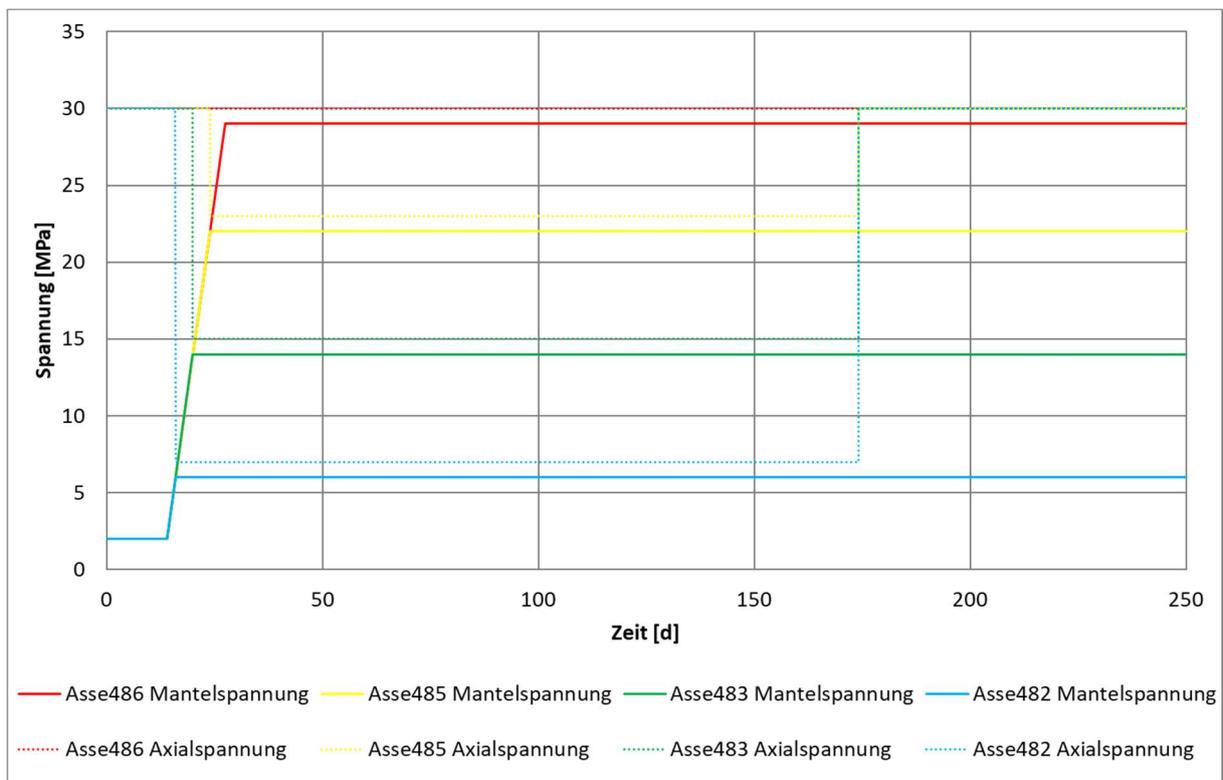


Abbildung 4-7: Versuchsablauf der Serie 3

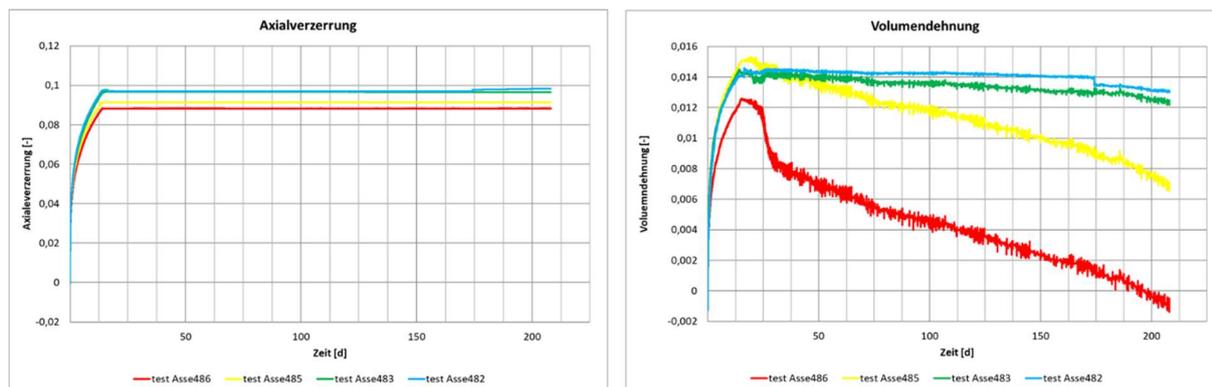


Abbildung 4-8: Versuchsergebnisse der Serie 3; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Die Ergebnisse für die Axialverzerrung und die Volumendehnung der Serie 3 zeigt Abbildung 4-8. Innerhalb der Schädigungsphase stellt sich eine axiale Verzerrung von etwa 8,8 bis 9,7 % ein. Sie bleibt innerhalb der ersten Verheilungsphase für alle vier Versuche konstant. In der zweiten Verheilungsphase nimmt hingegen die axiale Verzerrung im Versuch Asse 482, der in dieser Phase die höchste Deviatorspannung bzw. den niedrigsten Manteldruck aufweist, noch einmal geringfügig um 0,1% zu.

Bei den Ergebnissen der Volumendehnung zeigt der Versuche Asse 486 unplausible Ergebnisse. Für die anderen drei Versuche kann innerhalb der ersten Verheilungsphase eine Abhängigkeit der Verheilungsrate von der mittleren Hauptspannung festgestellt werden. Je höher diese ist, desto höher ist auch die Verheilungsrate. Für die zweite Verheilungsphase zeigt sich, entgegen der Erwartungen, eine teils gleichbleibende oder sogar höhere Rate als in der ersten Phase. Durch die Erhöhung der Deviatorspannung wurde eine Verringerung der Rate erwartet. Die Ergebnisse sollen mit weiteren Versuchen belegt bzw. widerlegt werden.

4.3.2 Anpassung des Stoffmodells

Im Zuge der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde die Formulierung des Verheilungsterms des Stoffmodell *TUBSsalt* überarbeitet. Da die Versuche eine Abhängigkeit der Verheilung von der mittleren Hauptspannung zeigten, wurde diese Abhängigkeit in die Viskosität η_*^V implementiert. Die Versuchsergebnisse konnten mit dem abgepassten Term besser abgebildet werden als mit der vormaligen Formulierung.

Die generelle Formulierung des Verheilungsterms beschreibt Formel (4.1). Formel (4.2) gibt die vormalige Berechnung der Viskosität der Verheilung wieder. Die Viskosität bestimmt das Maß der Verheilung. Je größer der Viskosität ist, desto weniger fließfähig ist das Material. Nimmt also η_*^V einen hohen Wert an, findet weniger Verheilung bzw. Schädigungsrückbildung statt als bei kleinem η_*^V . Insgesamt kann sich die Viskosität innerhalb des Verheilungsterms zwischen η_0 und η_v bewegen. Mit Rückbildung der Schädigung verlagert sich η_*^V aus dem Bereich von η_0 zu η_v .

$$\{\dot{\epsilon}^t\} = \frac{F^t \cdot q^v}{\eta_*^V} \cdot \frac{\partial Q^v}{\partial \{\sigma\}} \quad (4.1)$$

$$\eta_*^v = \eta^v + (\eta_0 - \eta^v) \cdot \tanh\left(m_*^v \cdot \frac{\epsilon_{v,d}}{\epsilon_{v,d,b,*}}\right) \quad (4.2)$$

Formel (4.3) gibt die neue Formulierung zur Berechnung der Viskosität η_*^v wieder. Sie ist nun von dem Faktor ϑ_v abhängig. Dieser wiederum ist in Formel (4.4) dargestellt, wo sich der Einfluss der mittleren Hauptspannung zeigt.

$$\eta_*^v = \eta^v + (\eta_0 - \eta^v) \cdot \tanh\left(m_*^v \cdot \vartheta_v \cdot \frac{\varepsilon_{v,d}}{\varepsilon_{v,d,b,*}}\right) \quad (4.3)$$

$$\vartheta_v = e^{(v_1 \cdot \sigma_0)} \quad (4.4)$$

Mit steigender Belastung wird σ_0 größer. v_1 wurde aus den durchgeführten Versuchen zu 0,071 bestimmt. Der Gesamtterm für ϑ_v wird somit bei größerer mittlerer Hauptspannung größer. Das bedeutet für den Term des Tangens hyperbolicus, dass dieser größer wird und sich somit eine Viskosität η_*^v , die näher an η_0 liegt, einstellt. Erreicht die Schädigung $\varepsilon_{v,d}$ den Wert 0, so ist die maximale Viskosität η_v erreicht. Die Rückbildung der Schädigung kommt zum Erliegen. Durch die Einführung des neuen Parameters wird somit eine länger anhaltende Schädigungsrückbildung, die von der mittleren Hauptspannung abhängt, gewährleistet. Vor der Einführung dieses Parameters zeigte sich je nach Einstellung der Viskosität η_v eine zu niedrige Verheilungsrate insgesamt oder eine sehr hohe Verheilungsrate, sodass jedoch die vollständige Schädigungsrückbildung zu früh erreicht wurde. Die Anpassung des Stoffmodells wurde anhand der Nachrechnung einer repräsentativen Auswahl von Schädigungs-, Kriech- und Verheilungsversuchen validiert. Auf eine explizite Darstellung aller Ergebnisse wird verzichtet. Im Folgenden sollen lediglich die Nachrechnungen der aktuellen Verheilungsversuche aufgezeigt werden.

4.3.3 Nachrechnung der Versuchsergebnisse der Serie 1 bis 3 mit dem Stoffmodell TUBSsalt

Die mit der neuen Formulierung des Verheilungsterms berechneten Ergebnisse sind folgend dargestellt. Abbildung 4-9 zeigt die Ergebnisse für die Serie 1. In Violett ist das Berechnungsergebnis mit *TUBSsalt* dargestellt. Die axialen Verzerrungen werden für die Schädigungsphase sehr gut wiedergegeben. Aufgrund der insgesamt hohen anliegenden Spannungen in der Verheilungsphase und der höheren Belastung in axialer Richtung im Vergleich zur radialen Belastung kommt es in axialer Richtung zu schädigungsinduzierten Verzerrungen in diese Richtung. Diese wirken sich auch auf das Berechnungsergebnis der axialen Verzerrung aus, was den Anstieg der berechneten Axialdehnung erklärt. Die Entwicklung der berechneten schädigungsinduzierten Volumendehnung bewegt sich innerhalb der Schädigungsphase leicht unterhalb bzw. zwischen den Versuchsergebnissen. Die anschließende Rückbildung der Dilatanz wird sehr gut abgebildet.

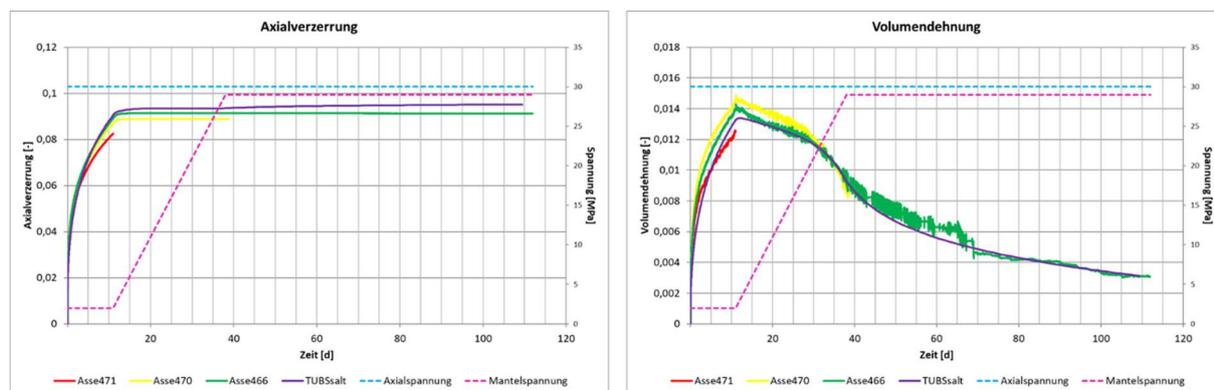


Abbildung 4-9: Berechnungsergebnisse der Serie 1; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Für die Serie 2 sind die Kurven der Berechnungsergebnisse der einzelnen Versuche in Abbildung 4-10 gestrichelt dargestellt, während die Kurven der Versuchsergebnisse, wie in den vorherigen Abbildun-

gen, durchgezogen sind. Die Berechnungsergebnisse der Axialverzerrungen liegen im Bereich der Versuchsergebnisse. Für die Verheilungsphase zeigt sich in Abhängigkeit der Deviatorspannung eine Zunahme der Axialverzerrung. Diese zeigt sich zwar auch in den Versuchen, ist dort aber deutlich geringer.

Hinsichtlich der Volumendehnung geben die Berechnungsergebnisse, die in der Schädigungsphase erreichte, schädigungsinduzierte Verzerrung sehr gut wieder. Für die anschließende Verheilungsphase konnte, durch die Anpassung des Verheilungsterms, eine Spreizung der Kurven erreicht werden. Der Abhängigkeit der Schädigungsrückbildung von der mittleren Hauptspannungen wird somit Rechnung getragen. Da die Versuchsergebnisse für Asse 481 und Asse 478 nicht gänzlich verwertbar sind, ist ein direkter Vergleich der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen nicht zielführend. Jedoch stimmt die Verheilungsrate von Versuch Asse 478 sehr gut mit dem berechneten Ergebnis überein. Die berechneten Raten der Schädigungsrückbildung überschätzen die gemessene Rate für Asse 479 leicht, während die Rate von Asse 480 unterschätzt wird. Hier konnte somit ein Mittelweg gefunden werden, den es durch weitere Versuche zu belegen gilt.

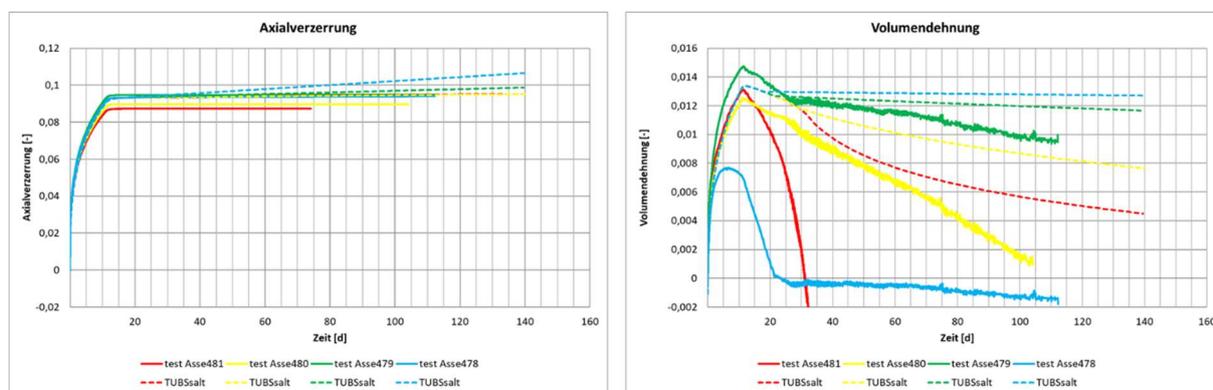


Abbildung 4-10: Berechnungsergebnisse der Serie 2; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Die Ergebnisse der Nachrechnung der Serie 3 sind in Abbildung 4-11 dargestellt. Für die Axialverzerrung zeigt sich ein, mit der Serie 2 vergleichbares Bild. Die Berechnungsergebnisse liegen für die Schädigungsphase zwischen bzw. am oberen Rand der Versuchsergebnisse. Aufgrund der geringen deviatorischen Beanspruchung kommt es in der ersten Verheilungsphase kaum zu Änderungen der axialen Verzerrung. Hier ist nur bei dem Versuch Asse 486, dessen Ablauf dem der Serie 1 ähnelt, eine leichte Zunahme zu erkennen. Deutlichere Unterschiede zwischen den Berechnungsergebnissen und den Versuchsergebnissen zeigen sich für die zweite Verheilungsphase beim Versuch Asse 482. Die hohe deviatorische Beanspruchung führt zu einer Erhöhung der axialen Verzerrung im Berechnungsergebnis. Eine Zunahme der axialen Verzerrungen gibt der Versuch ebenfalls wieder, allerdings ist die Rate deutlich geringer. Bei den restlichen Versuchen lässt diese Beobachtung ebenfalls machen. Allerdings sind die Unterschiede weniger deutlich und daher nur bei entsprechender Skalierung zu erkennen. Es lässt sich somit festhalten, dass die Berechnung die axialen Verzerrungen in der zweiten Verheilungsphase leicht überschätzt wird.

Bei der Volumendehnung lässt sich erkennen, dass die berechneten schädigungsinduzierten Verzerrungen der Schädigungsphase die Versuchsergebnisse sehr gut wiedergeben. Die Quantität der Volumendehnung des Versuchs Asse 486 ist nicht plausibel. Die Qualität kann hinsichtlich der Rate der Schädigungsrückbildung als Anhaltspunkt gesehen werden. Der Rückgang der Schädigung wird zu Beginn der ersten Verheilungsphase im Berechnungsergebnis quantitativ überschätzt. Die sich anschließend einstellende Rate liegt teilweise etwas oberhalb und teilweise etwas unterhalb der Raten aus den

Versuchen. Die Versuchsergebnisse der zweiten Verheilungsphase lassen sich mit den Berechnungsergebnissen nicht für alle Versuche wiedergeben. Für Asse 482 wird ein Zuwachs der Schädigung berechnet, da sich ein Spannungszustand oberhalb der Dilatanzgrenze einstellt. Der Versuch zeigt hingegen eine Abnahme der Schädigung mit einer Zunahme der Rückbildungsrate. Auch die Versuche Asse 483 und Asse 485 zeigen eine Zunahme der Schädigungsrückbildung in der zweiten Verheilungsphase. Wird die mittlere Hauptspannung erhöht, so erhöht sich auch die Deviatorspannung. Weswegen eher eine leichte Abnahme der Rate erwartet und auch berechnet wird. Wie bereits oben erwähnt, müssen die Versuchsergebnisse durch weitere Versuche belegt oder widerlegt werden. Das Versuchsergebnis des Versuchs Asse 486 muss als unplausibel gedeutet werden. Die Rate der Schädigungsrückbildung nimmt zu, während sich der Spannungszustand nicht ändert.

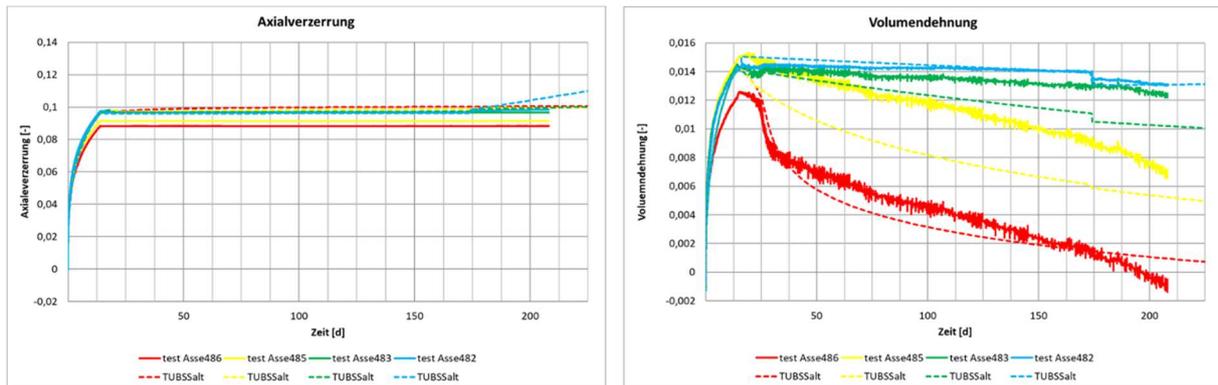


Abbildung 4-11: Berechnungsergebnisse der Serie 3; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

4.4 Versuche der Serie 4 zur Untersuchung der Schädigungsrückbildung

4.4.1 Versuchsablauf und Ergebnisse

Aufgrund der stark streuenden Ergebnisse in den ersten drei Versuchsserien wurde eine weitere Versuchsserie Serie 4 durchgeführt. Da alle vier Versuchsstände der TUC von einer Anlage gesteuert werden, wurde eine Durchführung von jeweils vier Versuchen mit einheitlichen Versuchsbedingungen, im Vergleich zu den ersten drei Serien, bei denen jeweils vier unterschiedliche Spannungszustände für die Verheilungsphasen angesetzt wurden, als zielführender erachtet. Die Serie 4 enthält somit insgesamt 16 Versuche, vier unterschiedlichen Versuchsreihen an jeweils vier Proben. In der Serie 4 lag der Fokus auf der Untersuchung der Schädigungsrückbildung bei unterschiedlichen deviatorischen Spannungszuständen mit gleicher mittlerer Spannung. Abbildung 4-12 zeigt den Versuchsablauf der einzelnen Versuchsreihen der Serie 4.

Bei der Versuchsreihe 4b wurde die Schädigungsphase vorzeitig beendet, da die erreichten Axial- und Volumendehnungen bereits derart hoch waren, dass eine Fortführung der Schädigungsphase bis zu einer Gesamtdauer von 11 Tagen dem Risiko des Bruchs der Proben und somit dem Verlust der Versuchsreihe gegenüberstand. Nach der Schädigungsphase wurde bei allen Versuchsreihen die Mantelspannung mit einer Rate von 2 MPa/d erhöht bis der Zielwert erreicht wurde. Mit Erreichen des Zielwerts wurde die Axialspannung instantan auf den für sie vorgesehenen Zielwert gesenkt. Bei der Versuchsreihe 4b erfolgte die Erhöhung der Axialspannung etwa drei Tage verzögert.

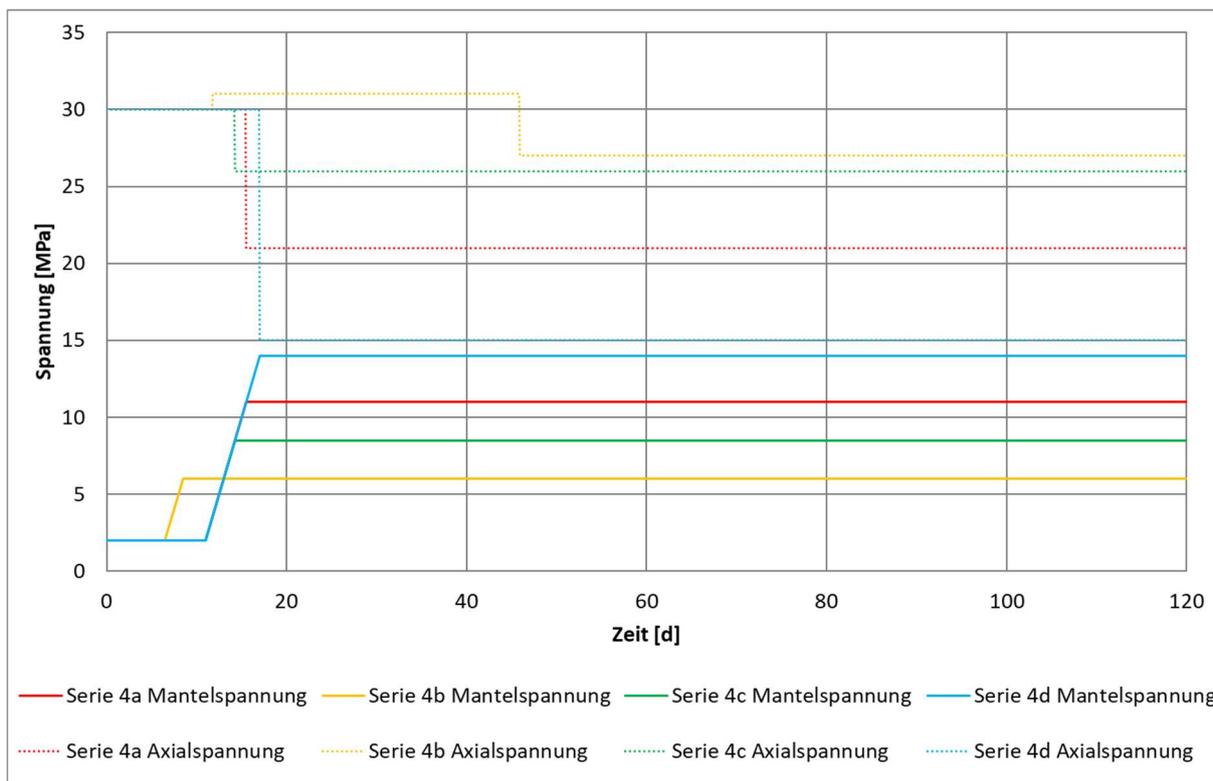


Abbildung 4-12: Versuchsablauf der Serie 4

Abbildung 4-13 zeigt die gemessenen Axial- und Volumendehnung der Reihe 4a. Die Axialverzerrung, die in der Reihe 4a erreicht wird, liegt zwischen 8,6 und 10,4 %. Der obere Wert liegt damit im Vergleich zu den Versuchsergebnissen der Serie 1 bis 3 deutlich höher.

Bei der Volumendehnung zeigt sich, für die Mehrzahl der Versuche, ein einheitliches Bild. Einzig der Versuch Asse 487 zeigt eine insgesamt deutlich geringere Volumendehnung. Die anderen drei Versuche erreichen innerhalb der Schädigungsphase eine Dehnung von rund 1,2 bis 1,3%. Die Rückbildungsrate ist bei den drei Versuchen etwa gleich groß.

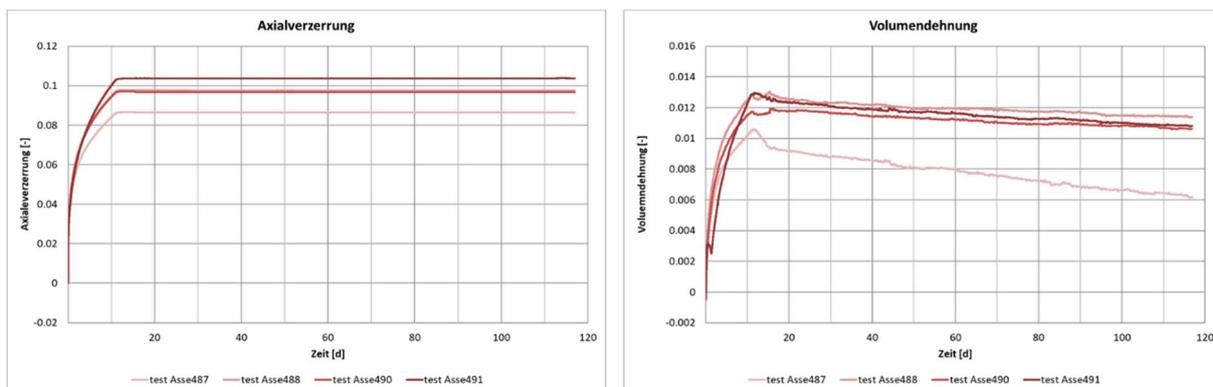


Abbildung 4-13: Versuchsergebnisse der Serie 4a; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

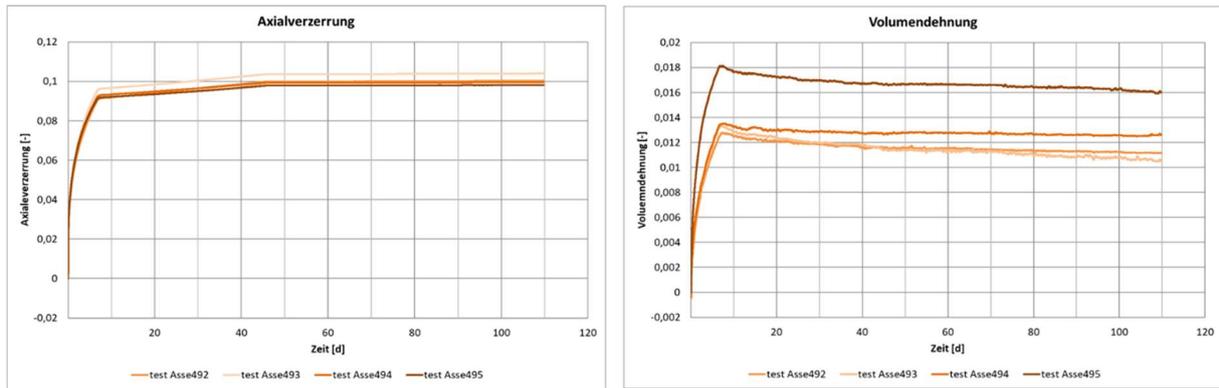


Abbildung 4-14: Versuchsergebnisse der Serie 4b; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Bei der Serie 4b (Abbildung 4-14) liegt die, innerhalb der Schädigungsphase erreichte, Axialverzerrung zwischen 9,2 und 9,6 % und damit zwar in einer vergleichbaren Größenordnung zu den bisher durchgeführten Versuchen der Serie 1 bis 3, jedoch ist die Schädigungsphase hier mit 8,5 Tagen deutlich kürzer. Es wurde somit eine außergewöhnlich hohe Schädigung erreicht. Es folgt ein weiterer Anstieg im Versuchsverlauf aufgrund der erhöhten Axialspannung von 9,8 auf 10,4 %. Mit der Reduktion der Axialspannung bleibt die Axialverzerrung unverändert auf diesem Niveau.

Die Volumendehnung liegt nach der Schädigungsphase bei etwa 1,3 bis 1,4 %. Der Versuch Asse 495 sticht hier mit 1,8 % deutlich heraus. Auch diese Werte sind im Vergleich zu den vorherigen Versuchen aufgrund der kürzeren Schädigungsphase hoch. Die Rückbildungsraten ähneln sich bei allen Versuchen. Mit Änderung der Belastung nach etwa 45 Tagen nimmt die Verheilungsrate entsprechend der reduzierten mittleren Hauptspannung und Deviatorspannung ab.

Abbildung 4-15 zeigt die gemessenen Axial- und Volumendehnung der Reihe 4c. In der Serie 4c wurden nahezu identische Axialverzerrung in allen vier Teilversuchen erreicht, die Axialverzerrung liegt zwischen 9,7 und 10 %.

Bei der Volumendehnung zeigt sich ebenfalls für drei von vier Versuchen ein vergleichbares Bild. Einzig der Versuch Asse 499 zeigt eine insgesamt deutlich höhere Volumendehnung. Die anderen drei Versuche erreichen innerhalb der Schädigungsphase eine Dehnung von rund 1,1 bis 1,2%. Die Rückbildungsraten sind bei den drei Versuchen vergleichbar. Die Abfälle in den Kurven (ca. Tag 100) sind auf einen Ausfall der Heizung und damit eine hohe Temperaturschwankung zurückzuführen.

Abbildung 4-16 stellt die Ergebnisse der Serie 4d dar. Die Axialverzerrung, liegt zwischen 9,8 und 11,0 %. Bei den Versuchen Asse 500, Asse 501 und Asse 502 kam es im Versuchsablauf zu einem Ölaustritt, sodass die Ergebnisse der Volumendehnung kritisch zu würdigen sind.

AP 2 Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung

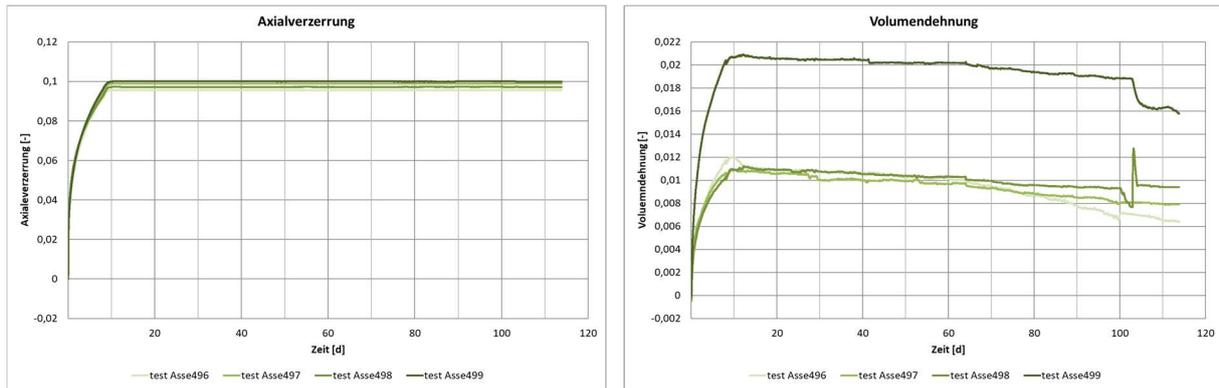


Abbildung 4-15: Versuchsergebnisse der Serie 4c; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

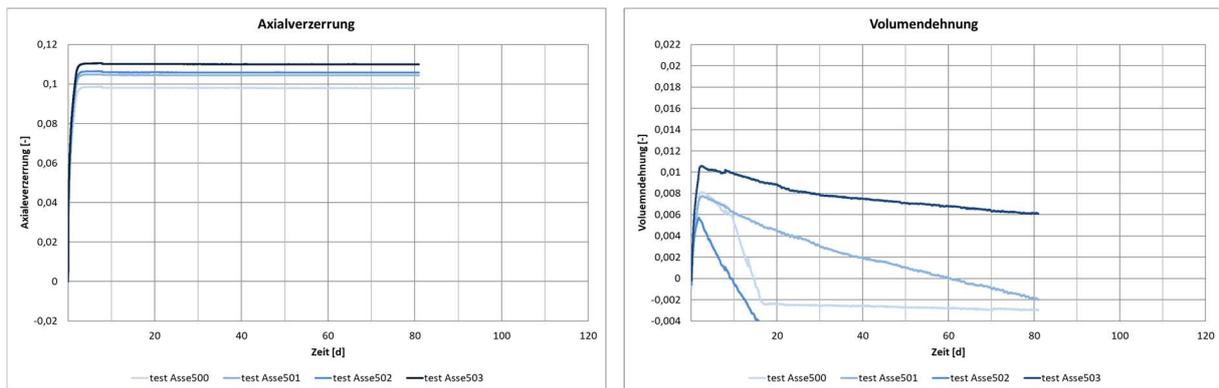


Abbildung 4-16: Versuchsergebnisse der Serie 4d; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Die neue Formulierung des Verheilungstherms des Stoffmodells *TUBSsalt* (vgl. 4.3.2) basiert auf den Ergebnissen der Serien 1 bis 3, da vor allem in der Serie 3 eine Abhängigkeit der Schädigungsrückbildung von der mittleren Spannung identifiziert werden konnte. Abbildung 4-17 zeigt die Ergebnisse der Serien 4 a bis d im Vergleich. Exemplarisch für jede Serie wurde ein charakteristischer Versuch ausgewählt, wobei die Ergebnisse der Serie 4 d als kritisch zu würdigen sind. Die Verheilungsraten der Versuche werden als vergleichbar eingestuft, sodass die in Kapitel 4.3.2 beschriebene Anpassung des Stoffmodells weiterhin als valide angesehen wird. Ob eine weitere Überarbeitung der Formulierung notwendig ist, soll mit der Nachrechnung der Serien 4 a bis c und dem Abgleich mit den Versuchsergebnissen überprüft werden.

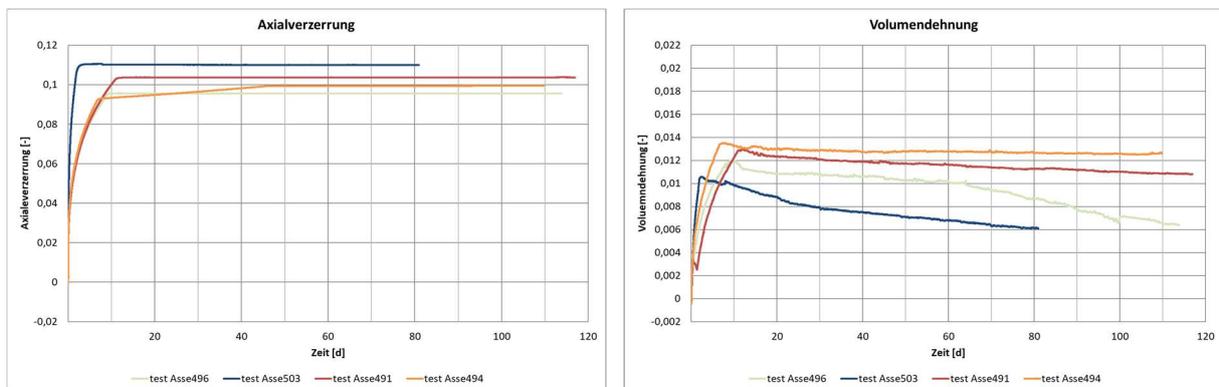


Abbildung 4-17: Versuchsergebnisse der Serie 4 im Vergleich; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

4.4.2 Nachrechnung der Versuchsergebnisse

Für die Versuchsreihe 4a zeigt sich bei der Axialverzerrung eine gute Übereinstimmung zwischen den Berechnungs- und den Versuchsergebnissen, siehe Abbildung 4-18 (links). Die Berechnungsergebnisse liegen bei der Schädigungsphase etwas unterhalb von den drei Versuchsergebnissen, jedoch noch oberhalb der untersten Versuchskurve. Die weitere Entwicklung der Axialverzerrung innerhalb der Verheilungsphase zeigt bei den Versuchen einen minimalen Rückgang, während das Berechnungsergebnis einen minimalen Anstieg verzeichnet.

Die in den Versuchen gemessene Volumendehnung wird von den Berechnungsergebnissen innerhalb der Schädigungsphase gut getroffen. Die Kurve liegt im Bereich der oberen beiden Versuchskurven. Die Abbildung der Verheilung trifft die Versuchsergebnisse hinreichend genau, allerdings weisen die Berechnungsergebnisse eine etwas geringere Rate als die Versuche auf.

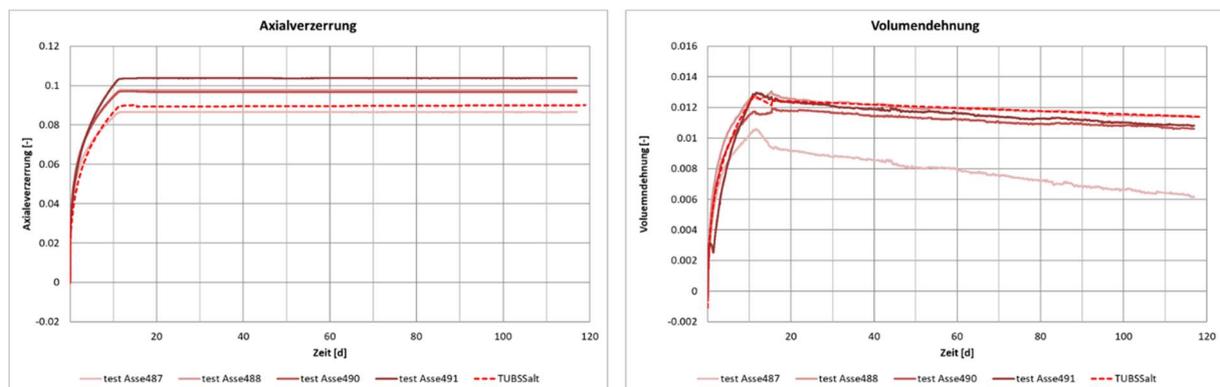


Abbildung 4-18: Berechnungsergebnisse der Serie 4a; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

Bei der Versuchsreihe 4b passen die Ergebnisse der Berechnung wie erwartet quantitativ nicht zu den Versuchsergebnissen. Diese Versuche weisen, wie bereits beschrieben, eine ungewöhnlich hohe Axialverzerrung und Volumendehnung auf, sodass der Versuchsablauf während des Versuchs angepasst wurde. Durch die vorzeitige Beendigung der Schädigungsphase sind die erreichte berechnete Axialverzerrung und die Volumendehnung in dieser deutlich geringer ausgeprägt, siehe Abbildung 4-19. Aber auch qualitativ zeigen sich Unterschiede. Die Zunahme der Axialverzerrung in der ersten Phase der Verheilung ist im Versuch geringer ausgeprägt als bei der Berechnung. In der zweiten Phase zeigt sich zudem im Versuch eine Einstellung der Zunahme, während es bei der Berechnung weiterhin zu einer Erhöhung der Verzerrungen kommt.

Hinsichtlich der Volumendehnung ist im Berechnungsergebnis innerhalb der Verheilungsphase kaum eine Änderung der zuvor erreichten Volumendehnungen zu erkennen. Das liegt daran, dass der erste Spannungszustand (-31/-6/-6 MPa) knapp oberhalb der im Stoffmodell implementierten Dilatanzgrenze liegt und auch der zweite Spannungszustand nicht weit von dieser entfernt ist. Entsprechend der in *TUBSSalt* implementierten Verheilungsgrenze, die der Dilatanzgrenze abzüglich der Zugfestigkeit des Salzes entspricht, kann so keine Rückbildung der Volumendehnung stattfinden.

Die Abbildung 4-20 zeigt die Berechnungsergebnisse der Serie 4c. Wie bereits für die Serie 4b beschrieben, zeigen die Versuche hohe axiale Verzerrungen, die durch die Berechnung nicht abgebildet werden. Die berechnete Volumendehnung stimmt hingegen mit den gemessenen Werten hinreichend genau überein.

Auf eine Nachrechnung der Versuchsserie 4d wird aufgrund der kritisch zu würdigenden Ergebnissen (vgl. Kapitel 4.4.1) verzichtet.

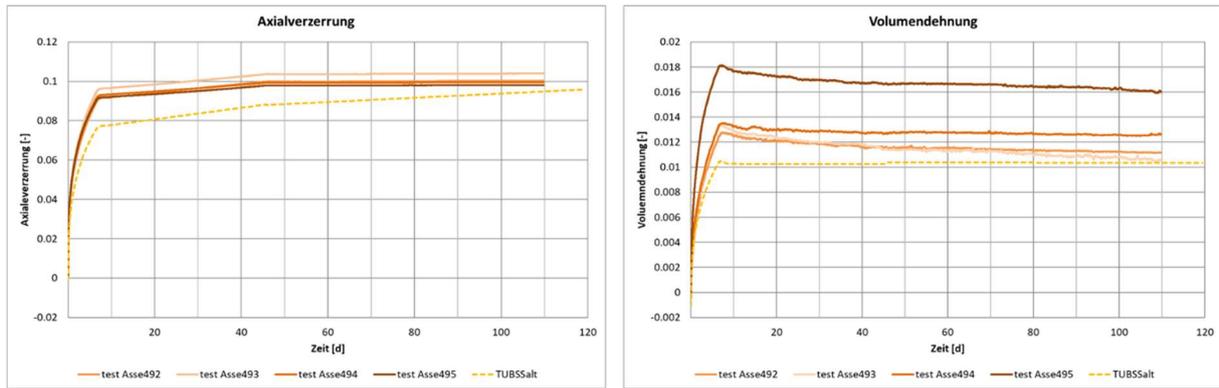


Abbildung 4-19: Berechnungsergebnisse der Serie 4b; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

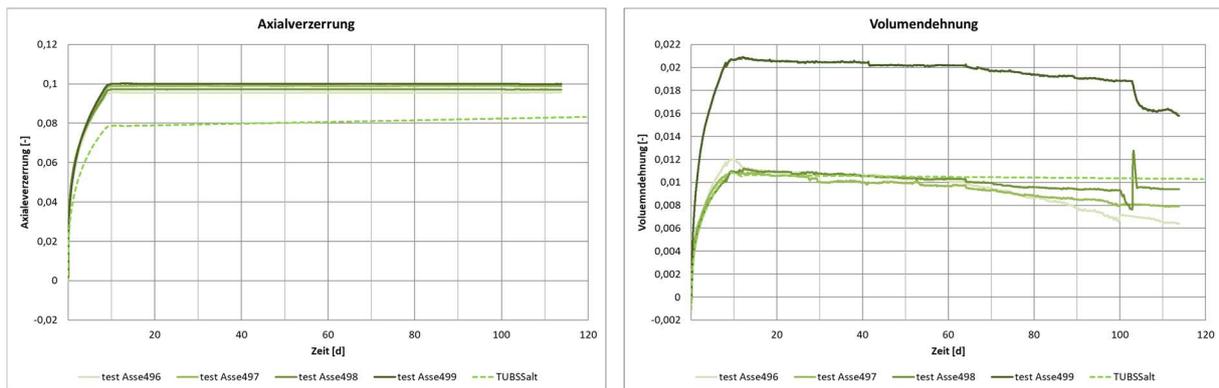


Abbildung 4-20: Berechnungsergebnisse der Serie 4c; Axialverzerrung (links) und Volumendehnung (rechts)

4.5 Nachrechnung der Verheilungsversuche an einem Zylinderausschnitt (Druckplattenversuche)

Die Nachrechnung der Verheilungsversuche (vgl. Kapitel 4.3, 4.4 und 4.4) erfolgte an einem Quader mit 16 Zonen (2 x 2 x 4; B x H x T). Vergleichend zu diesem einfachen Modell sollte zusätzlich eine Berechnung an einem Modell, das dem tatsächlichen Versuchsaufbau entspricht erfolgen. Dazu stellte TUC zwei Modelle bereit. Bei den Modellen handelt es sich jeweils um einen Ausschnitt eines Zylinders. In Modell 1 ist der Versuchsaufbau ohne Druckplatten modelliert, es berücksichtigt ausschließlich einen Salzprüfkörper mit einer Höhe von 300 mm und einem Durchmesser von 150 mm. Die Belastungen werden direkt auf die Zonen des Prüfkörpers aufgebracht. Durch die Modellierung des Zylinderausschnitts, wird nur die Hälfte des Durchmessers abgebildet. Das zweite Modell beinhaltet am oberen und unteren Ende des simulierten Prüfkörpers jeweils eine 100 mm dicke Stahlplatte, über welche die Belastung eingeleitet wird. Die Modelle sind von TUC in FLAC3D 5.01 erstellt worden und wurden von TUBS in FLAC3D 6.0 übertragen. Beide Modelle sind in Abbildung 4-21 zu sehen.

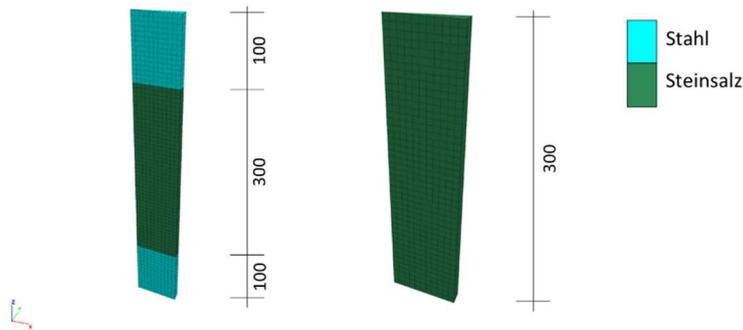


Abbildung 4-21: Modell des Zylinderausschnitts mit (links) und ohne Druckplatten aus Stahl (rechts)

An beiden Modellen wurden der Versuch Asse 466, bzw. alle Versuche der Serie 1, sowie der Versuch Asse 482 aus der Serie 3 nachgerechnet. Verglichen wurden die Schädigungsvolumendehnung in festgelegten Zonen, die Radial- und Axialverzerrung der Probe sowie die Volumenverzerrung der gesamten Probe. Die Radialverzerrung wird über die Verschiebung des gridpoints, der sich außen auf halber Höhe der Probe befindet ermittelt. Für die Bestimmung der Axialverzerrungen wird die Differenz der Verschiebungen der gridpoints, die sich mittig an der oberen und unteren Probenkante befinden, bestimmt und durch die Probenhöhe geteilt. Für die Volumenverzerrung wird die Differenz des Zonenvolumens des Prüfkörpers mit dem, aus der Geometrie bestimmbar, Prüfkörpervolumen zu Beginn des Versuchs bestimmt und durch das Prüfkörpervolumen zu Beginn geteilt. Zudem wurden die berechneten Spannungen und Schädigungen über die gesamte Probe mittels Contourplots ausgewertet.

Insgesamt zeigt sich, dass die Ergebnisse der Zonenauswertungen qualitativ vergleichbar sind. Quantitativ stellt sich jedoch ein Unterschied ein. Die verschiedenen Contourplots für die Berechnung am Modell 2 sind über das Modell sehr homogen. So verteilen sich beispielsweise die Spannungen entsprechend der eingeleiteten Lasten sehr homogen im Prüfkörper. Für das Modell 1 stellen sich die Ergebnisse deutlich inhomogener dar. Im Prüfkörper lässt sich anhand der minimalen Spannungen der sich in der Schädigungsphase dort einstellende Druckkegel erkennen, vergleiche Abbildung 4-22. Die Abbildung zeigt beispielhaft für den Versuche Asse 482 die minimale Hauptspannung zum Ende der Schädigungsphase, also nach 14 Tagen. Der linke Plot gibt jeweils das Ergebnis für das Modell mit Druckplatten (Modell 1) wieder. Entsprechend der Spannungsverteilung bildet sich auch die Schädigung über die Prüfkörperhöhe und -breite unterschiedlich aus. Die höchste Schädigung wird im Kern des Prüfkörpers berechnet, vergleiche Abbildung 4-23.

Insgesamt sind jedoch die Schädigungsvolumendehnungen sowie die Verzerrungen bei der Berechnung mit Modell 1 deutlich geringer, vergleiche Abbildung 4-24. Die gestrichelten Kurven geben die Ergebnisse des Modells 1 wieder. Die Diskrepanz zwischen der Axialverzerrung ist am stärksten.

Für die Schädigungsvolumendehnung, die in der Mitte der Probe an drei Punkten (innen, mittig und außen) ausgewertet wurde, ist der Unterschied innerhalb der Schädigungsphase etwas geringer. Es zeigt sich jedoch dann aufgrund der höheren Schädigung auch eine höhere Verheilungsphase für das Modell 2, vergleiche Abbildung 4-25.

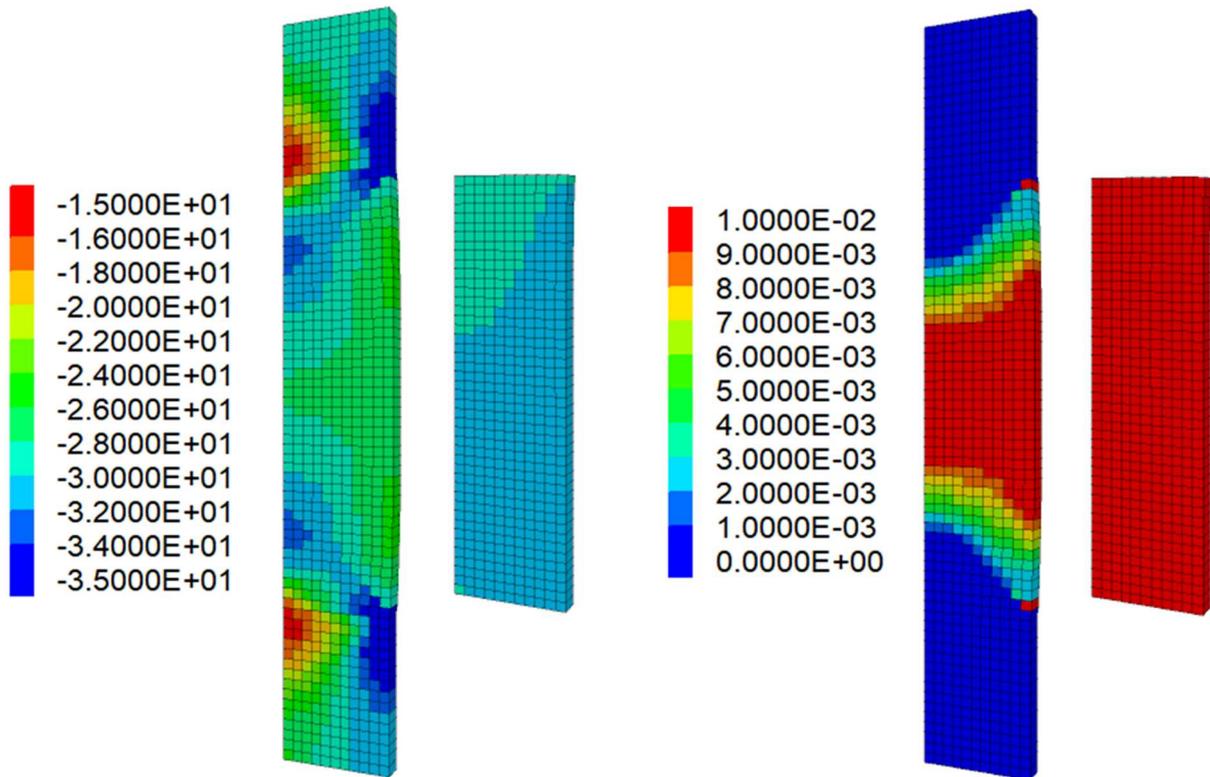


Abbildung 4-22: Minimale Hauptspannung [MPa] nach 14 Tagen für Asse482; Modell 1 (links) und Modell 2 (rechts)

Abbildung 4-23: Schädigungsvolumendehnung [-] nach 14 Tagen für Asse482; Modell 1 (links) und Modell 2 (rechts)

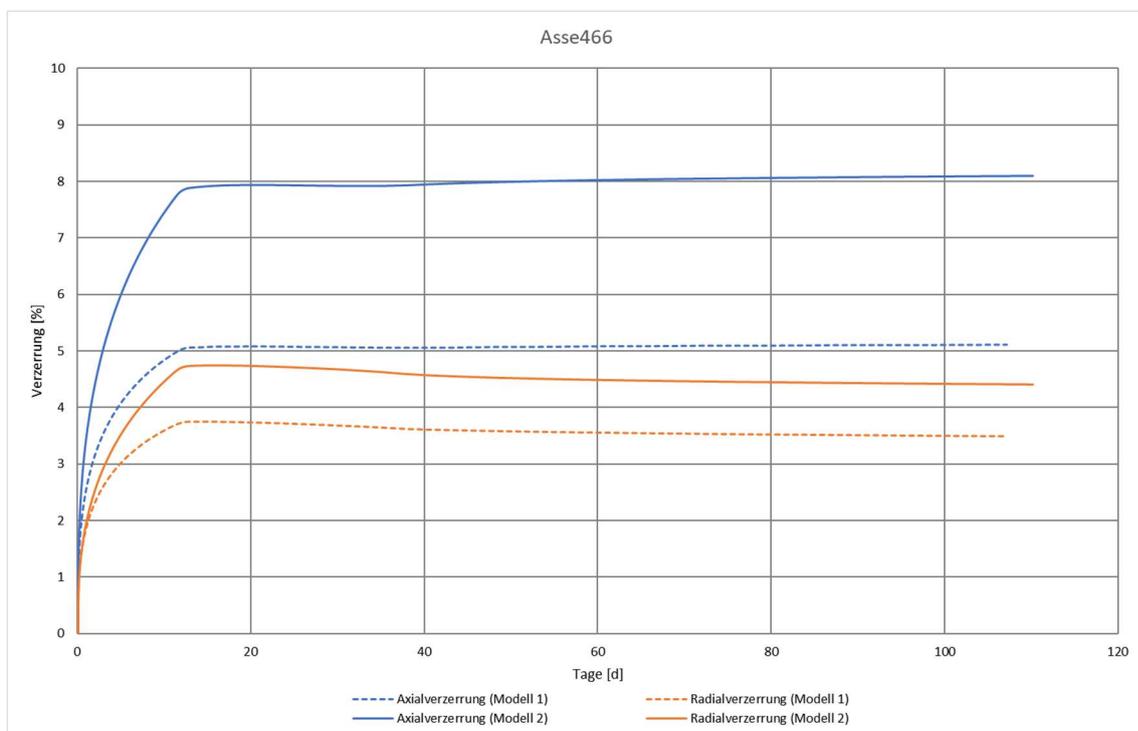


Abbildung 4-24: Vergleich der Radial- und Axialverzerrung über die Zeit für Versuchs Asse466 für Modell 1 und Modell 2

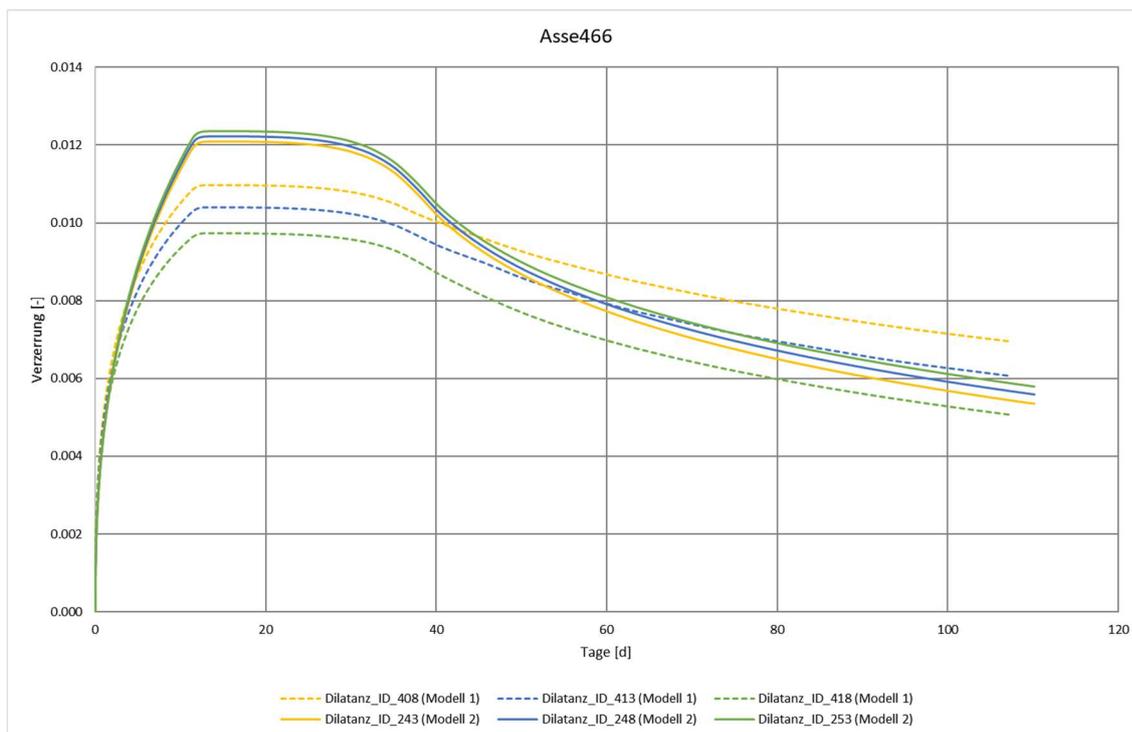


Abbildung 4-25: Dilatanzentwicklung über die Zeit des Versuchs Asse466 für Modell 1 und Modell 2

4.6 Würfelberechnungen zur Richtungsabhängigkeit der Schädigung und der Schädigungsrückbildung

Um die im Stoffmodell implementierte Richtungsabhängigkeit der Schädigung und der Verheilung zu überprüfen, wurden mehrere Berechnungen an einem 4 x 4-Würfel-Modell durchgeführt. Tabelle 4-1 fasst alle Berechnungen übersichtlich zusammen.

Tabelle 4-1: Durchgeführte Berechnungen an 4x4-Würfel

Berechnung	Schädigungsphase		Verheilungsphase	
	Belastung ($\sigma_x/\sigma_y/\sigma_z$) [MPa]	Dauer [d]	Belastung ($\sigma_z/\sigma_y/\sigma_x$) [MPa]	Dauer [d]
C01	-2/-3/-30	30	---	---
C02	-2/-9/-30	30	---	---
C03	-2/-29/-30	30	---	---
C04	-2/-2/-30	30	-20/-20/-30	70
C05	-2/-2/-30	30	-10/-20/-30	70
C06	-2/-2/-30	30	-2/-20/-30	70
C07	-2/-9/-30	30	-20/-20/-30	70
C08*	-2/-29/-30	30	-20/-20/-30	70
C09**	-2/-2/-30	30	-20/-20/-48	70
C10	-2/-2/-30	30	-2/-2/-29	70
C11	-2/-2/-30	30	-30/-30/-30	70

* zusätzliche Variante mit Belastungsrampe; ** vor Schädigungsphase weitere Verheilungsphase mit -20/-20/-48 über 30 d

Die Änderung der Belastungsphase in den Berechnungen C04 bis C011 erfolgte bis auf eine abweichende Berechnung in C08 instantan, also nicht über eine Rampe.

Abbildung 4-26 zeigt die Ergebnisse für die ersten drei Berechnungen, die lediglich eine Schädigungsphase beinhalteten. Die oberen Kurven zeigen jeweils die Verzerrungen in x- (rot), y- (blau) und z-Richtung (grün) über die Zeit. Positive Werte sind als Extension, negative als Kompression zu interpretieren. Während in der ersten Berechnung der Würfel in x- und y-Richtung eine Verzerrung aufweist, erfolgt dies entsprechend der aufgetragenen Belastung in der Berechnung C03 nur noch in die x-Richtung. Ein vergleichbares Bild zeigt sich in der Mitte. Hier sind die schädigungsinduzierten Verzerrungen in die jeweiligen Richtungen (gleiche Farbgebung) über die Zeit zu dargestellt. Die Richtungsabhängigkeit ist klar zu erkennen. Die unteren Graphen zeigen die schädigungsinduzierte Volumenverzerrung (pink) sowie die gesamte Volumenverzerrung (türkis) über die Zeit. Die schädigungsinduzierte Volumenverzerrung ergibt sich aus der Summe der einzelnen Komponenten. Durch die hohen Differenzspannungen in der Berechnung C01 zwischen x- und z-, sowie y- und z-Richtung ergeben sich hier sehr hohe schädigungsinduzierte Komponenten in x- und y-Richtung. In der zweiten Berechnung fällt die Differenz zwischen y- und z-Richtung geringer aus, sodass auch die schädigungsinduzierte Verzerrung in y-Richtung kleiner ist. Durch die geringere Differenzspannung insgesamt fällt auch die Komponente in x-Richtung geringer aus. Diese Effekte spiegeln sich entsprechend in der schädigungsinduzierten Volumenverzerrung wider. In der dritten Berechnung ist die Differenzspannung zwischen x- und y-, sowie x- und z-Richtung hingegen wieder sehr hoch, sodass hier insbesondere in x-Richtung eine hohe Schädigungskomponente erzielt wird. Insgesamt ist die schädigungsinduzierte Volumenverzerrung jedoch etwas geringer als in der ersten Berechnung. Ursache dafür ist die in der ersten Berechnung geringere mittlere Spannung. Die „Einspannung“ ist somit insgesamt geringer.

Durch die Einführung des Lodewinkels und der dadurch angepassten Formulierung der Fließfunktion F^t (Dilatanzbedingung), vgl. Kapitel 2, liegen die Werte für F^t der Berechnungen C01 und C03 sehr nah aneinander. Maßgeblich für die am Ende größere Schädigung bei C01 ist die Entwicklung der aktuellen Viskosität des tertiären Kriechens (η^t). Infolge der geringen mittleren Spannungen bei C01 nimmt die Viskosität des tertiären Kriechens ab, während die Viskosität für C03 konstant auf dem Wert der initialen Viskosität des tertiären Kriechens η^t bleibt. Die geringere Viskosität führt zu höheren Verformungen und Schädigungen.

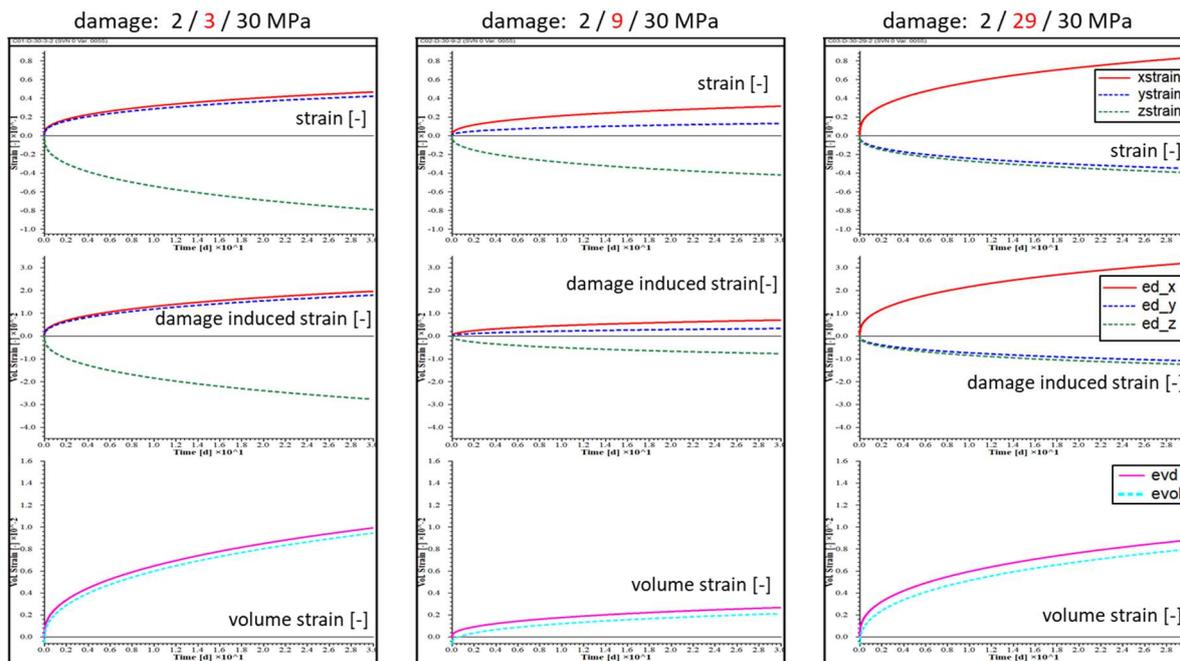


Abbildung 4-26: Ergebnisse zu den Würfelberechnungen C01 (links) bis C03 (rechts)

Die Berechnungen C04 bis C06 beinhalten nun zusätzlich zur Schädigungsphase auch eine Verheilungsphase. Die Schädigungsphase wurde in allen drei Berechnungen gleich gehalten, sodass der Einfluss der Spannungsgeometrie auf die Verheilung untersucht werden konnte.

Abbildung 4-27 zeigt analog zu Abbildung 4-26 die Ergebnisse der drei Berechnungen C04 bis C06. Für die Schädigungsphase sind für alle Berechnungen, entsprechend der gleichen Bedingungen, jeweils identische Verläufe erkennbar. Aufgrund der gleich großen Belastung in x- und y-Richtung liegen die Kurven für die entsprechenden Verzerrungskomponenten und die Komponenten der schädigungsinduzierten Verzerrungen für diese Phase übereinander. In der Verheilungsphase wurde die aufgebrachte Belastung in x-Richtung unterschiedlich eingestellt. Die Rückbildung der Komponenten der schädigungsinduzierten Verzerrungen (damage induced strain) ist für die Versuche C04 und C05 aufgrund der Skalierung kaum zu erkennen. Dass jedoch eine Rückbildung stattgefunden hat, kann auch dem jeweils untersten Graphen entnommen werden. Mit der deutlich höheren Spannung von 20 MPa in x-Richtung bei C04 stellt sich wie erwartet eine höhere Rückbildung der Schädigung ein als bei 10 MPa. Bei der Berechnung C06 liegt sogar eine erneute Schädigungsphase vor. Zwar reduziert sich die Komponente in y-Richtung, jedoch nimmt die Komponente in x-Richtung stärker zu, sodass sich dies in der Summe als zusätzliche Schädigung niederschlägt.

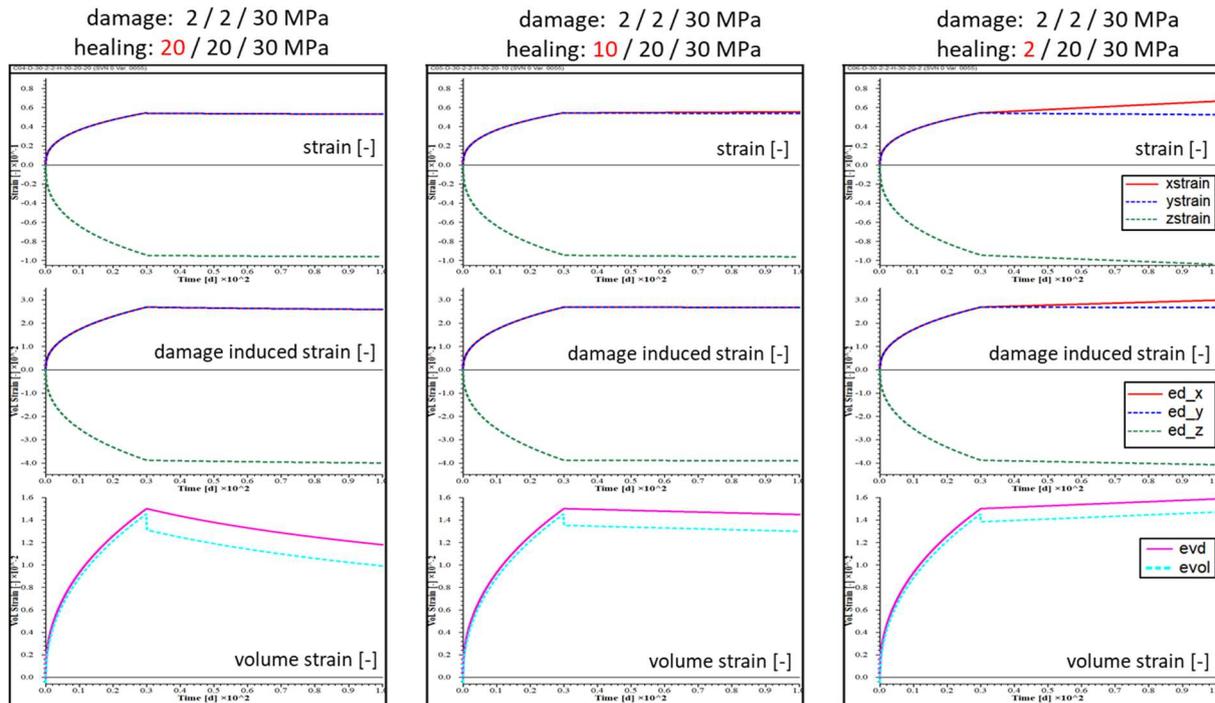


Abbildung 4-27: Ergebnisse zu den Würfelberechnungen C04 (links) bis C06 (rechts)

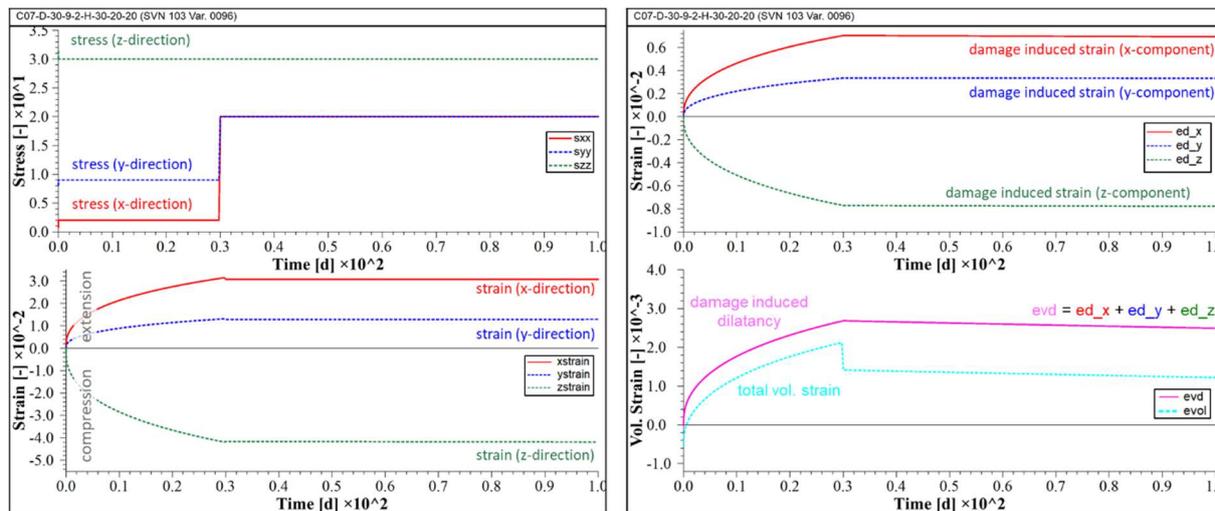


Abbildung 4-28: Ergebnisse zur Würfelberechnung C07

In den Berechnungen C07 und C08 wurde das Spannungsregime in der Schädigungsphase variiert, während die Verheilungsphase gleich modelliert wurde. Zusätzlich wurde für die Berechnung C08 der Belastungswechsel über eine 18-tägige Rampe ($\Delta\sigma_x = 1 \text{ MPa/Tag}$) aufgebracht, um die Auswirkungen dieser Simulationsart zu prüfen. Abbildung 4-28 fasst die Ergebnisse für die Berechnung C07 zusammen. Links sind die Spannungen sowie die daraus entstehenden Verzerrungen in x-, y- und z-Richtung zu erkennen. Nach der Extension innerhalb der Schädigungsphase in x- und y-Richtung folgt in x-Richtung eine leichte Kompression innerhalb der Verheilungsphase. Die Rate der Verzerrungen ist negativ. In y-Richtung bleibt es hingegen weiterhin bei einer positiven Rate der Verzerrungen. Ursache dürfte der geringere Spannungsdeviator zwischen Schädigungs- und Verheilungsphase sein. In z-Richtung erfolgt durch die nicht geänderte Spannung weiterhin Kompression, jedoch mit einer geringeren Rate, da die deviatorische Belastung deutlich geringer ist. Die x- und y-Komponente der schädigungsinduzierten Verzerrungen nehmen beide etwas ab, wobei die Rate der x-Komponente etwas größer ausfällt. Durch die vormals größere Schädigung in diese Richtung kann in diese Richtung eine größere Rückbildung

stattfinden. Insgesamt kommt es zur Rückbildung der Schädigungsvolumendehnung, wie aus dem unteren rechten Graphen erkennbar ist.

Innerhalb der Berechnungsvariante C08 wurde der Belastungswechsel zwischen Schädigungs- und Verheilungsphase einmal instantan und einmal über eine Rampe simuliert. Die Ergebnisse zeigen Abbildung 4-29 und Abbildung 4-30, wobei links die Ergebnisse für den instantanen Lastwechsel zu sehen sind. In beiden Fällen dauert die Schädigungsphase 30 Tage, die Kurven für die Verzerrungen, die schädigungsinduzierte Volumendehnung und deren einzelnen Komponenten unterscheiden sich somit für diese Phase nicht. Verglichen mit der Berechnungsvariante C07 zeigt sich wie erwartet eine reine Extension in x-Richtung, während in y- und z-Richtung Kompression stattfindet. Durch die hohe Differenz der Spannungen zwischen x- und y-, sowie x- und z-Richtung kommt es einerseits zu einer sehr hohen Verformung in x-Richtung. Andererseits ist auch die x-Komponente der schädigungsinduzierten Verzerrungen deutlich höher als bei der Berechnung C07, sodass auch insgesamt die Schädigungsvolumendehnung höher ausfällt. Ursache dafür ist der Spannungszustand, der als Extensionszustand beschrieben werden kann. Für ihn liegt die Dilatanzgrenze niedriger als beim Kompressionszustand, wie er bei der Variante C07 der Fall ist, vergleiche [Gärken, 2018].

Die Unterschiede hinsichtlich der Belastungsänderung (instantan oder Rampe) sind kaum sichtbar. Daher wurde in Abbildung 4-30 eine rote Linie integriert, anhand derer sich erkennen lässt, dass durch den instantanen Lastwechsel eine geringfügig höhere Rückbildung erreicht werden kann. Dies ist letztlich auf die Dauer der Verheilungsphase zurückzuführen. Durch die Änderung der Belastung mittels Rampe wird der Spannungszustand mit hoher mittlerer Spannung und geringerer Deviatorspannung später erreicht. Insgesamt kann so nach einer Berechnungsdauer von 100 Tagen auch nur eine geringere Rückbildung erreicht werden.

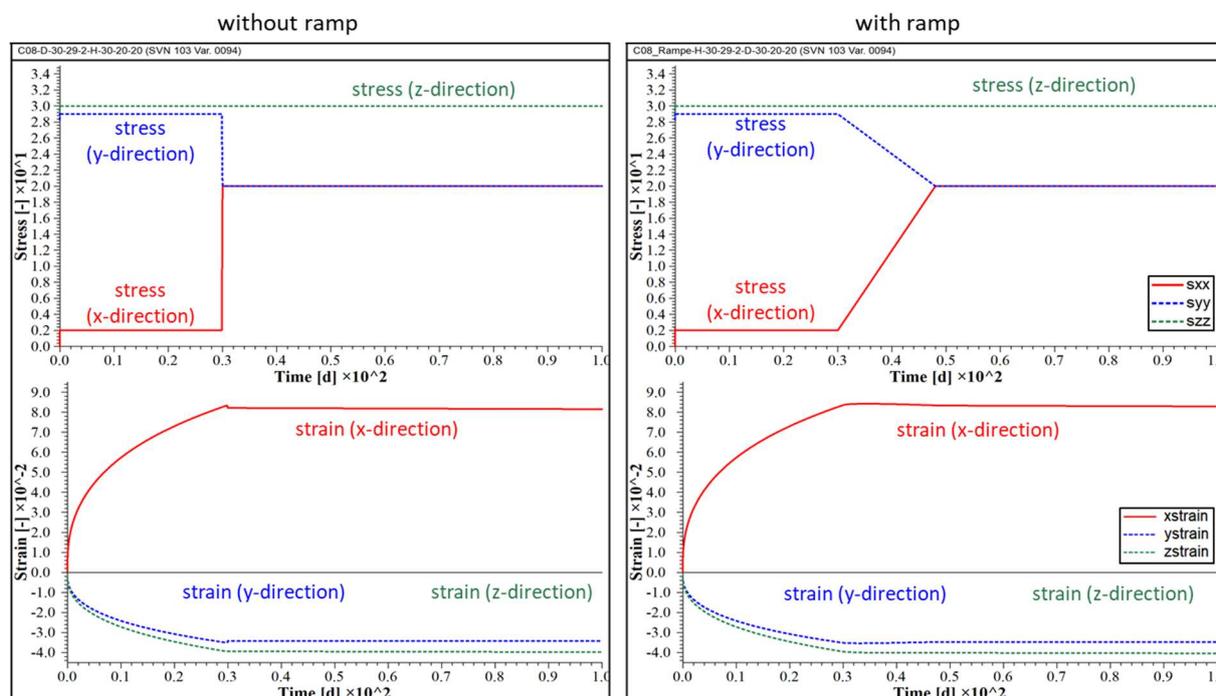


Abbildung 4-29: Ergebnisse zur Würfelberechnung C08 ohne (links) und mit Rampe (rechts) beim Belastungswechsel

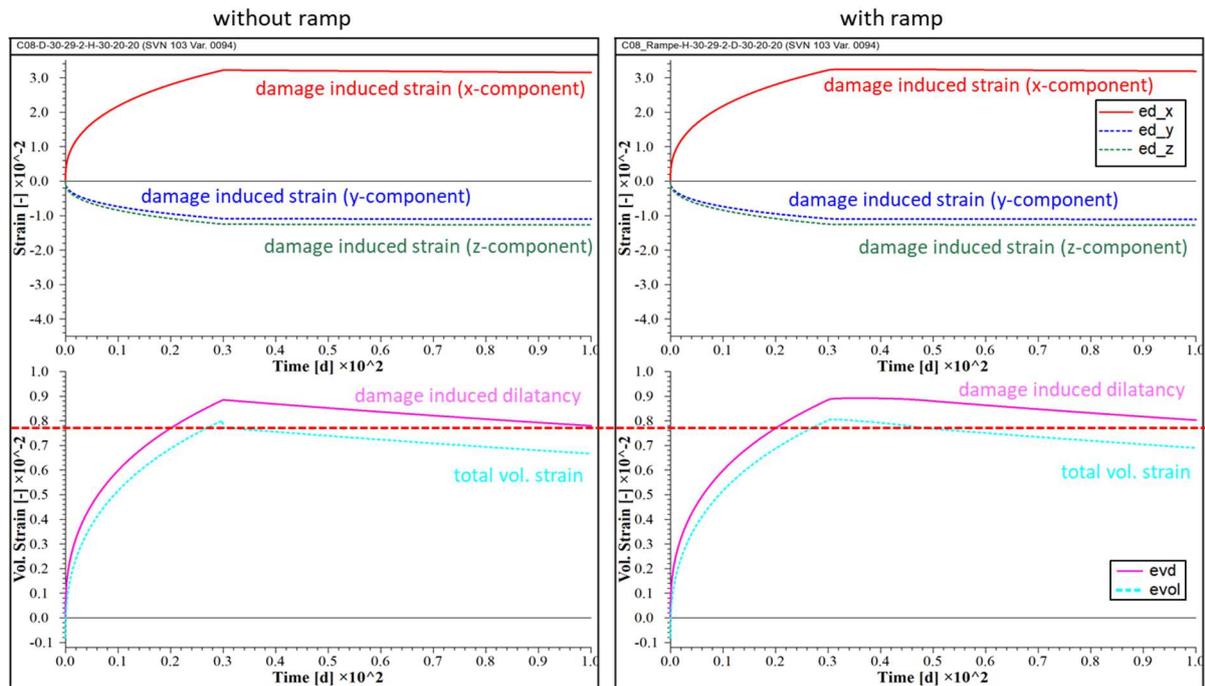


Abbildung 4-30: Ergebnisse zur Würfelberechnung C08 ohne (links) und mit Rampe (rechts) beim Belastungswechsel (2)

Die Berechnung C09 sieht zu Beginn der Berechnung eine zusätzliche Phase mit einem Spannungsregime, das keine Schädigung hervorruft, vor. Die Spannungen entsprechen der Belastung, wie sie nach der Schädigungsphase in der Phase der Verheilung gefahren wird, vergleiche Abbildung 4-31 (links oben). Wie erwartet treten in der ersten Belastungsphase somit zwar Verzerrungen auf, schädigungsinduzierte Volumenverformungen bleiben in dieser ersten Phase jedoch aus. Es kommt zu einer Stauchung in z- und einer Verzerrung in x- und y-Richtung. Für die anschließende Schädigungsphase werden vergleichbare Verzerrungen erzielt, zusätzlich tritt eine schädigungsinduzierte Verformung auf. Die anschließende Verheilungsphase geht mit einer insgesamt eher gering ausfallenden Rückbildung der Schädigung einher.

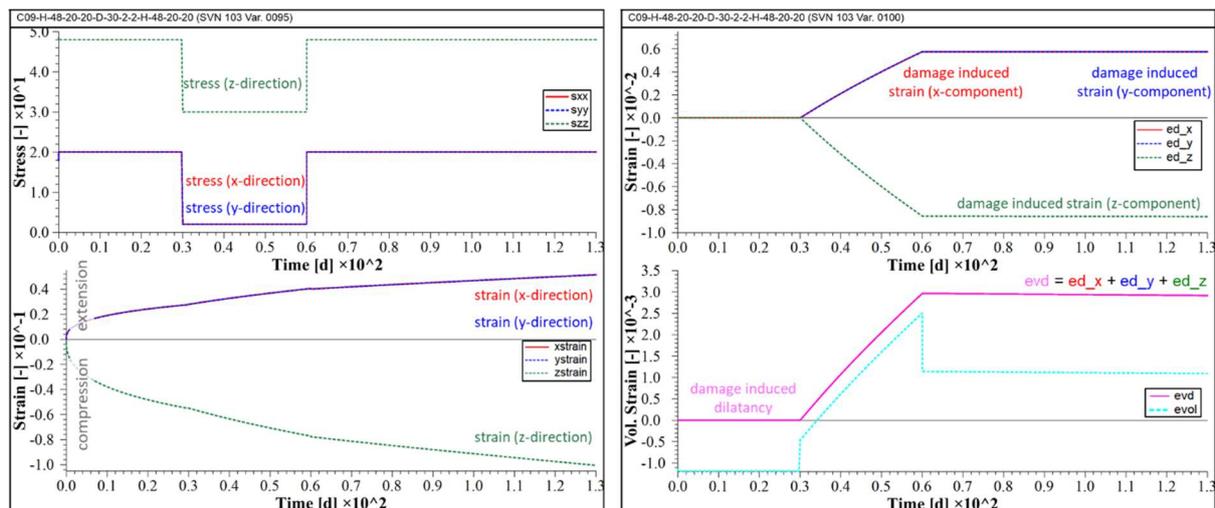


Abbildung 4-31: Berechnungsergebnisse zur Würfelberechnung C09

In den zwei letzten Berechnungen wurde nach einer gleich simulierten Schädigungsphase, eine Verheilungsphase, die einen annähernd isotropen Spannungszustand berücksichtigt betrachtet, wobei die Verheilungsphase geringfügig variiert. Während bei der Berechnung C11 die Verheilung unter isotropen Bedingungen mit 30 MPa stattfindet, ist bei der Berechnung C10 die Spannung in x-Richtung mit

29 MPa etwas niedriger und damit ein geringer Spannungsdeviator vorhanden. Durch die nur sehr geringen Unterschiede in den Randbedingungen lassen sich die Unterschiede in den Ergebnissen kaum erkennen, vergleiche Abbildung 4-32. Auch hier wurde daher mithilfe der roten Linie verdeutlicht, dass die Rückbildung der Schädigung bei Berechnung C11 höher ist. Dies ist im Wesentlichen auf die höhere mittlere Spannung, jedoch auch auf den fehlenden Deviator zurückzuführen.

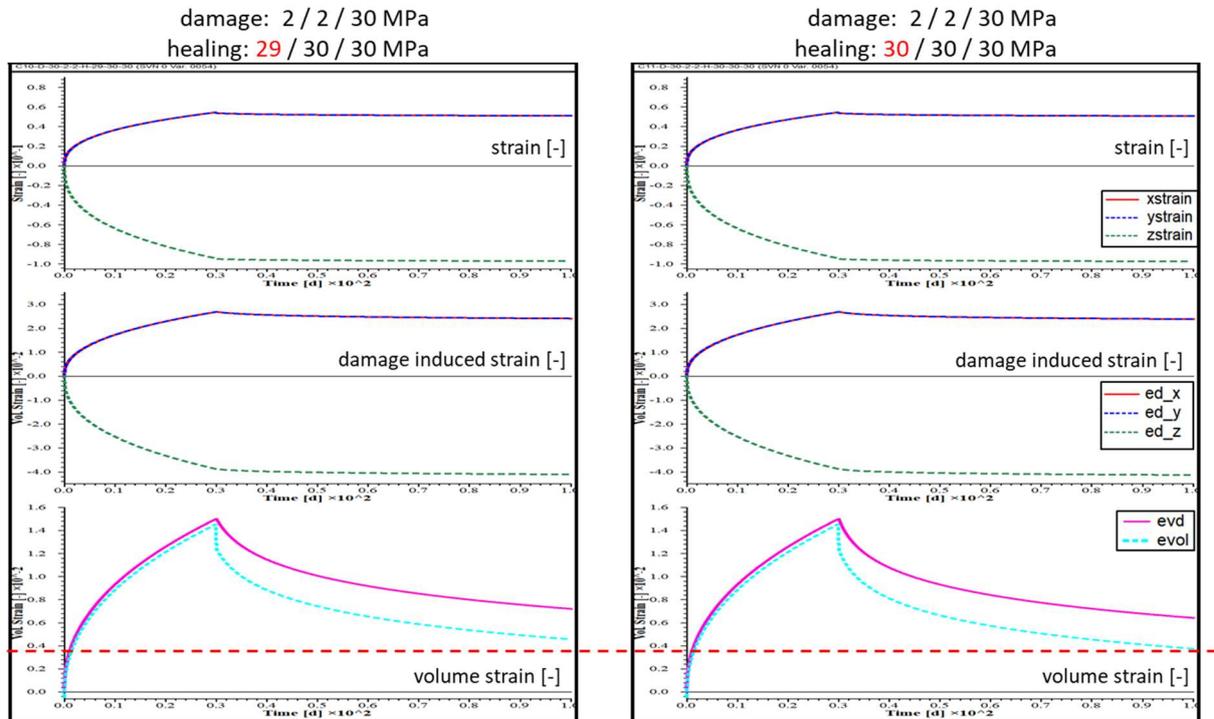


Abbildung 4-32: Ergebnisse zu den Würfelberechnungen C10 (links) und C11 (rechts)

5 AP 3 Verformungsverhalten infolge von Extensionsbelastungen

Innerhalb des Arbeitspaketes AP 3 war das Verformungsverhalten von Steinsalz infolge von Extensionsbelastungen zu betrachten. Als gemeinsame Ziele wurden das Simulieren von auf Zug belasteten Salzproben und das Prüfen der Ergebnisse auf realistische Rissstrukturen definiert. Zudem sollte die berechnete Größenordnung der Zugfestigkeit auf Plausibilität geprüft werden. Dazu erfolgten verschiedene Berechnungen, die im Folgenden inklusive ihrer Ergebnisse vorgestellt werden.

5.1 Berechnung von Spaltzugversuchen (Brazilian Test)

Der Brazilian Test oder auch Spaltzugversuch ist ein Druckversuch an scheibenförmigen Prüfkörpern, mit dem Ziel der Bestimmung der Zugfestigkeit. Zur Berechnung des Brazilian Tests erstellte IfG verschiedene Modelle, die den Partnern zur Verfügung gestellt wurden. Eine Übersicht der Modellvarianten gibt Tabelle 5-1.

Tabelle 5-1: Modellvarianten des Brazilian Tests

Modell	Lasteinleitung	Netzdichte
V1	Stahlkolben auf Probe	2 mm
V2	Stahlkolben auf Probe; Drehung des Probe nach Bruch um 30°	2 mm
V3-1	Lederkissen zwischen Stahlkolben und Probe	1 mm
V3-2	Lederkissen zwischen Stahlkolben und Probe	2 mm

In allen Modellvarianten wird eine Salzprobe (WIPP Salt) mit einem Durchmesser von 10 cm betrachtet, wobei die Netzdichte je nach Variante variiert, siehe Tabelle 5-1. Die Lasteinleitung erfolgt in den Modellen V1 und V2 über Stahlkolben mit einem Durchmesser von 1 cm. In den Varianten V3-1 und V3-2 wird ein Lederkissen zwischen Stahlkolben und Probe berücksichtigt, die Breite der Lederkissen beträgt 1 cm. Die Lederkissen haben nur punktuell Kontakt mit der Probe, während die Stahlkolben über ihre gesamte Breite Kontakt mit der Probe aufweisen. Die Probe wird mit einer konstanten Geschwindigkeit von -0.075 m/d belastet. Die Berechnungen erfolgen im ebenen Verzerrungszustand.

Im Folgenden werden die Ergebnisse hinsichtlich der minimalen und maximalen Hauptspannungen, der Hauptspannungsrichtungen und der volumetrischen Dehnung zu unterschiedlichen Zeitpunkten exemplarisch dargestellt und erläutert.

5.1.1 Berechnungsergebnisse Modell V1

Abbildung 3-1 zeigt die Trajektorien der Hauptspannungen (gefärbt nach der Größe der minimalen Hauptspannungen) sowie die Volumendehnung für die Zeitpunkte 45, 60 und 100 Sekunden nach Versuchsstart für das Modell V1. Nach 45 Sekunden lassen sich bereits Effekte infolge des aufgebrachtten Drucks in den Lasteinleitungsbereichen erkennen. Es bildet sich ein Druckband zwischen den beiden Einleitungspunkten aus. Eine Schädigung des Prüfkörpers hat zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht stattgefunden, wie der Plot der Volumendehnung zeigt. Zum Zeitpunkt 60 Sekunden ist die Probe bereits gebrochen. Nun hat sich ein deutliches Druckband ausgebildet, in dessen Mitte der Riss erkennbar ist. Das Salz kann hier keine Belastung aufnehmen, was die fehlenden Trajektorien belegen. In dem Plot der Volumendehnung ist der Riss in Form von Zonen mit hohen Dehnungen zu erkennen. In der Abbildung lässt sich außerdem erkennen, dass sich bereits weitere kleinere Parallelrisse ausbilden. Das

Nachbruchverhalten zeigt sich in den Abbildungen für den Zeitpunkt 100 Sekunden nach Versuchsstart. Die Umlagerung der Spannungen aufgrund des Bruchs sowie die fortschreitende Rissentwicklung sind deutlich erkennbar.

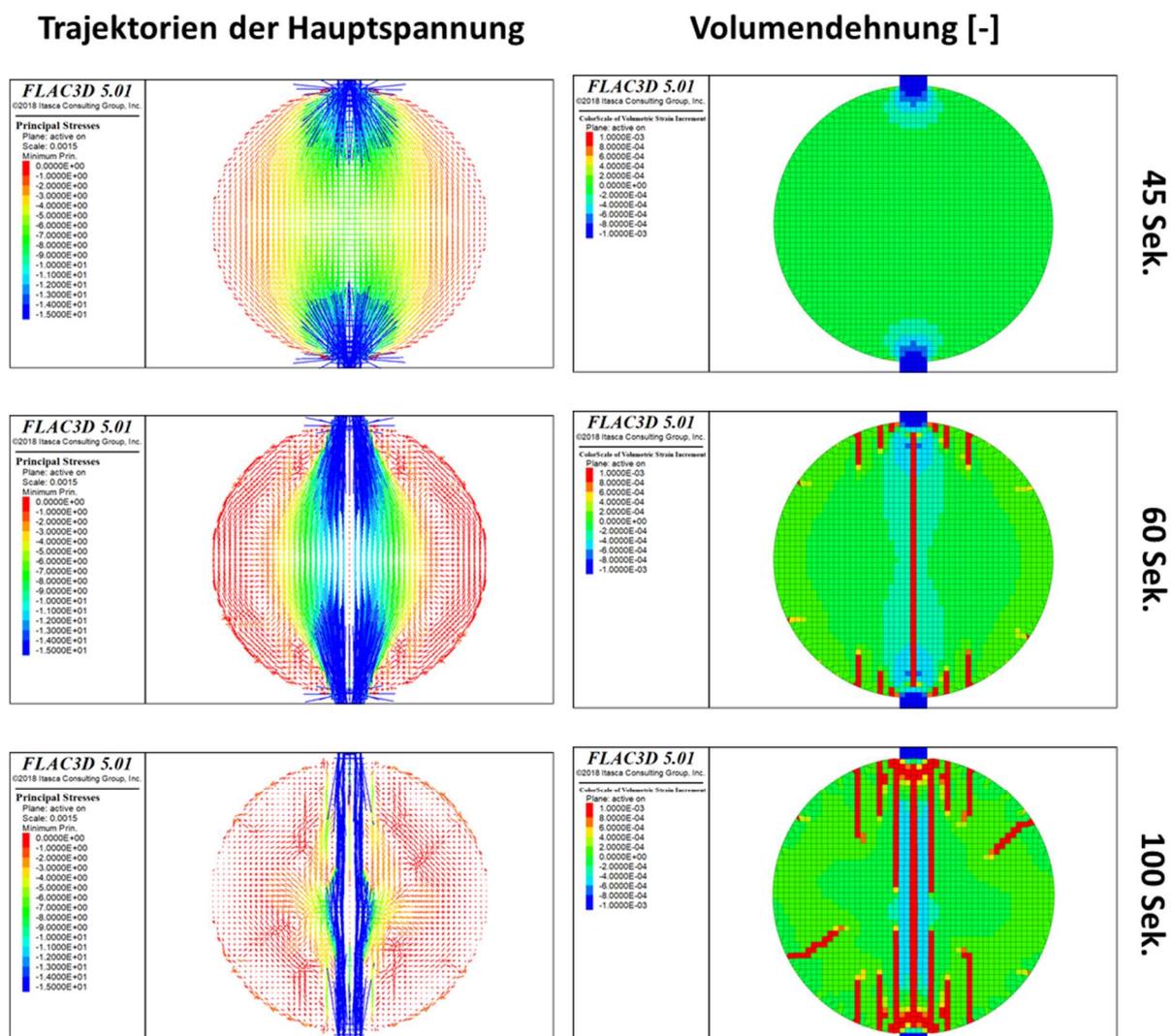


Abbildung 5-1: Berechnungsergebnisse des Modells V1; links: Trajektorien der Hauptspannung (farbliche Skalierung nach minimaler Hauptspannung); rechts: Volumendehnung; oben: Zeitpunkt: 45 Sek.; Mitte: Zeitpunkt: 60 Sek.; Unten: 100 Sek.

5.1.2 Berechnungsergebnisse Modell V2

Das Modell, das der Variante V2 zugrunde liegt, entspricht im Wesentlichen dem Modell der Variante V1. Im Unterschied zu der Variante V1 wird in der Modellvariante V2 die Probe nach 60 Sekunden Laufzeit im Uhrzeigersinn um 30° gedreht, Spannungen und Verschiebungen werden auf null zurückgesetzt, sodass nur die bereits entstandenen Schädigungen verbleiben. Die Probe wird nun somit nicht mehr parallel zum entstandenen Riss belastet. Stattdessen liegt der Spaltbruch in Scherrichtung. Die Ergebnisse der Berechnung können der Abbildung 5-2 entnommen werden.

Zehn Sekunden nach der Rotation des Prüfkörpers (70 Sek. nach Versuchsstart) sind bereits Spannungsumlagerungen im Salz zu erkennen. Der in den vorher gegangenen Berechnungsschritten entstandene Riss ist deutlich erkennbar. An den folgenden Zeitpunkten (90 und 110 Sek.) lässt sich an den Trajektorien das Scherband, welches der Riss nun darstellt erkennen. Ebenso zeigt sich die dazu passende Volumendehnung.

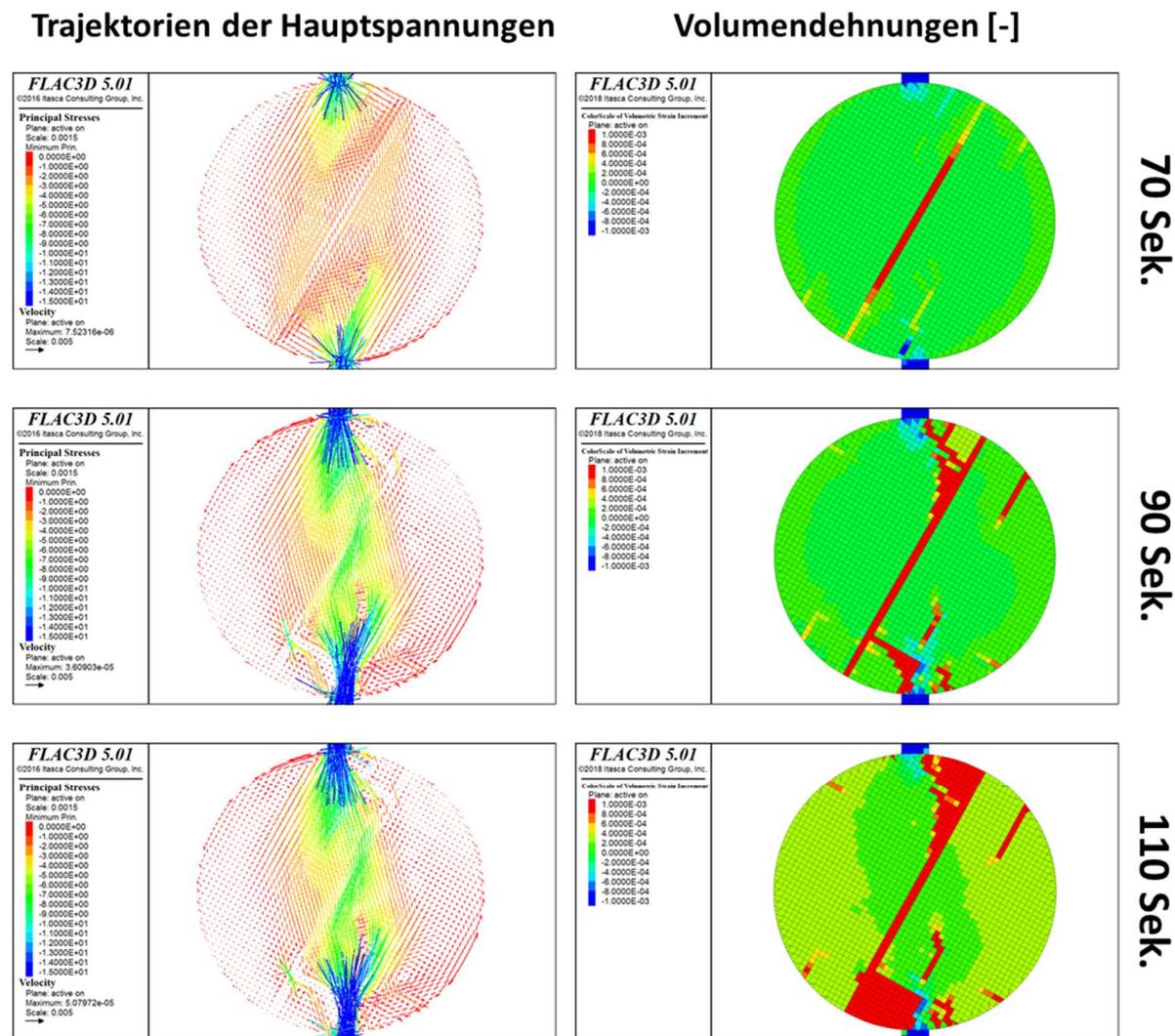


Abbildung 5-2: Berechnungsergebnisse des Modells V2; links: Trajektorien der Hauptspannung (farbliche Skalierung nach minimaler Hauptspannung); rechts: Volumendehnung; oben: Zeitpunkt: 70 Sek.; Mitte: Zeitpunkt: 90 Sek.; Unten: 110 Sek.

5.1.3 Berechnungsergebnisse Modell V3

Für das Modell V3, das eine andere Lasteinleitung in die Salzprobe (Lederkissen) vorsieht, wurden zudem die Netzdichte mit 1 mm und 2 mm variiert. Durch diese andere Form der Lasteinleitung kommt es beim Modell V3 deutlich später zum Zugbruch. Dieser tritt erst nach etwa 100 (Netzdichte 1 mm, V3-1) bzw. 120 Sekunden (Netzdichte 2 mm, V3-2) ein, vergleiche Abbildung 5-3.

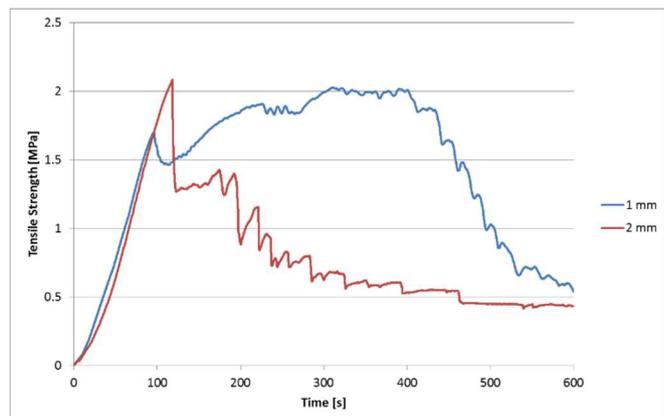


Abbildung 5-3: Entwicklung der Zugfestigkeit über die Zeit bei der Berechnung des Modells V3

Allein der Bruchzeitpunkt ist durch die Netzdichte beeinflusst. Dies zeigen auch Vergleiche der minimalen Hauptspannungen und der Zugfestigkeit innerhalb der Salzprobe, siehe Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5. Die feinere Netzdichte von 1 mm zeigt deutlich genauere und somit bessere Ergebnisse und ist klar zu bevorzugen.

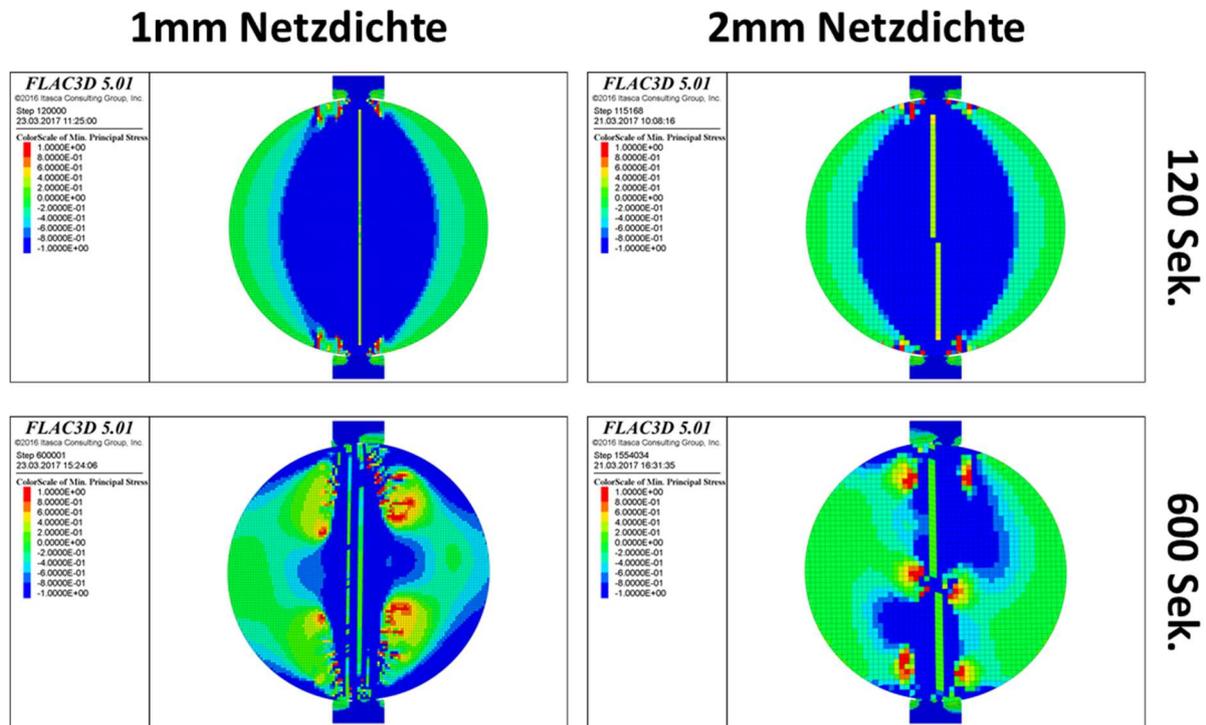


Abbildung 5-4: Minimale Hauptspannungen beim Modell V3

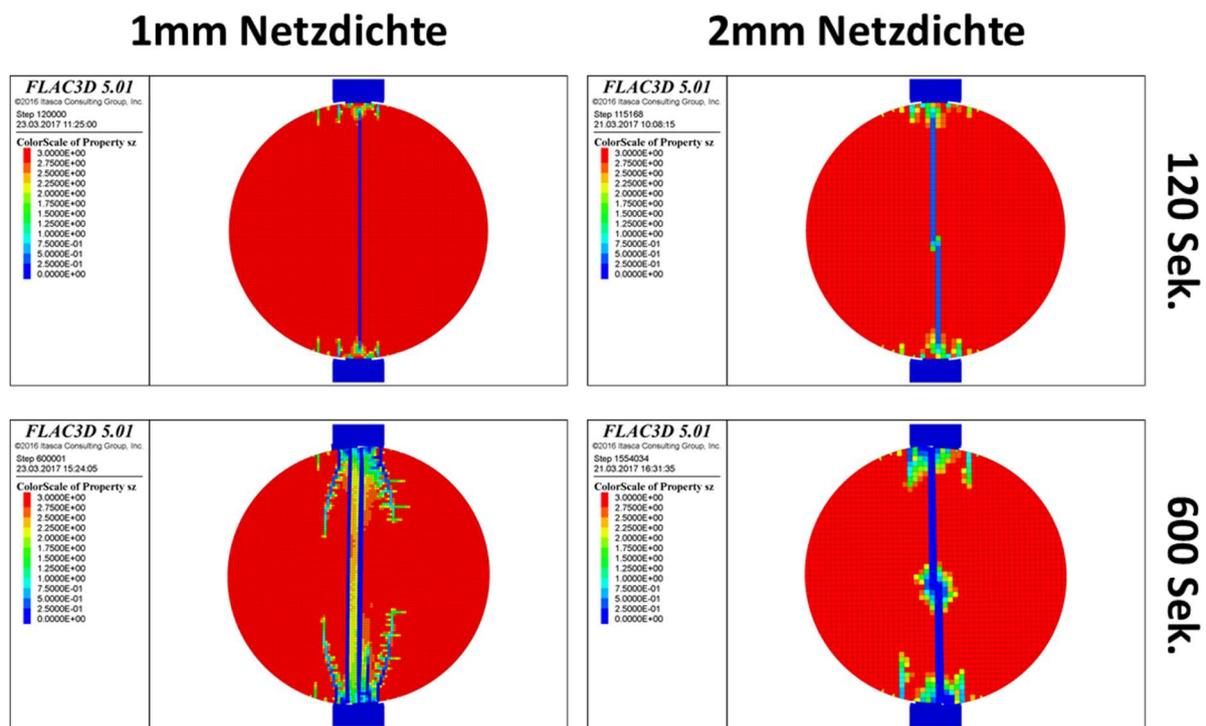


Abbildung 5-5: Zugfestigkeit beim Modell V3

5.2 Berechnung eines Biegebalkens

Neben dem Spaltzugversuch wurde das Verhalten unter Zugbelastung auch über Simulationen an einem Biegebalken untersucht. Die berechneten Varianten lassen sich Tabelle 5-2 entnehmen.

Tabelle 5-2: Modellvarianten des Biegebalkens

Modell	Belastung	Lasteinleitung
B1	1-Punkt-Lastangriff	Indirekter Lastangriff über Stahlstreifen
B2	2-Punkt-Lastangriff	Indirekter Lastangriff über Stahlstreifen

Die Modelle wurden von TUBS erstellt und nach einer Modifikation seitens IfG (Lasteinleitung über zusätzliche Zonen, statt direkte Lasteinleitung) den übrigen Partnern zur Verfügung gestellt. Der Biegebalken weist eine Länge von 600 mm auf. Breite und Tiefe betragen 150 mm. Auflagerung und Ort der Lasteinleitung wurden entsprechend der Abbildung 5-6 festgelegt. Für beide Modelle wurde eine weggesteuerte Belastung von 0,486 m/d gewählt. Das Modell ist mit einer Netzdichte von 2 mm erstellt worden und besteht aus rund 22.500 Zonen. Der Salzprobe wurden die Parameter WIPP Salt zugewiesen.

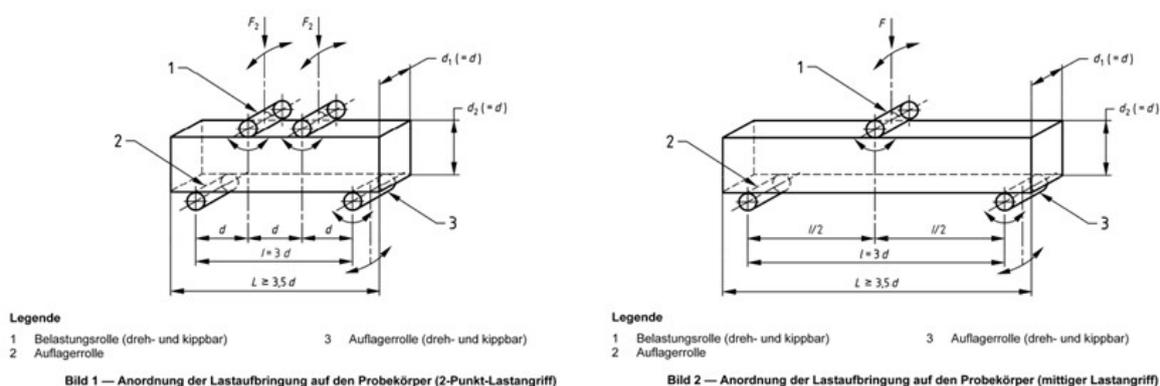


Abbildung 5-6: Anordnung der Lastaufbringung auf den Probekörper, aus (Norm DIN EN 12390-5)

Die Ergebnisse der minimalen und maximalen Hauptspannung, der Volumendehnung sowie der Zugfestigkeit zeigen Abbildung 5-7 bis Abbildung 5-9 für Modell B1 und Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-12 für Modell B2. Jede Abbildung entspricht einem Berechnungszeitpunkt (10, 50, 200 Sekunden).

Das Modell B1 berücksichtigt einen 1-Punkt-Lastangriff. Bereits nach rund 7 Sekunden tritt ein Riss in dem Salz Probekörper auf. Erkennen lässt sich die Ausbildung eines Risses in Abbildung 5-7, im mittleren Bereich der Probe. Zum Zeitpunkt 10 Sekunden liegt die Zugfestigkeit des Salzes in diesem Bereich bei 0 MPa. Die Spannungsspitzen befinden sich im Bereich der eingeleiteten Kraft und der Auflagerpunkte. Im weiteren Verlauf, siehe Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9, konzentrieren sich die Spannungen weiter an den Einleitungs- und Auflagerpunkten. Der Riss wird größer, wie an der Volumendehnung zu erkennen ist.

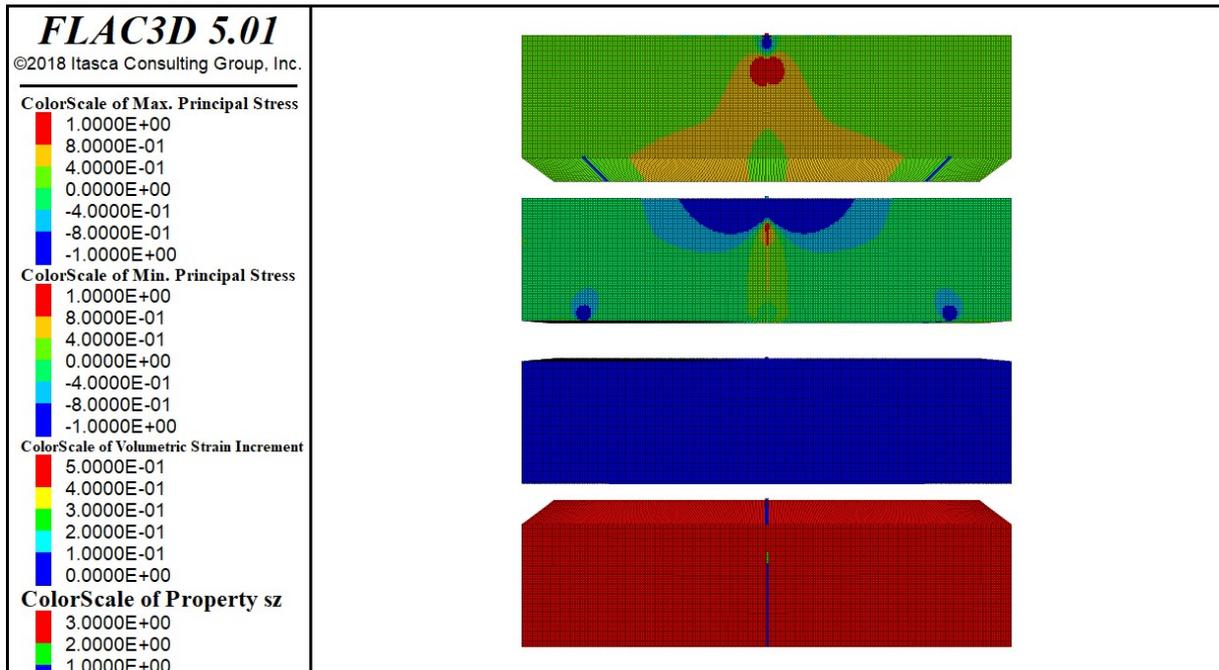


Abbildung 5-7: Berechnungsergebnisse für das Modell B1 nach 10 Sekunden

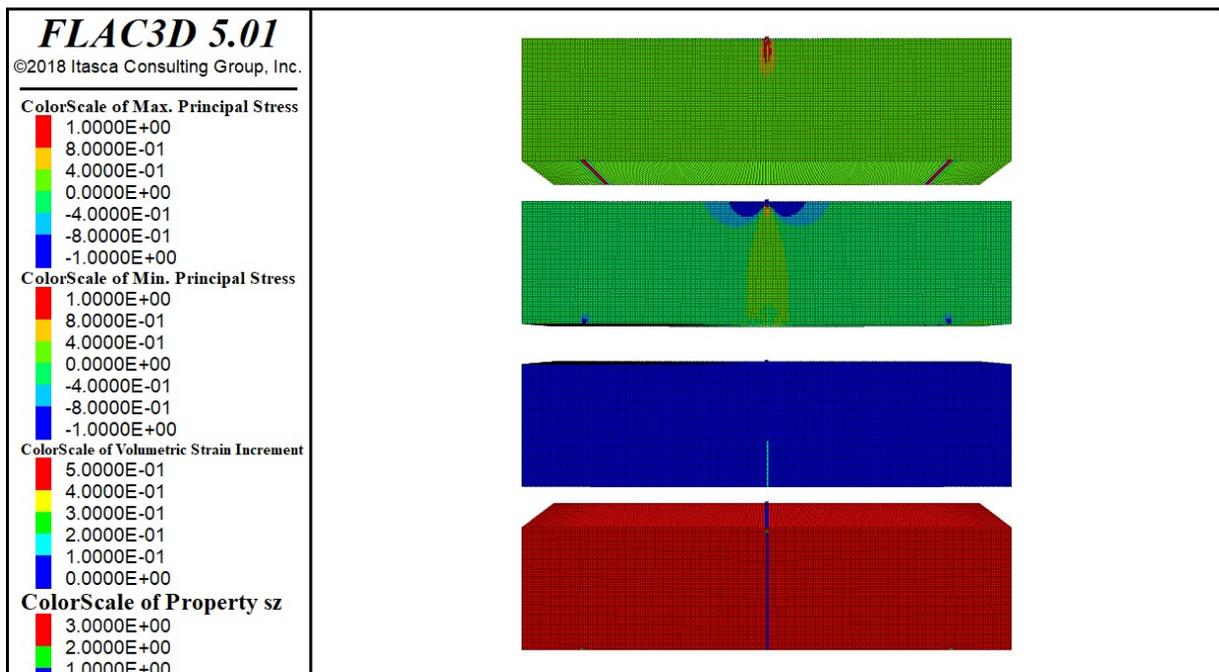


Abbildung 5-8: Berechnungsergebnisse für das Modell B1 nach 50 Sekunden

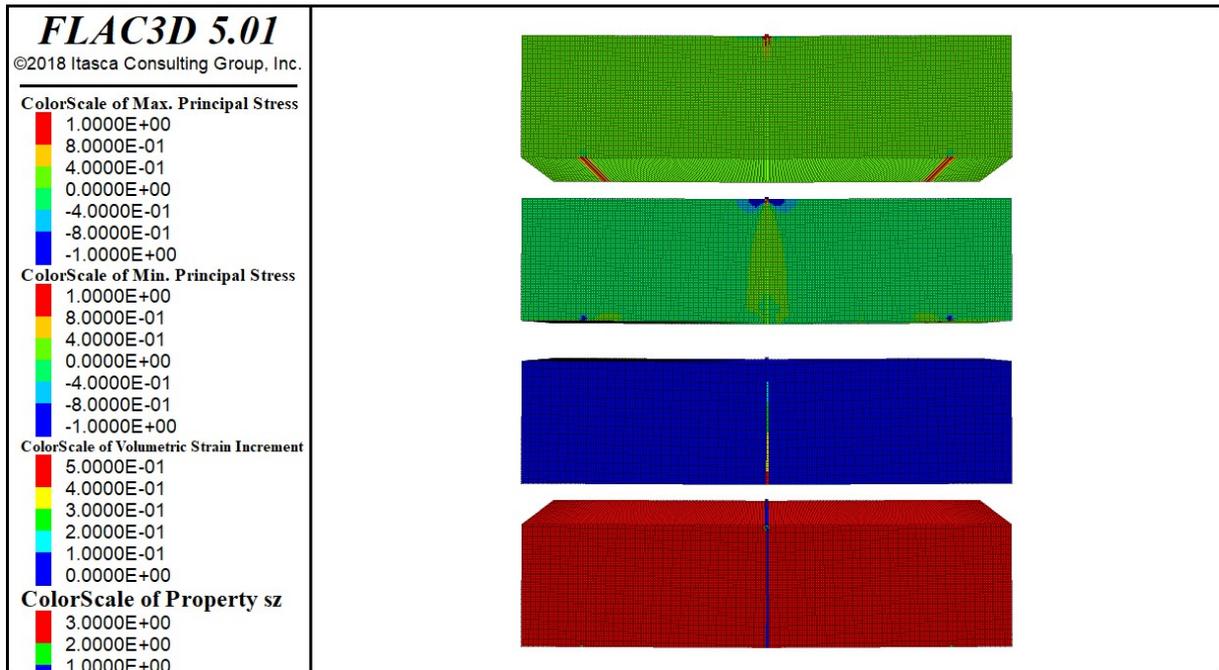


Abbildung 5-9: Berechnungsergebnisse für das Modell B1 nach 200 Sekunden

Im Modell B2 erfolgt die Lasteinleitung über zwei Punkte. Auch hier tritt ein erster Riss an der Unterseite des Balkens nach wenigen Sekunden auf. Er liegt zwischen den Lasteinleitungspunkten

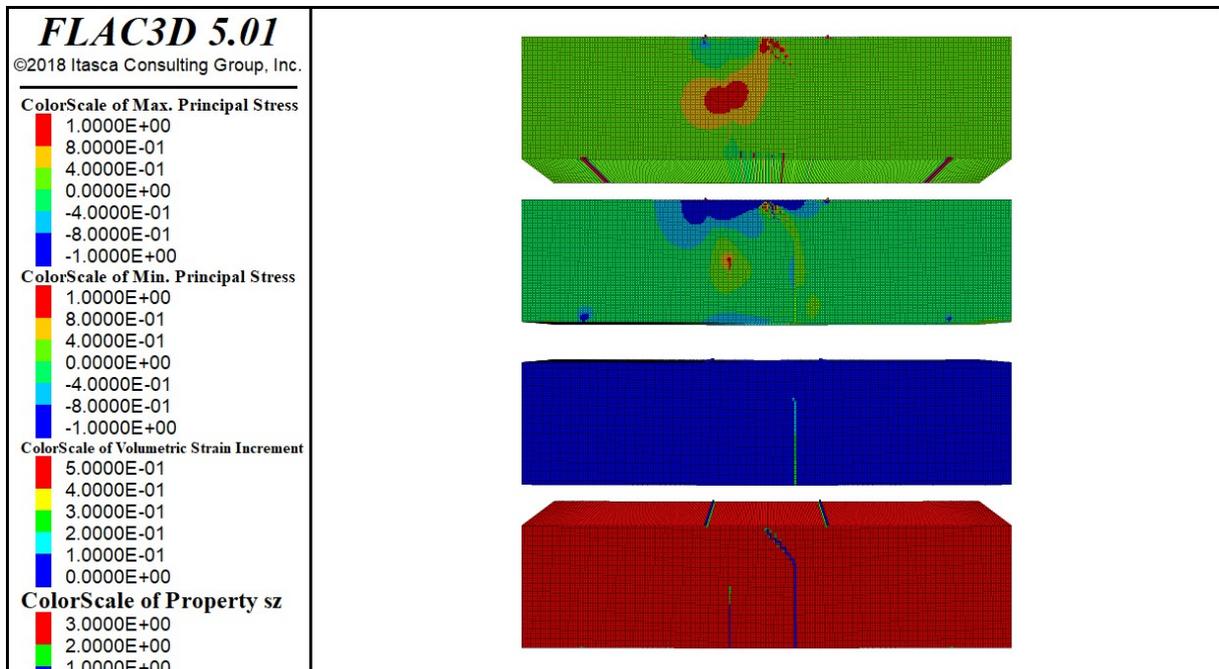


Abbildung 5-10: Berechnungsergebnisse für das Modell B2 nach 10 Sekunden

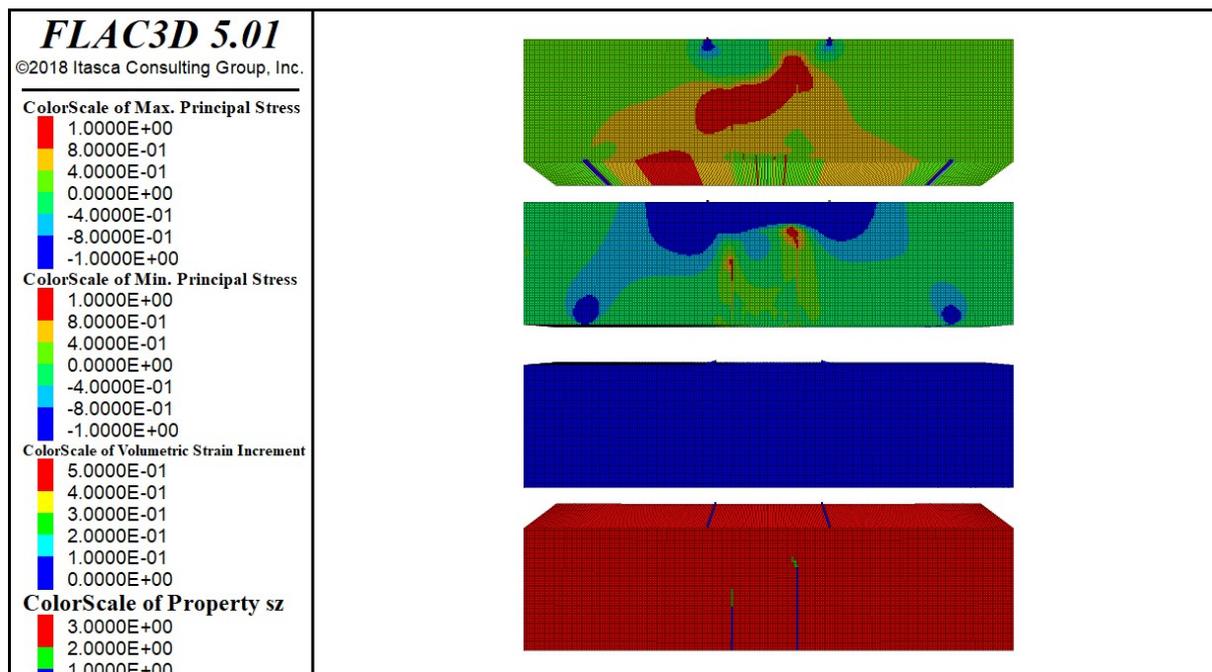


Abbildung 5-11: Berechnungsergebnisse für das Modell B2 nach 50 Sekunden

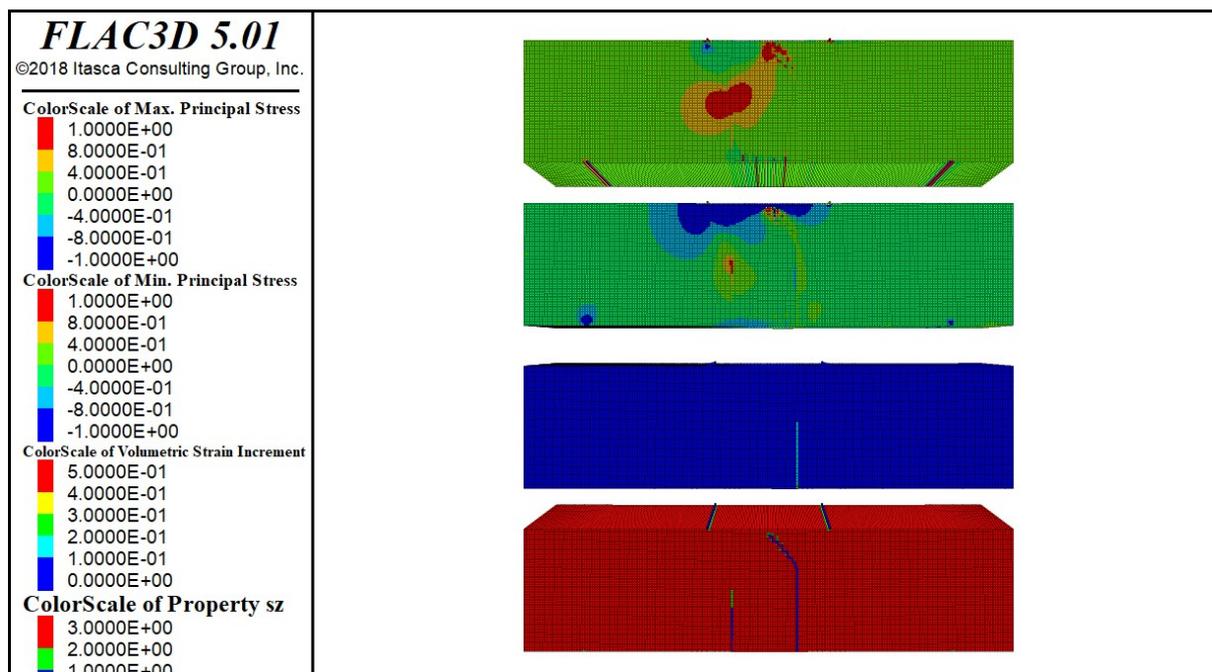


Abbildung 5-12: Berechnungsergebnisse für das Modell B2 nach 80 Sekunden

Zusätzlich wurden an dem Modell B2 unterschiedliche minimale Zeitschrittweiten (Δt_{\min}) untersucht. Eine Zusammenstellung der Berechneten Werte der Zugfestigkeit für den Zeitpunkt 50 Sekunden für unterschiedliche Zeitschrittweiten zeigt Abbildung 5-13. Eindeutig lassen sich Unterschiede in der Rissentstehung und Entwicklung feststellen. Während die Rissentwicklung bei großen Zeitschrittweiten symmetrisch verläuft, zeigt sich ab einer Zeitschrittweite von $1e-5$ s eine asymmetrische Entwicklung. Die besten Ergebnisse werden mit einer minimalen Zeitschrittweite von $1e-5$ s erzielt. Zu erkennen ist dies an einer Betrachtung der vertikalen Spannungen in den Zonenreihen in der Mitte und an der Unterkante des Balkens. Sie stimmen für $\Delta t_{\min} = 1e-5$ s am besten überein, vergleiche Abbildung 5-14.

Allerdings ist der hohe Rechenaufwand durch kleine Zeitschrittweiten bei der Wahl der Zeitschrittweite zu berücksichtigen. Letztendlich muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit der Ergebnisse und Rechenaufwand getroffen werden. Neben der Zeitschrittweite werden die Ergebnisse außerdem durch die weiteren zu definierenden Parameter der Zeitschrittsteuerung beeinflusst. Es wären also neben Δt_{\min} auch die Faktoren der Zeitschritterhöhung und -senkung zu betrachten. Abschließend bleibt zu erwähnen, dass die numerische Berechnung mittels Finite Differenzen sowie Finiten Elementen nicht für die Simulation von Rissentstehung und Entwicklung ausgelegt ist. Für diese Problematiken wurden und werden spezielle Programme wie die Berechnung mittels Diskreten Elementen entwickelt.

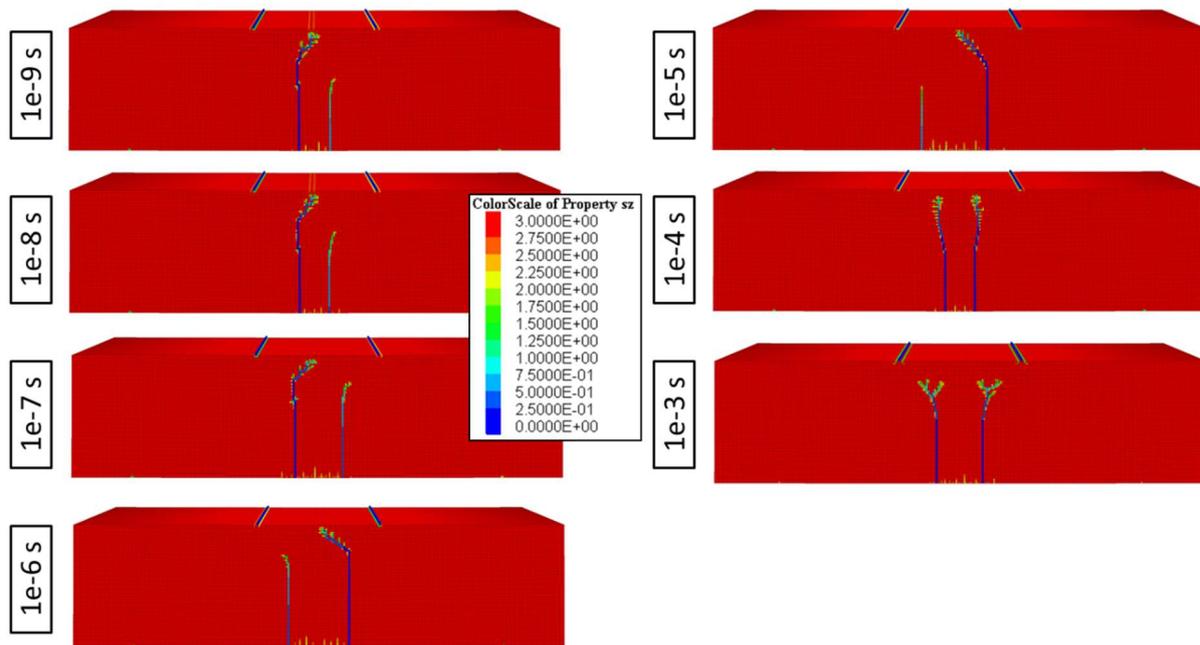


Abbildung 5-13: Berechnete Zugfestigkeit des Modells B2 nach 50 Sekunden für unterschiedliche minimale Zeitschrittweiten

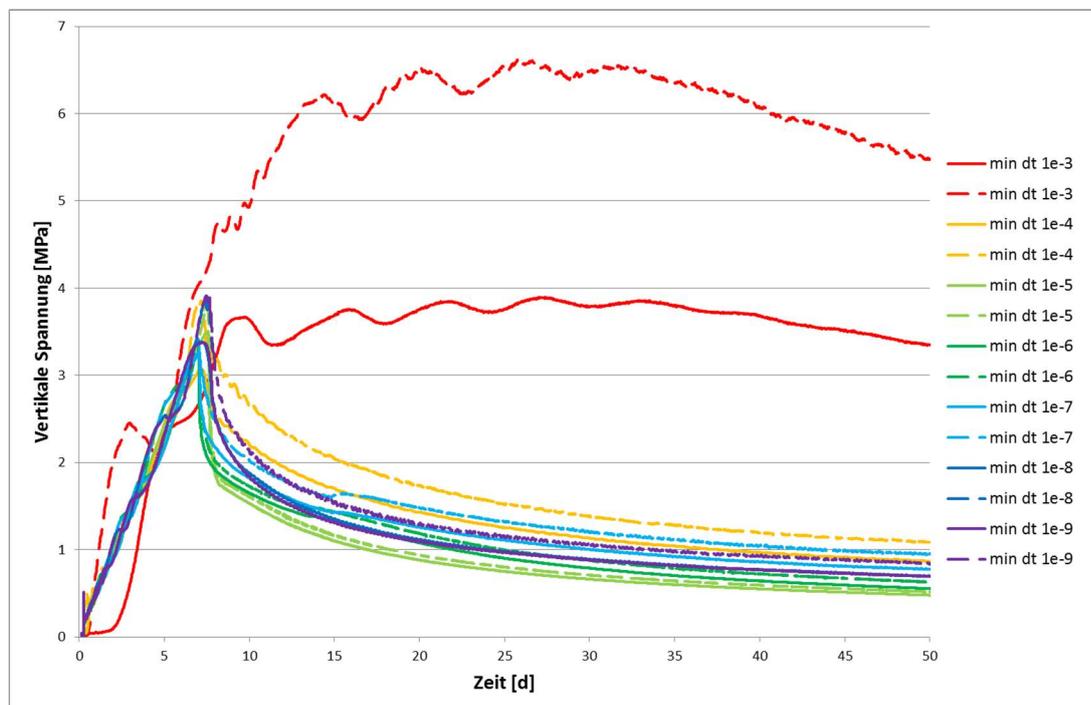


Abbildung 5-14: Vertikale Spannungen in der Mitte und an der Unterseite des Balkens über die Zeit in Abhängigkeit der minimalen Zeitschrittweite

5.3 Berechnung des Versuchs Heated Free Convergence Probe (HFCP)

Der im Joint Project III (JP III) berechnete Versuch Heated Free Convergence Probe (HFCP) wurde in WEIMOS erneut berechnet, mit dem Augenmerk auf die Auswertung der Schädigung durch Zugversagen. Bei dem Versuch handelt es sich um ein in der Asse abgeteufte, 231 m tiefes Bohrloch, in welches ein Erhitzer abgelassen wurde. Dieser erhitzte das umgebende Gebirge mit einer Leistung von 6.000 W. Während des Versuches wurde die Konvergenz des Bohrlochs infolge des einsetzenden Kriechprozesses gemessen. Nach 19 Tagen hatte sich der 4 cm breite Spalt zwischen Gebirge und Erhitzer geschlossen. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Versuch beendet. Die Erläuterungen zum Versuchsaufbau und den damaligen Berechnungen können [Lowe und Knowles, 1989] und [Missal, Gärken und Stahlmann, 2016b] entnommen werden.

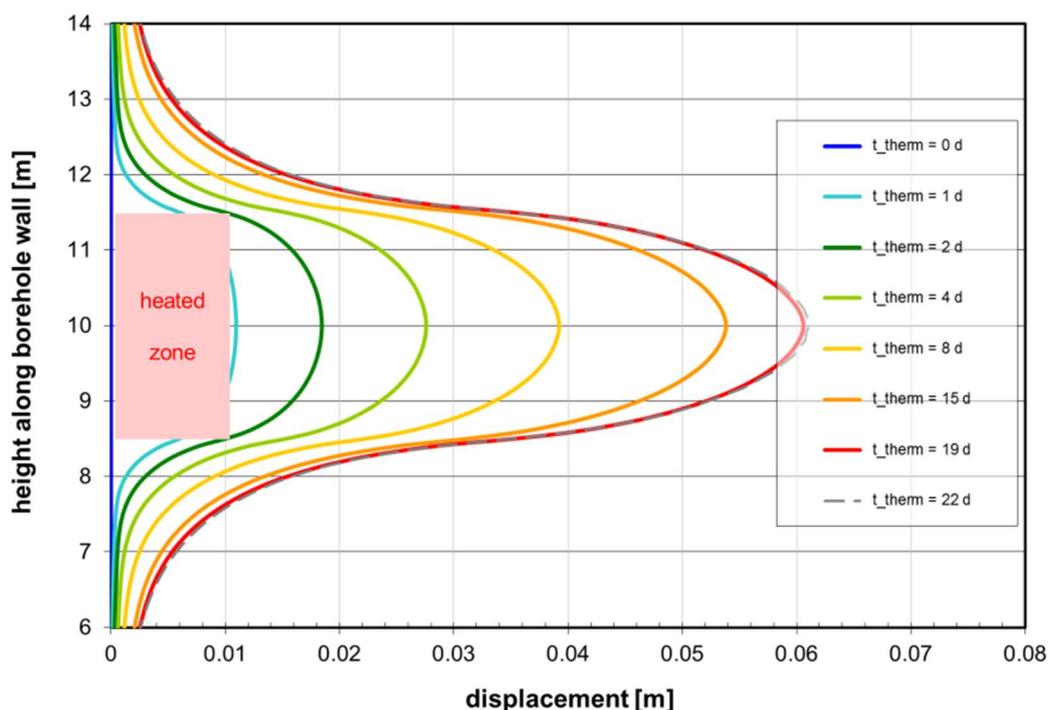


Abbildung 5-15: Verschiebung der Bohrlochkontur zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Abbildung 5-15 zeigt die mit dem Stoffmodell *TUBSsalt* berechnete Verschiebung der Bohrlochkontur zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Versuchs. Über die Zeit steigt die Verschiebung aufgrund des anhaltenden Kriechprozesses, ausgelöst durch die erhöhte Temperatur. Nach 19 Tagen ist über beinahe den gesamten erhitzten Bereich eine Verschiebung von mindestens 4 cm aufgetreten. Diese Verschiebungen in das Bohrloch hinein führen zu Zugspannungen in der Wandung und können dort, je nach Höhe des Spannungsregimes zu Schädigungen führen. Abbildung 5-16 zeigt neben der berechneten Zugfestigkeit (links) auch die aufgetretene Schädigungsvolumendehnung (rechts) im Salz. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Bereich des Bohrlochs die Zugfestigkeit des Salzes stark abgenommen hat. Ebenso lassen sich kongruent zum Verlust der Zugfestigkeit die Schädigungsvolumendehnungen beobachten. Dies lässt den Rückschluss zu, dass die entstandenen Schädigungen auf Zugversagen zurückzuführen sind. Die Risse verlaufen wie erwartet senkrecht zur Bohrlochwandung.

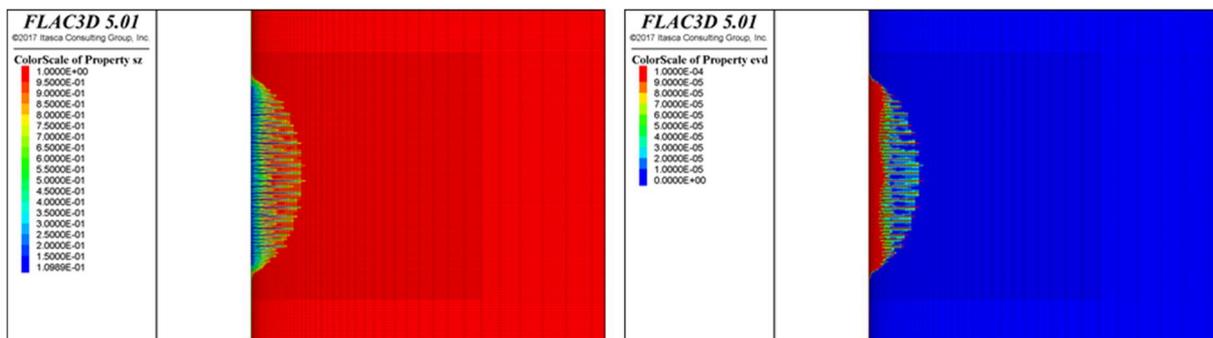


Abbildung 5-16: Berechnete Zugfestigkeit (links) und Schädigungsvolumendehnung (rechts) beim HFCP-Versuch

5.4 Berechnung des Modells Room D

Neben dem HFCP-Versuch wurde auch eine weitere Simulation aus dem JP III unter Betrachtung des Zugversagens erneut berechnet. Hierbei handelt es sich um die in der WIPP Site aufgefahrene Versuchsstrecke, die Room D genannt wird. Die Strecke befindet sich in einer Teufenlage von 646 m in flach gelagerten Schichten aus Clean und Argilleoaceous Salt. Die Schichten sind von Ton-, Anhydrit- und Polyhalitschichten durchzogen. Die Strecke weist Abmessungen von 93,3 m Länge, 5,5 m Breite und 5,5 m Höhe auf. Weitere Informationen zum Modell sind (Missal et al. 2016) zu entnehmen. Im Gegensatz zum JP III wurde das Modell mit abgerundeten Ecken des Hohlraumes berechnet.

Abbildung 5-17 zeigt die aufgetretene Schädigungsvolumendehnung in der Hohlraumwandung für unterschiedliche Zeitpunkte. Es ist zu erkennen, dass diese mit weiterer Offenhaltung wie erwartet zunimmt und sich die Auflockerungszone weiter in das Gebirge hinein entwickelt. Im Bereich der Anhydritschicht bleibt die Schädigung aus. Der Übergang wurde ohne ein Interface modelliert, ein Gleiten auf der Schichtgrenze ist somit nicht möglich.

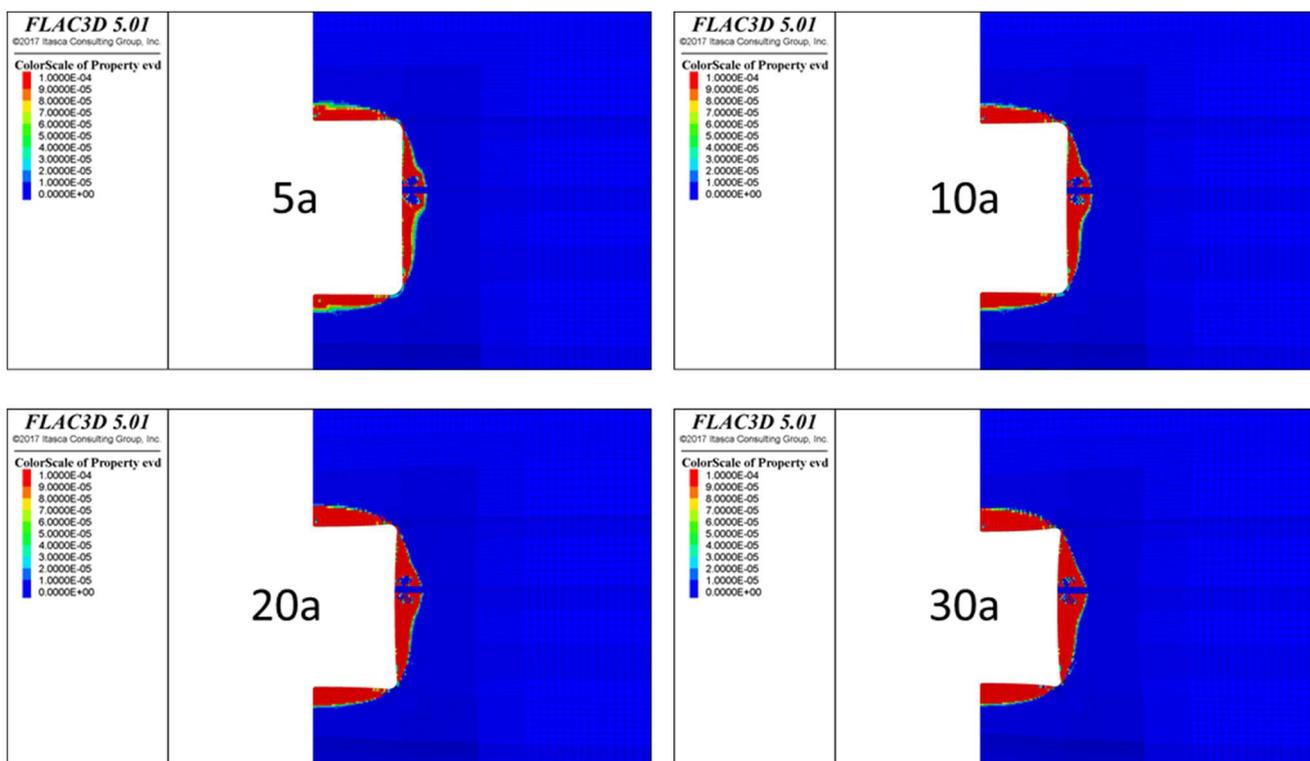


Abbildung 5-17: Berechnete Schädigungsvolumendehnung zu den Zeitpunkten 5, 10, 20 und 30 Jahre nach Auffahrung

Die berechnete Schädigung führt zu einer Abnahme der Zugfestigkeit, vergleiche Abbildung 5-18. Im Bereich der Auflockerungszone zeigt sich ein deutlich geringeres Niveau der Zugfestigkeit. Ein Rückgang der Zugfestigkeit auf null ist nur im Bereich der Ecken zu erkennen.

In welchen Zonen tatsächlich Zug vorhanden war bzw. ist, kann Abbildung 5-19 entnommen werden. Zugspannungen sind in den violett und gelb eingefärbten Zonen aufgetreten. Das ist für ein bis maximal zwei Zonenreihen hinter der Wandung der Fall. Zusätzlich sind einige violette Zonen im Bereich der Anhydritschicht zu erkennen. Aufgrund des bereits erwähnten festen Verbunds der beiden Materialien kommt es im Salz zu Zugspannungen. Der Kriechmechanismus lässt das Salz in Richtung des Hohlraums konvergieren, während der Anhydrit nicht kriecht. Das Salz wird am Anhydrit „festgehalten“, sodass hier Zug auftritt.

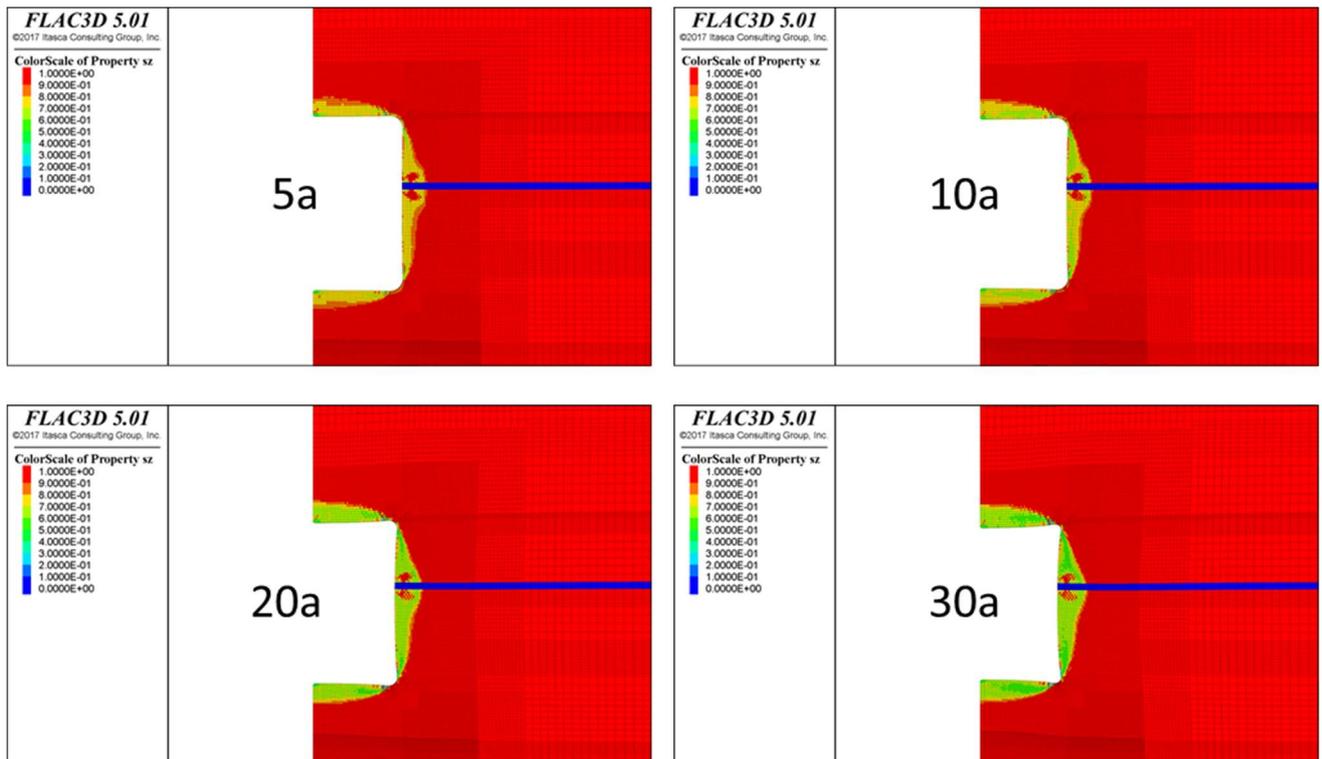


Abbildung 5-18: Berechnete Zugfestigkeit zu den Zeitpunkten 5, 10, 20 und 30 Jahre nach Auffahrung

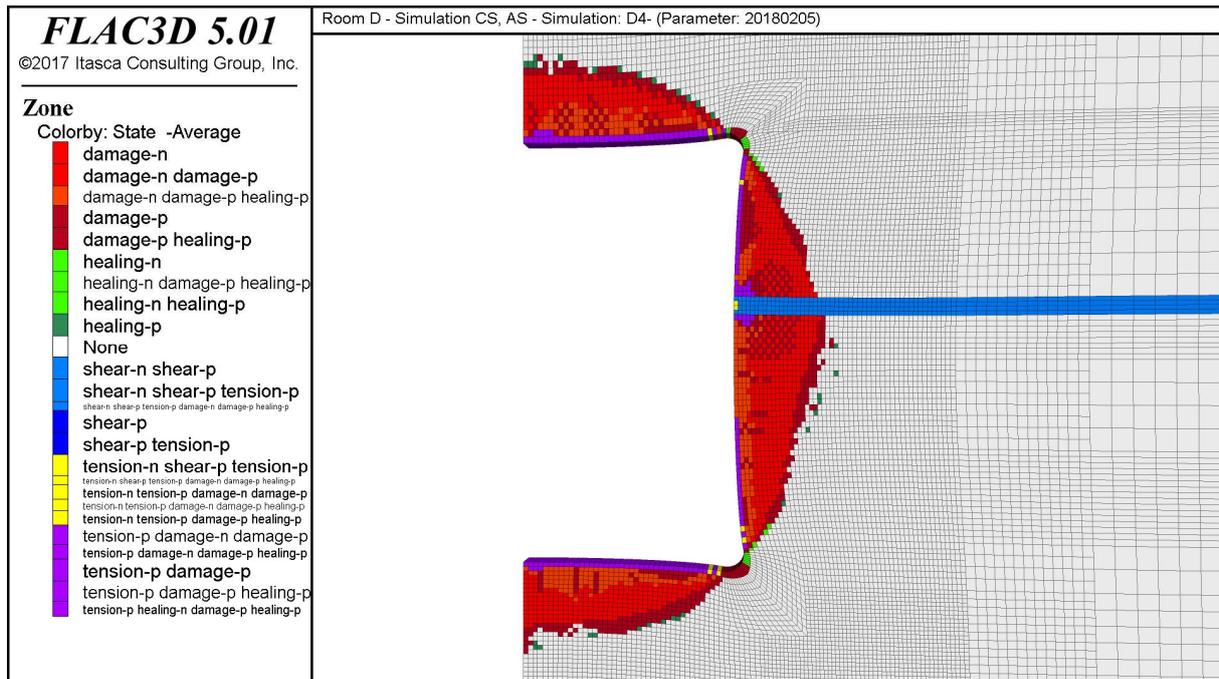


Abbildung 5-19: Status der Zonen zum Zeitpunkt 30 Jahre nach Auffahrung

6 AP 4 Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung (Wechselagerung)

Ziel des AP 4 war es, den Einfluss von Grenzflächen im Steinsalz auf die Verformung hinsichtlich der Hohlraumkonvergenz sowie die Entwicklung der Auflockerungszone zu untersuchen, wobei nicht die Weiterentwicklung der Stoffmodelle im Vordergrund stand, sondern die Analyse verschiedener Modellierungsverfahren zur Abbildung von Wechselagerung. Anwendbare Verfahren sind kontinuumsmechanische Ansätze, die mit einem verschmierten Modell arbeiten, oder aber auch die diskrete Abbildung der Wechselagerung. Als reales in situ Beispiel für den Einfluss von Schichtflächen kann die Versuchsstrecke ‚Room D‘ der WIPP Site genannt werden. Hier lassen sich an Steinsalz in flacher Lagerung mit zwischengeschalteten Ton- und Anhydritschichten die Einflüsse dieser Lagerung in der Hohlraumkonvergenz beobachten.

Um den Einfluss der Wechselagerung auf Scherung messtechnisch zu untersuchen und so zu quantifizieren, wurden an verschiedenen Proben Scherversuche durch RESPEC durchgeführt. Detaillierte Informationen zu den Untersuchungen sind den Veröffentlichungen des Projektpartners zu entnehmen.

7 AP 5 Virtuelle Demonstratoren

Das AP 5 sah Berechnungen eines komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modells, dem virtuellen Demonstrator, vor. Die Berechnungen eines virtuellen Demonstrators sollten die Funktionsfähigkeit des Stoffmodells an einem großen Modell zeigen und die im Rahmen der AP 1 bis AP 4 vorgenommenen Entwicklungen demonstrieren.

Entgegen der ursprünglichen Beschreibung des AP 5 in der Vorhabensbeschreibung wurde nicht nur ein Demonstrator berechnet, sondern mehrere Modelle, basierend auf untertage Strukturen in der Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) entwickelt. Die Modelle und die Berechnungsergebnisse von TUBS werden in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt.

7.1 Entwicklung des virtuellen Demonstrators 1

Der virtuelle Demonstrator 1 stellt eine generische Strecke im Salz dar. Die Strecke hat eine rechteckige Form und besitzt in etwa einen Querschnitt von 25 m². Das Gebirge besteht im Wesentlichen aus Steinsalz, weist jedoch auch Schichten aus anderen Materialien (Anhydrit, Polyhalit) auf. Im Laufe des Forschungsprojektes WEIMOS wurden mehrere Modellvarianten entwickelt. Die entwickelten Modelle weisen unterschiedliche Größen auf, sodass in den Unterkapiteln im Detail auf diese eingegangen wird.

Der betrachtete Berechnungszeitraum des Modells beträgt 100 Jahre. Nach Erzeugung des Primärspannungszustands erfolgt die Auffahrung der Strecke, die im Anschluss 30 Jahre offengehalten wird. In dieser Zeit degradiert das hohlraumnahe Gebirge. Es bildet sich eine Auflockerungszone aus, die durch Schädigungen bzw. eine erhöhte Permeabilität gekennzeichnet ist. Nach Ablauf der 30 Jahre wird in einem Teil der Strecke ein Damm installiert. Es folgen weitere 70 Jahre Simulation, in denen sich die Schädigungen im Bereich des Damms zurückbilden können, während sie in der freien Strecke weiter zunehmen.

Der Fokus der Berechnungen am Modell des virtuellen Demonstrators 1 lag auf der Auswertung der Schädigungsinduzierten Dilatanz sowie der Rückbildung dieser Schädigung (Verheilung) nach Einbau des Damms.

7.1.1 Modell auf Basis Room D

Das erste Modell wurde auf Basis des 2D-Modells ‚Room D‘ aus dem Vorgängerprojekt JP III konfiguriert. Der Querschnitt der Strecke hat die Maße 5,5 x 5,5 m. Für das hiesige Projekt wurde das 2D-Modell mit einer Tiefe von 26 m in ein 3D-Modell überführt. Nach Installation eines 10 m langen Damms verbleiben somit 16 m freie Strecke. Um die Rechenzeiten in einem adäquaten Maß zu halten, wurde das Modell deutlich gröber vernetzt. Das Modell besitzt ca. 70.000 Zonen.

Die Berechnung erfolgt die ersten 30 a im Modus „small-strain“ und einem Nullmodell für die offene Strecke. Mit Einbau des Damms wird der Berechnungsmodus auf „large-strain“ geändert. Dem Damm wird ein elastisches Stoffmodell zugewiesen. Der E-Modul beträgt 1.000 MPa, die Querdehnzahl 0,25.

7.1.1.1 Ergebnisse der Berechnungen am Modell auf Basis Room D

Nach Einbau des Damms kommt es bei der Berechnung zu numerischen Problemen. Abbildung 7-1 zeigt dazu beispielhaft die Schädigungsvolumendehnung nach einer Offenhaltungsdauer von 30 Jahren. Im Bereich des feinen vernetzten Damms lässt sich eine unplausible Konzentration der Schädigung erkennen. Diese lassen sich durch eine Vergrößerung des Netzes an der Stirn des Damms beheben, vergleiche Abbildung 7-2. Die Netzfeinheit ist nun über den gesamten Damm konstant.

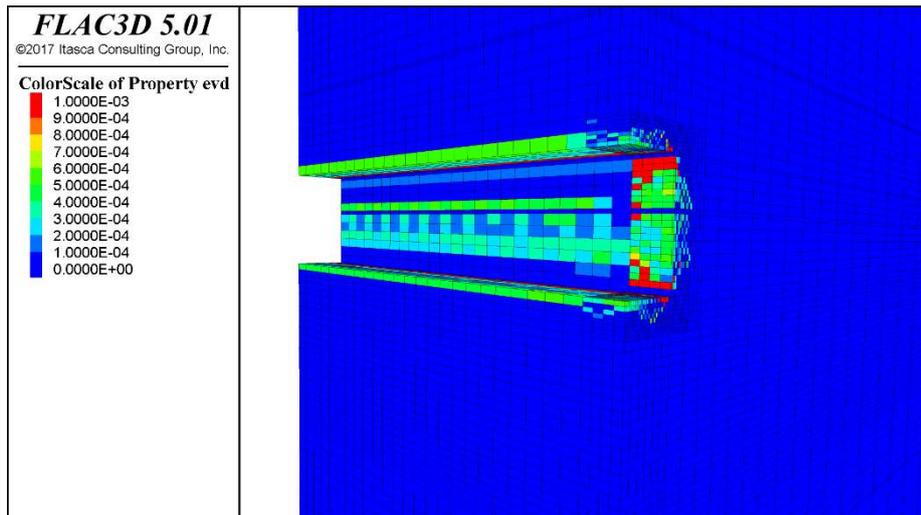


Abbildung 7-1: Schädigungsvolumendehnung nach 30 Jahren Offenhaltung mit feinerer Vernetzung im Bereich des Damms

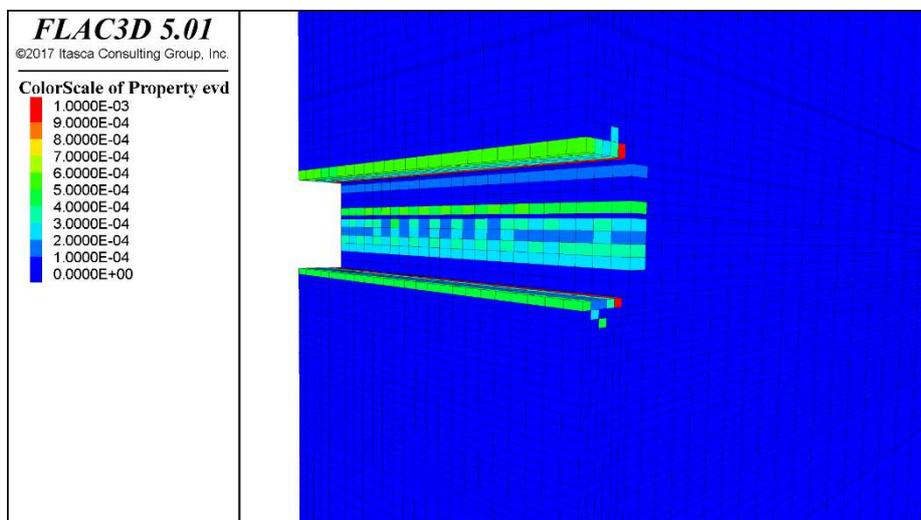


Abbildung 7-2: Schädigungsvolumendehnung nach 30 Jahren Offenhaltung mit gröberer Vernetzung im Bereich des Damms

7.1.2 Modell TUBS

Das Modell der TUBS hat eine Größe von 70 x 50 x 10 m (H x B x T). Das Deckgebirge wird mit einer Auflast von 13,57 MPa simuliert, was in etwa einer Überdeckung von etwa 550 m entspricht. Die Strecke besitzt einen Querschnitt mit den Abmessungen 2,55 x 3,7 m (B x H). Nach Einbau des Damms teilt sie sich in einen 5 m langen Bereich mit Damms und eine 5 m lange freie Strecke. Die Ecken wurden mit einem Radius von 0,25 m ausgerundet, um numerischen Problemen vorzubeugen. Das Modell besitzt eine Gesamtzonenanzahl von 760.706 Zonen und ist damit ein vergleichsweise großes Modell. Abbildung 7-3 und Abbildung 7-4 zeigen das Modell sowie die Strecke im Detail mit den entsprechenden Abmessungen. Auch die Netzfeinheit lässt sich aus den Abbildungen entnehmen.

Die Berechnung erfolgt die ersten 30 a im Modus „small-strain“ und einem Nullmodell für die offene Strecke. Mit Einbau des Damms wird der Berechnungsmodus auf „large-strain“ geändert. Dem Damms wird ein elastisches Stoffmodell zugewiesen. Der E-Modul beträgt 1.000 MPa, die Querdehnzahl 0,25.

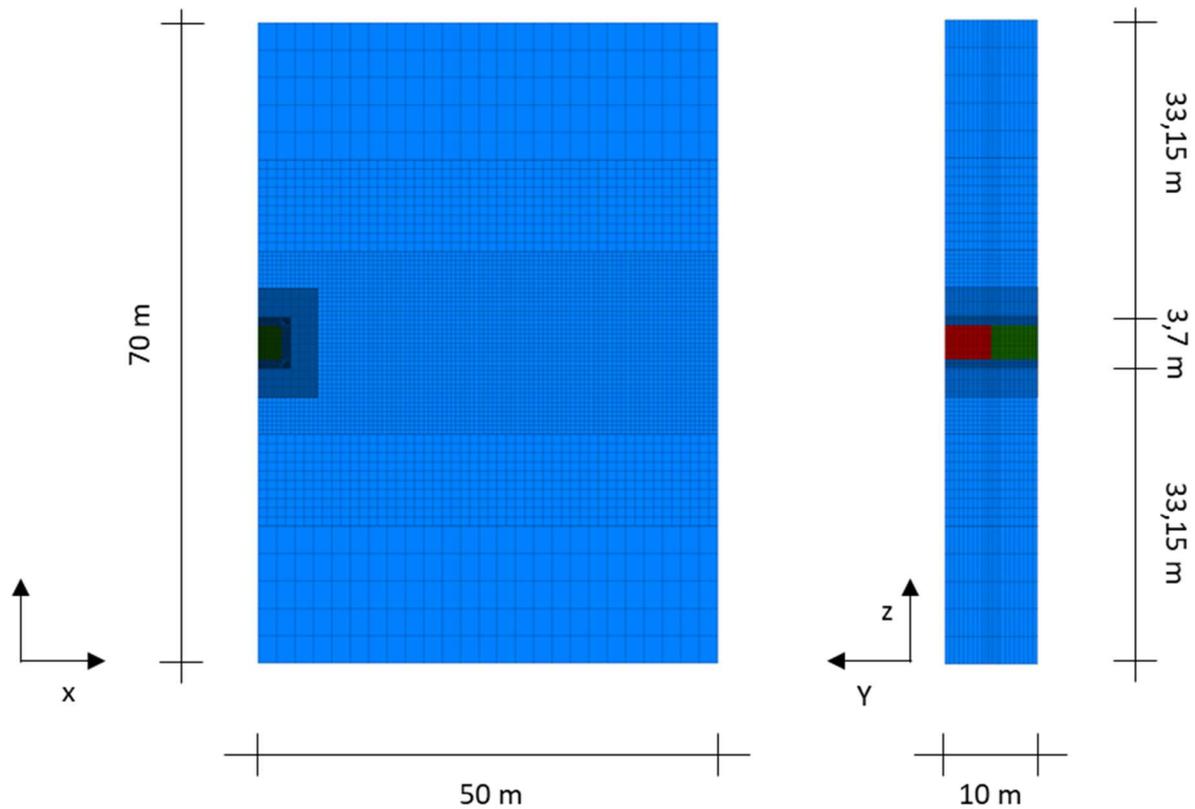


Abbildung 7-3: Abmessungen des 3D-Modells TUBS

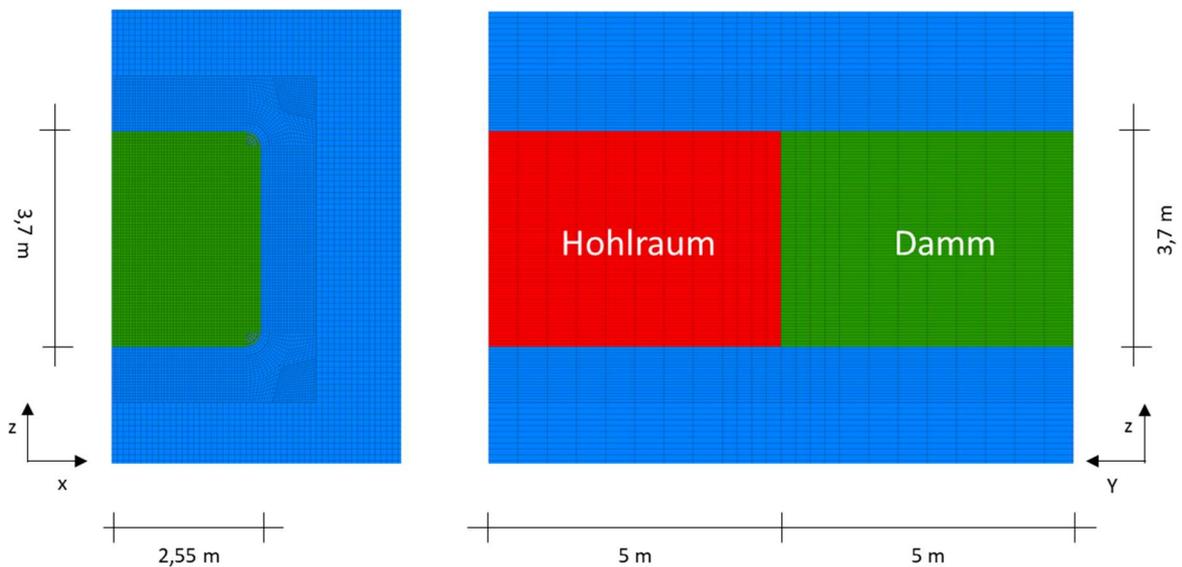


Abbildung 7-4: Abmessungen der Strecke des 3D-Modells TUBS; Querschnitt (links) und Ansicht (rechts)

7.1.2.1 Ergebnisse der Berechnung am Modell TUBS

Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem Modell TUBS können nach Prüfung als plausibel bewertet werden. Abbildung 7-5 zeigt beispielhaft die Schädigungsvolumendehnung nach einer Berechnungsdauer von 31 und 35 Jahren, also zum Zeitpunkt 1 bzw. 5 Jahre nach Einbau des Damms. Im linken Plot ist zu erkennen, dass der geschädigte Bereich nahe dem eingebauten Damm geringer ausgeprägt ist

als im Bereich der offenen Strecke. Es findet eine Rückbildung der Schädigung statt. Dies bestätigt das rechte Bild. 5 Jahre nach Einbau des Damms hat sich der geschädigte Bereich beinahe vollständig zurückgebildet. Lediglich im Bereich des Stoßes liegt noch eine Schädigungsvolumendehnung vor.

Auf weitere Ergebnisse wie Spannungs- und Verformungsplots wird an dieser Stelle verzichtet, da das Modell TUBS verworfen wurde. LUH stellte ein weiteres Modell vor, das aufgrund der geringeren Zonenanzahl mit einer kürzeren Berechnungsdauer einhergeht. LUH zeigte zudem, dass die Ergebnisse der jeweiligen Modelle vergleichbar sind.

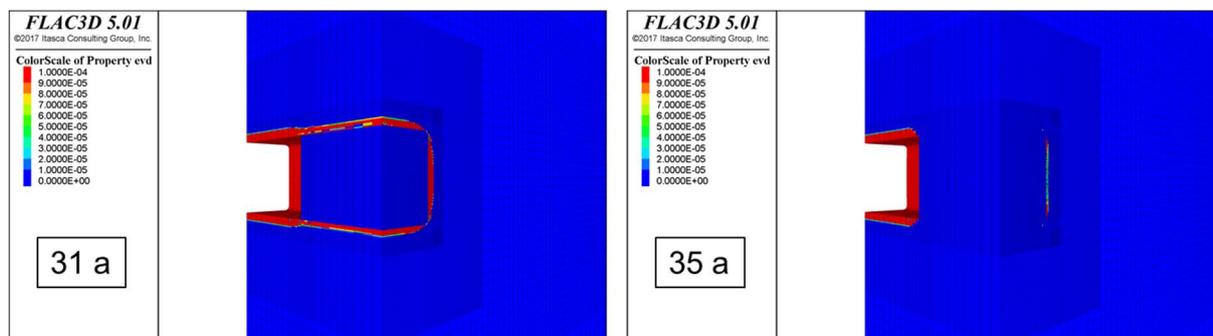


Abbildung 7-5: Schädigungsvolumendehnung nach einer Berechnungsdauer von 31 Jahren (links) und 35 Jahren (rechts)

7.1.3 Modell LUH

Das Modell der LUH orientiert sich an am Modell ‚Room D‘. Es hat eine Größe von 107 x 50 x 26 m (H x B x T), vergleiche Abbildung 7-7. Auch hier wird das Deckgebirge mit einer Auflast von 13,57 MPa simuliert. Die Strecke besitzt einen quadratischen Querschnitt von 5,5 x 5,5 m und ist 26 m lang. Nach Einbau des Damms entfallen hiervon 10 m auf den Damm und 16 m auf die verbleibende freie Strecke, vergleiche Abbildung 7-6. Die Ecken sind in der ursprünglichen Variante nicht ausgerundet. Das Modell besitzt insgesamt 108.000 Zonen und ist damit deutlich kleiner als das Modell TUBS. Der virtuelle Demonstrator der LUH ist das finale Modell für den ersten virtuellen Demonstrator.

Im Laufe von WEIMOS wurden von TUBS verschiedene Varianten des Virtuellen Demonstrators 1 untersucht. Variiert wurde unter anderem die Ausbildung der Ecken in Form von ausgerundeten Ecken oder nicht ausgerundete Ecken, die Wahl der Berechnungseinstellung „small-strain“ oder „large-strain“ sowie die Modellierung der freien Strecke über ein Nullmodell oder ein elastisches Stoffmodell.

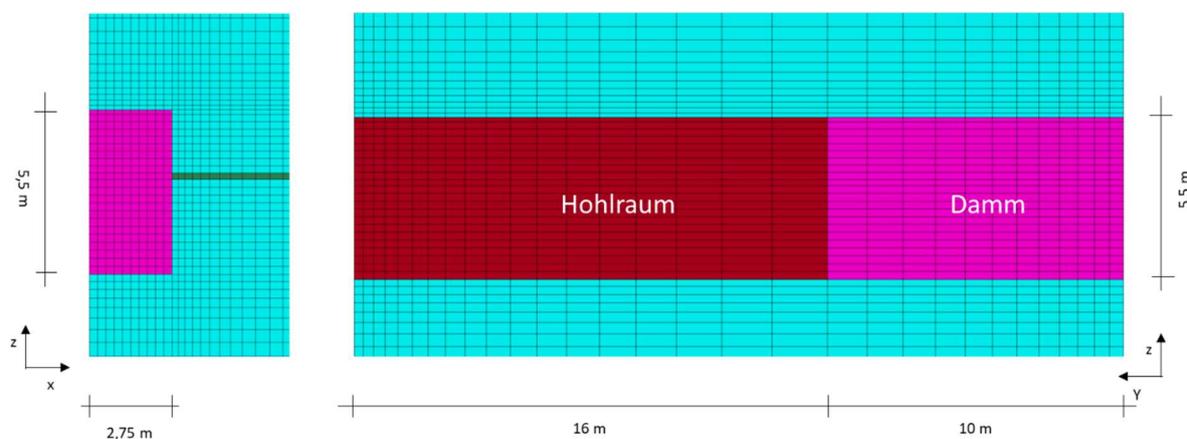


Abbildung 7-6: Abmessungen der Strecke im Modell LUH; Querschnitt (links) und Ansicht (rechts)

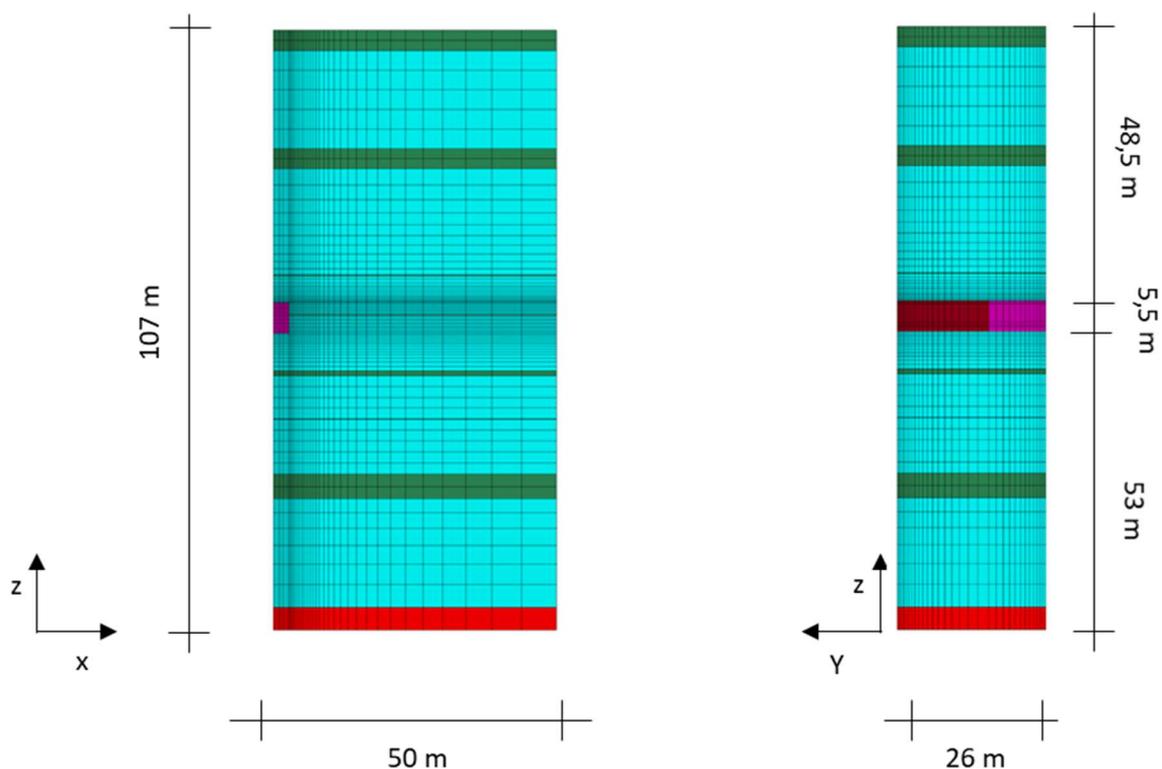


Abbildung 7-7: Abmessungen des 3D-Modells LUH

7.1.3.1 Untersuchungen zur Ausbildung der Ecken

Bei der Berechnung des ursprünglich von LUH vorgeschlagenen Modells, mit nicht ausgerundeten Ecken der freien Stecke, kommt es bei der Berechnung mit *TUBSsalt* bereits nach wenigen berechneten Jahren zum Abbruch der Berechnungen. Ausschlaggebend sind die vergleichsweise großen berechneten Verformungen und das damit einhergehende Auftreten einer in der FLAC3D Terminologie als illegale Geometrie („illegal geometry“) bezeichneten, von FLAC3D nicht verarbeitbaren Verformung des Netzes.

Da vergleichbare Probleme bei mehreren Partnern auftraten wurde vom IfG eine Ausrundung der Ecken, durch Versetzen der Knotenpunkte vorgeschlagen (vgl. Abbildung 7-8, links). Da auch mit diesem Modell keine Berechnung bis zum Endzeitpunkt von 100 Jahren mit *TUBSsalt* möglich waren, wurde ein zusätzliches „Nachschneiden der Ecken“ vor dem Einbau des Dammes implementiert. Hierbei werden die Knotenpunkte der ausgerundeten Ecke, die sich im Zuge der Berechnung der ersten 30 Jahre in den Hohlraum hinein geschoben haben, vor dem Einbau des Dammes in Richtung der ursprünglichen Position versetzt, sodass wieder eine ausgerundete Ecke entsteht. Mit diesem Vorgehen ist eine Berechnung des Virtuellen Demonstrators 1 mit *TUBSsalt* bis zu einem Zeitpunkt von 67 Jahren möglich.

Um eine Berechnung für den gesamten betrachteten Zeitraum durchführen zu können, wurden von TUBS weitere Modellvarianten mit ausgerundeten Ecken untersucht. Anstatt die Ausrundung über eine Verschiebung der Knotenpunkte in den Ecken zu generieren, wurden in diesen Varianten die Ecke des Hohlraumes mit der in FLAC3D einsetzbaren Form ‚Radial-cylinder‘ ausgerundet (vgl. Abbildung 7-8/Abbildung 3-1). Die schwarze Linie zeigt im mittleren und rechten Bild die ursprüngliche Kontur. Mit dem Modell mit dem geringeren Radius der ausgerundeten Ecken ist eine Berechnung bis 90 Jahre, mit dem Modell mit dem größeren Radius der Ecken lässt sich eine Berechnung bis 100 Jahre durchführen. Bei dem Vergleich der Berechnungsergebnisse zeigt sich, dass für die ausgewerteten Punkte

nahezu keine Unterschiede zu verzeichnen sind, sodass eine Anpassung der Geometrie als valide angekommen wird.

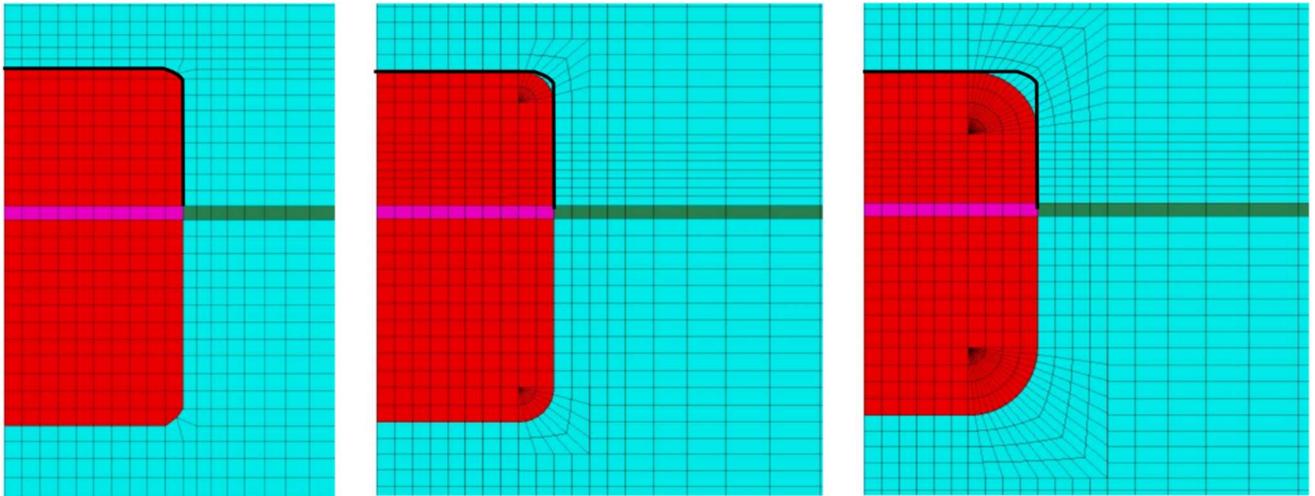


Abbildung 7-8: Unterschiedliche Arten der Ausbildung der Ecken

7.1.3.2 Untersuchungen zum Berechnungsmodus

Neben den geometrisch unterschiedlichen Modellen wurde zudem der Berechnungsmodus („small-strain“ bzw. „large-strain“) variiert. Im Berechnungsmodus „large-strain“ werden im numerischen Programmsystem bei der Spannungsberechnung die durch die Belastung entstehenden Deformationen berücksichtigt. Die Verformungen sind hier spannungswirksam und wirken sich auch auf die Knotenpunkte bzw. das Netz aus, während sie im Berechnungsmodus „small-strain“ keinen Einfluss auf die Spannungsberechnung und das Netz haben. Entsprechend der Bezeichnung werden die verschiedenen Modi verwendet, wenn kleine (eher spannungsunwirksame) oder große (spannungswirksame) Verformungen erwartet werden. Im Zuge des Projekts wurde entschieden, die Berechnungen nur im Modus „large strain“ durchzuführen, da im Wesentlichen große Verformungen zu erwarten sind und dieser Modus die erwarteten Verformungen somit realitätsnah widerspiegelt.

7.1.3.3 Untersuchungen zur Modellierung der freien Strecke

Die Modellierung einer freien Strecke kann in FLAC3D im Wesentlichen auf zwei Arten vorgenommen werden. Zum einen kann ein Nullmodell verwendet werden, wobei die Zonen der freien Strecke bei den weiteren Berechnungsschritten nicht berücksichtigt werden. Zum anderen kann den Zonen der freien Strecke ein elastisches Modell zugewiesen werden. Die Steifigkeitsparameter werden so angepasst, dass sie einem extrem weichen/nachgiebigem Material entsprechen. Der Vorteil der zweiten Variante ist es, dass die Simulation des Einbaus des Damms vereinfacht wird. Den entsprechenden Zonen kann einfach ein entsprechender Parametersatz zugewiesen werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden von TUBS verschiedene Parametervariationen untersucht.

Die Ergebnisse der Berechnungen mit dem initialen Parametersatz (vgl. Tabelle 7-1) zeigen, dass obwohl das Material, das den offenen Hohlraum simuliert, sehr weich modelliert ist, das Material nach Einbau des Damms offenbar genügend Spannungen aufnimmt, sodass die Differenzspannungen im Gebirgsbereich der offenen Strecke stark zurückgehen und ein Spannungszustand erreicht wird, der unterhalb der Dilatanzgrenze liegt, vergleiche Abbildung 7-9. Tatsächlich kommt es sogar zur Rückbildung der Schädigung, sodass zum Ende der Berechnungsdauer auch im Bereich des offenen Hohlräume die Schädigungsvolumendehnung fast vollständig zurückgebildet wurde, vergleiche Abbildung 7-10. Daher wurden zusätzlich Berechnungen mit einem weicherem Material durchgeführt. Kompressions-

und Schubmodul wurden über mehrere Iterationsschritte deutlich reduziert Tabelle 7-1. Der Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit dem finalen Parametersatz lässt darauf schließen, dass das elastische Material, welches die offene Strecke simuliert, keine Spannungen aufnimmt und die Vergleichsspannungen im Bereich der offenen Strecke nicht in gleichem Maße abgebaut werden. Somit nimmt auch die Schädigungsvolumendehnung nicht wie in der initialen Variante ab.

Tabelle 7-1: Stoffparameter der offenen Strecke

Parameter	initial	final
Kompressionsmodul [MPa]	10	0,033
Schermodul [MPa]	10	0,033
Dichte [g/cm ³]	2,17e ⁻⁶	1e ⁻⁴

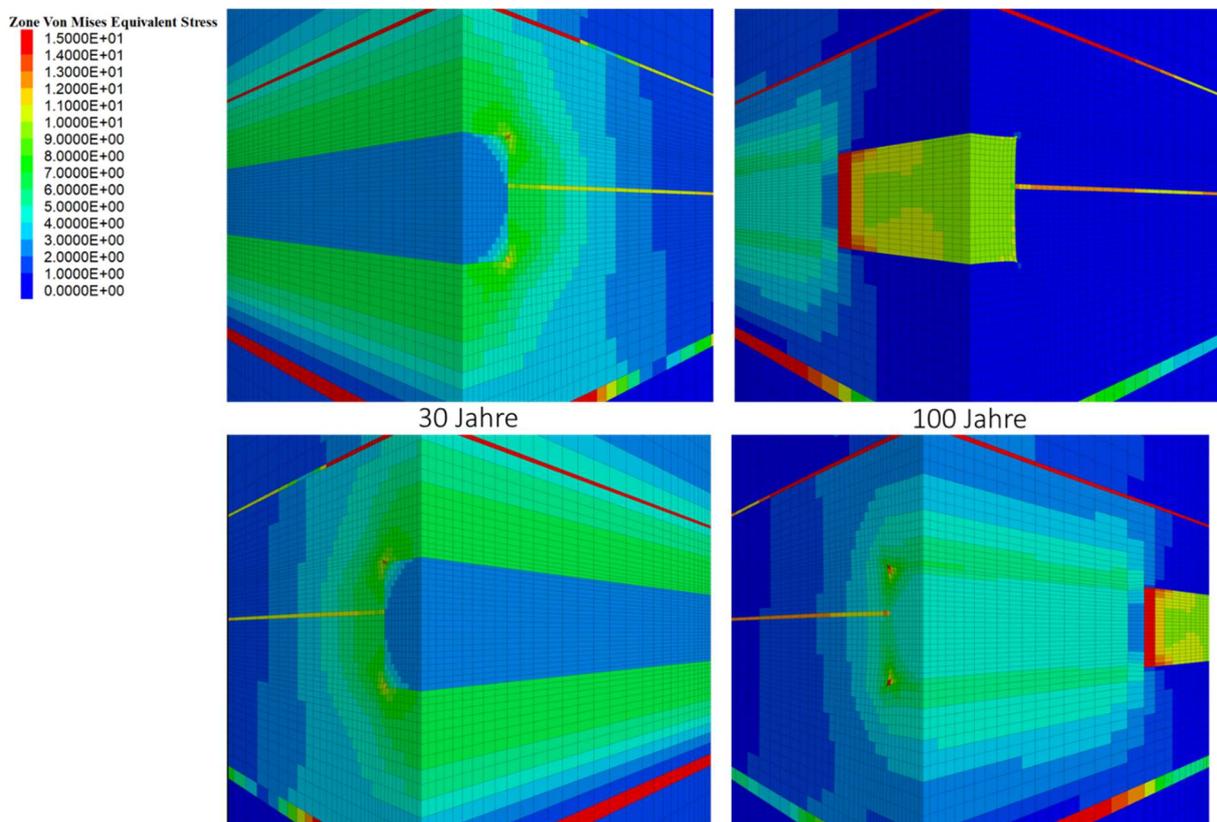


Abbildung 7-9: Von-Mises-Äquivalenzspannung, Blick auf den Bereich des Damms (oben), Blick auf die offene Strecke (unten)

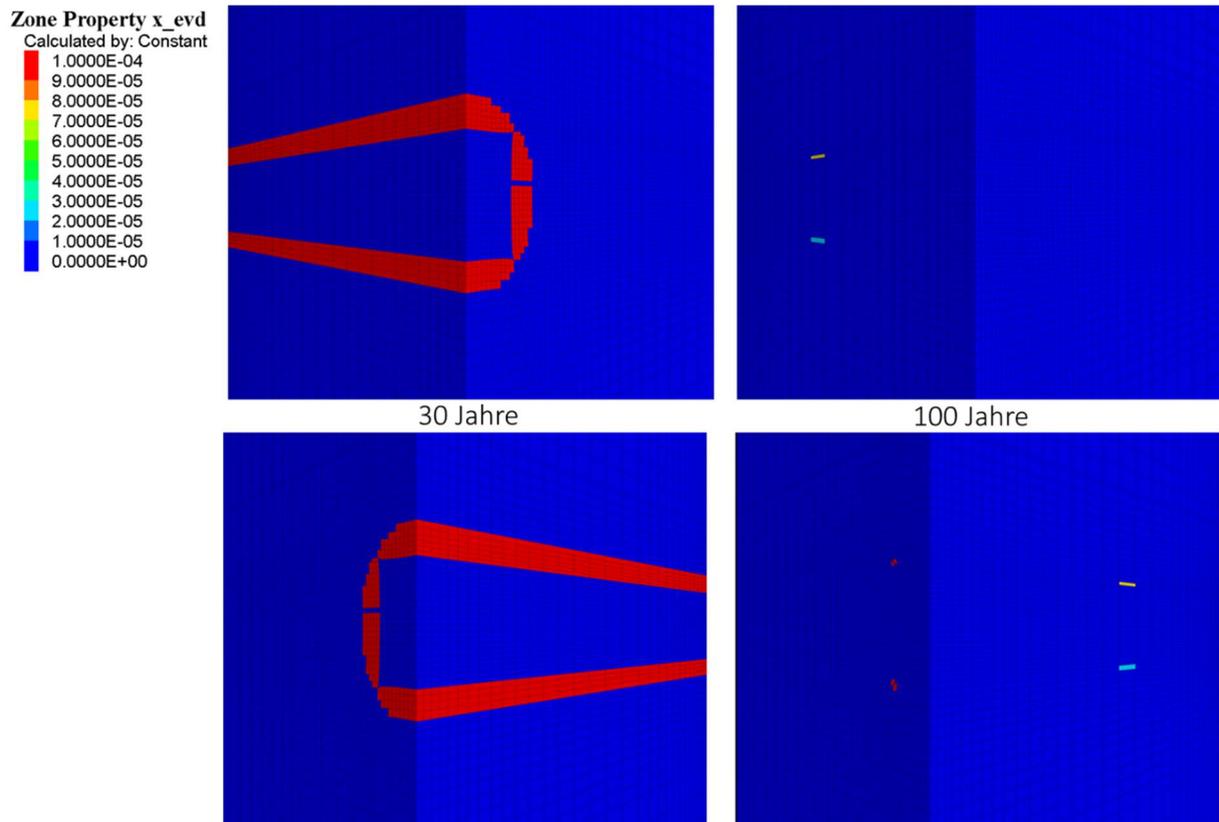


Abbildung 7-10: Schädigungsvolumendehnung, Blick auf den Bereich des Damms (oben), Blick auf die offene Strecke (unten)

7.2 Finale Berechnungen Virtueller Demonstrator 1

Die finalen Berechnungen wurden von allen Partnern mit einem einheitlichen Parametersatz an dem Modell LUH durchgeführt, wobei für die Berechnungen mit *TUBSsalt* die Ausrundung der Ecken angepasst wurde. Es werden alle Gesteinsschichten (clean salt, argillaceous salt, Anhydrit, Polyhalit) berücksichtigt. Die gesamte Berechnung wird im „large strain“-Modus ausgeführt.

In der Berechnung wird zunächst über 30 Jahre eine offene Strecke simuliert, wobei den Zonen des Hohlrums ein elastisches Stoffmodell zugewiesen wird (vgl. Kapitel 7.1.3.3). Anschließend wird der Einbau des Dammbauwerks vorgenommen, das heißt in den Zonen des Damms werden die Parameter des elastischen Materials angepasst und den Zonen der verbleibenden offenen Strecke wird ein Nullmodell zugewiesen, und 70 weitere Jahre berechnet. Insgesamt ergibt sich damit ein Berechnungszeitraum von 100 Jahre.

Der Simulationsablauf berücksichtigt im Detail folgende Schritte:

1. Die ersten 9 Schritte werden elastisch berechnet, der offenen Strecke wird ein Nullmodell zugewiesen.
2. Die folgenden 3991 Schritte werden elastisch berechnet, der offenen Strecke wird ein elastisches Stoffmodell mit weichen Materialparametern zugewiesen.
3. Ab Schritt 4000 bis zum Zeitpunkt $t = 10$ d wird reines Kriechen abgebildet. Die Teile des Stoffmodells, die Dilatanz und Schädigung berücksichtigen werden deaktiviert.
4. Ab dem Zeitpunkt $t = 10$ d werden alle Komponenten des Stoffmodells berücksichtigt.
5. Zum Zeitpunkt $t = 30$ a wird der Damm eingebaut.
6. Anschließend wird bis zum Berechnungsendzeitpunkt von 100 Jahre gerechnet.

7.2.1 Ergebnisse der Berechnungen am finalen Modell des Vituellen Demonstrators 1

Die Berechnungsergebnisse des Virtuellen Demonstrators 1 mit dem Stoffmodell *TUBSsalt* werden im Folgenden anhand ausgewählter Konturplots dargestellt. Ausgewertet wird die Entwicklung der Verschiebungen und der Schädigung sowie die Vergleichsspannung.

7.2.1.1 Verformungen

Abbildung 7-11 zeigt die Verschiebungen für sechs ausgewählte Punkte der Streckenkontur. Diese befinden sich im Bereich der offenen Strecke und im Bereich des Damms an der Hohlraumkontur von Firste, Stoß und Sohle. Ihre Lage ist ebenfalls der Abbildung zu entnehmen. Die Verschiebungen steigen über die Dauer der Offenhaltung auf etwa 60 cm in der Firste und 40 cm in der Sohle. Nach Einbau des Damms steigen die Verschiebungen im Bereich des Damms nur noch geringfügig. Der Damm wird durch den Gebirgsdruck entsprechend seiner Steifigkeit zusammengedrückt. Nach 100 Jahren sind sämtliche Differenzspannungen im Bereich des Damms abgebaut, sodass hier auch keine weiteren Kriechprozesse stattfinden. Im Bereich der offenen Strecke hingegen sind weiterhin Differenzspannungen vorhanden. Es kommt zu weiteren Kriech- und somit Schädigungsprozessen. Die Verschiebungen nehmen entsprechend weiterhin zu.

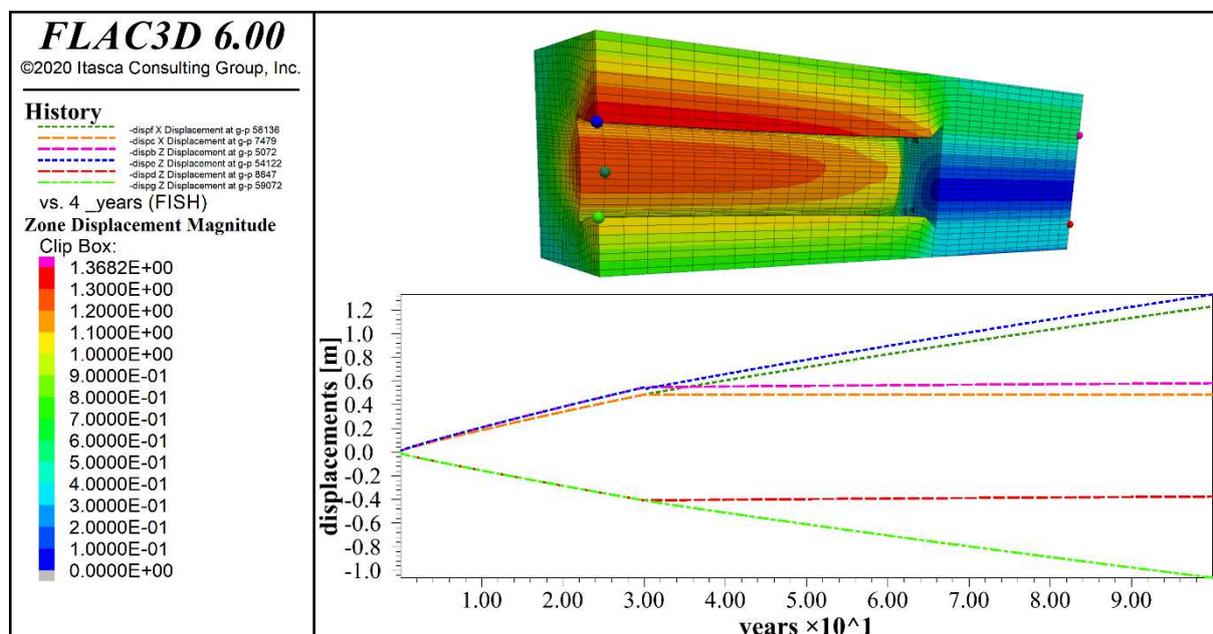


Abbildung 7-11: Verschiebung von Firste, Sohle und Stoß über die Zeit

7.2.1.2 Schädigungsvolumendehnung

Abbildung 7-12 zeigt die Entwicklung der Schädigungsvolumendehnung über die gesamte Berechnungsdauer. Die Schädigungsvolumendehnung nimmt zunächst direkt an der Hohlraumkontur zu. Mit der Zeit bildet sich ein geschädigter Bereich mit einem annähernd kreisrunden Querschnitt um den Hohlraum aus. Bereits nach wenigen Jahren ist die Ausdehnung der Schädigungszone weitestgehend abgeschlossen, danach nehmen lediglich die Werte der Schädigungsvolumendehnung zu, die Ausdehnung verändert sich nur noch minimal. Zu erkennen ist, dass die Schädigungsvolumendehnung in den Bereichen des offenen Hohlraums über die gesamte Berechnungsdauer zunimmt. Im Bereich des Damms findet nach Dammeinbau eine Rückbildung der Schädigung statt, wobei eine vollständige Verheilung bereits innerhalb von wenigen Jahren eintritt.

Die Ausbildung der Schädigungszone kann als plausibel angenommen werden, die berechnete schädigungsinduzierten Dilatanz in den geschädigten Bereichen entspricht mit einer Größenordnung im Promille Bereich allerdings nicht der Größenordnung der erwarteten Schädigung. Die Ergebnisse der Partner zeigen eine Schädigungsvolumendehnung im Prozentbereich. In der Projektlaufzeit wurde keine Formulierung des Stoffmodells entwickelt, mit der sich sowohl die Versuchsergebnisse nachrechnen lassen können, als auch höhere Schädigungen in den Berechnungen an dem Virtuellen Demonstrator erreicht werden. Das Stoffmodell *TUBSsalt* sowie die Erweiterung *TUBSsalt_perm* basieren auf der Annahme, dass bereits ab einer erreichten schädigungsinduzierten Dilatanz von $1e^{-4}$ die Permeabilität signifikant zunimmt.

In der Realität ist außerdem eine graduelle Rückbildung der Schädigung über mehrere Jahrzehnte zu erwarten, wobei hier deutlich höhere Schädigungen als mit *TUBSsalt* berechnet vorausgesetzt werden. Um zukünftig Einfluss auf den Verlauf der Schädigungsrückbildung nehmen zu können, wurde eine Variation der Anpassung des Verheilungsterms (vgl. Kapitel 4.3.2) untersucht. Über eine Anpassung der Berechnung der Viskosität η^p lassen sich bei Nachrechnungen der Versuche und des Virtuellen Demonstrators 1 zeigen, dass die Versuche weiterhin hinreichend genau abgebildet werden können, für den Demonstrator eine graduellere Abnahme der Schädigung erreicht wird (Abbildung 7-13). Allerdings sind für eine vollständige Validierung dieser Anpassung die Berechnung und anschließende Rückbildung einer erhöhten Schädigung notwendig. Da die Anpassung des Stoffmodells *TUBSsalt* im Hinblick auf die Schädigung zum Zeitpunkt der Abgabe des Abschlussberichts noch aussteht, kann die Anpassung des Verheilungsterm nicht abschließend validiert werden.

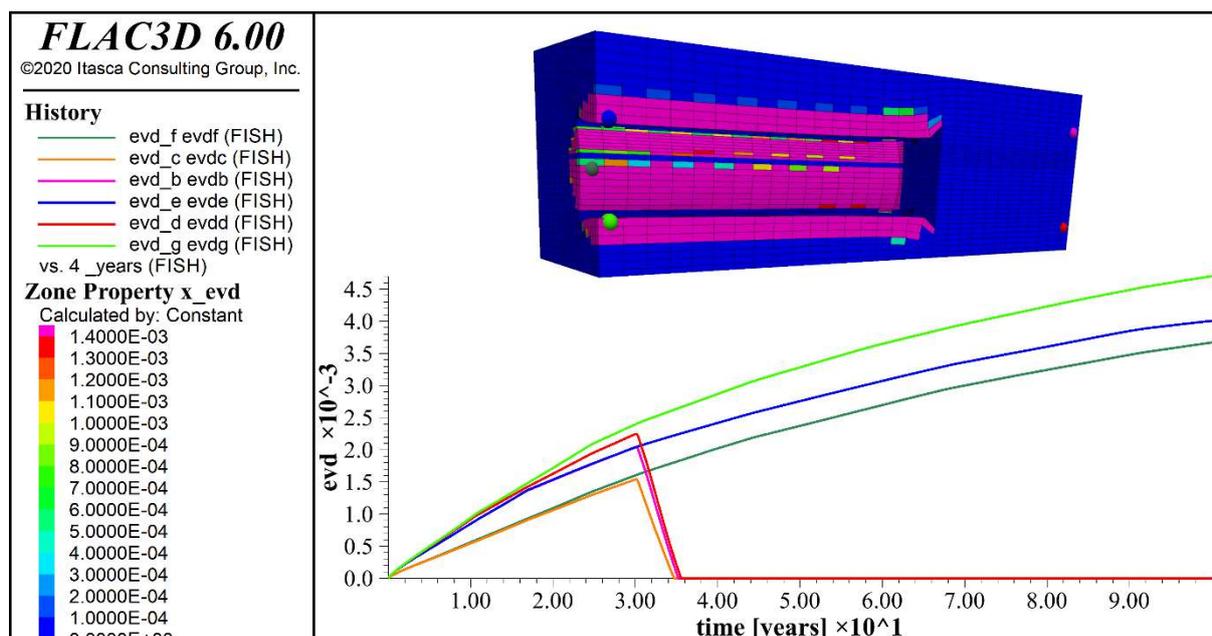


Abbildung 7-12: Entwicklung der Schädigungsvolumendehnung

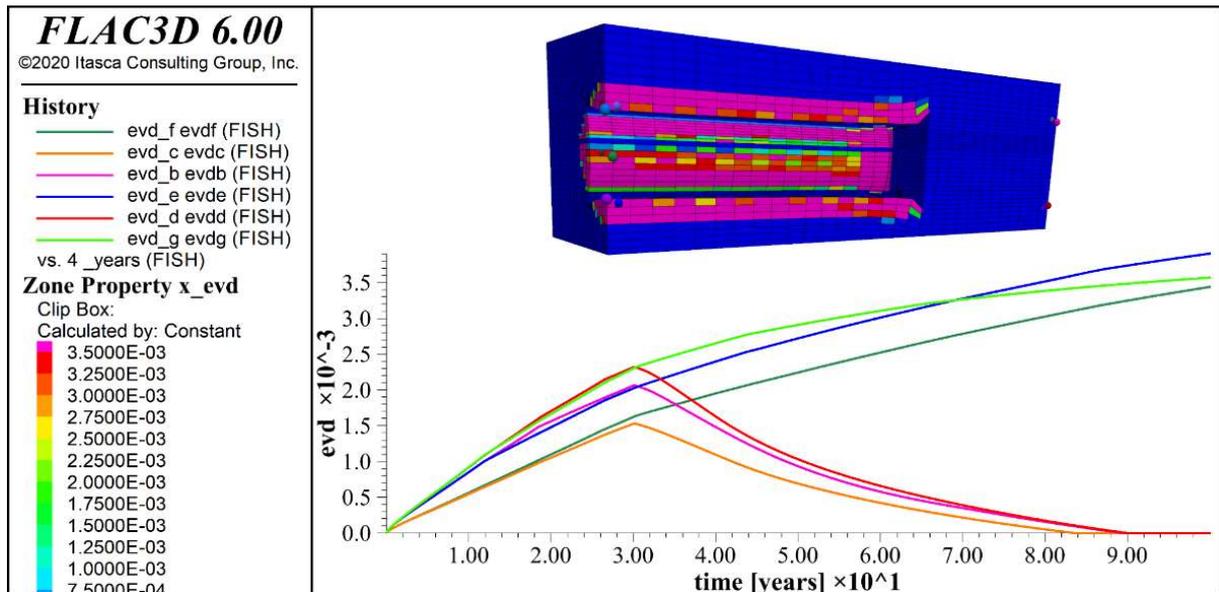


Abbildung 7-13: Entwicklung der Schädigungsvolumenexpansion (Anpassung der Viskosität des Verheilungstherms)

7.2.1.3 Von-Mises Vergleichsspannung

In Abbildung 7-14 sind die von-Mises-Vergleichsspannung über die gesamten berechneten 100 Jahre dargestellt. Infolge des Ausbruchs des Hohlrums werden deviatorische Spannungen hervorgerufen. Mit zunehmendem Abstand zur Kontur nehmen die Spannungen ab. Im Bereich der offenen Strecke kommt es zu Spannungsumlagerungen und infolge derer zu Entlastungen im Bereich der Firste und Sohle sowie zu Spannungskonzentrationen in den Ecken des Querschnitts. Nach Einbau des Damms kriecht das Salz auf das Verschlussbauwerk auf und das Gebirge entspannt sich.

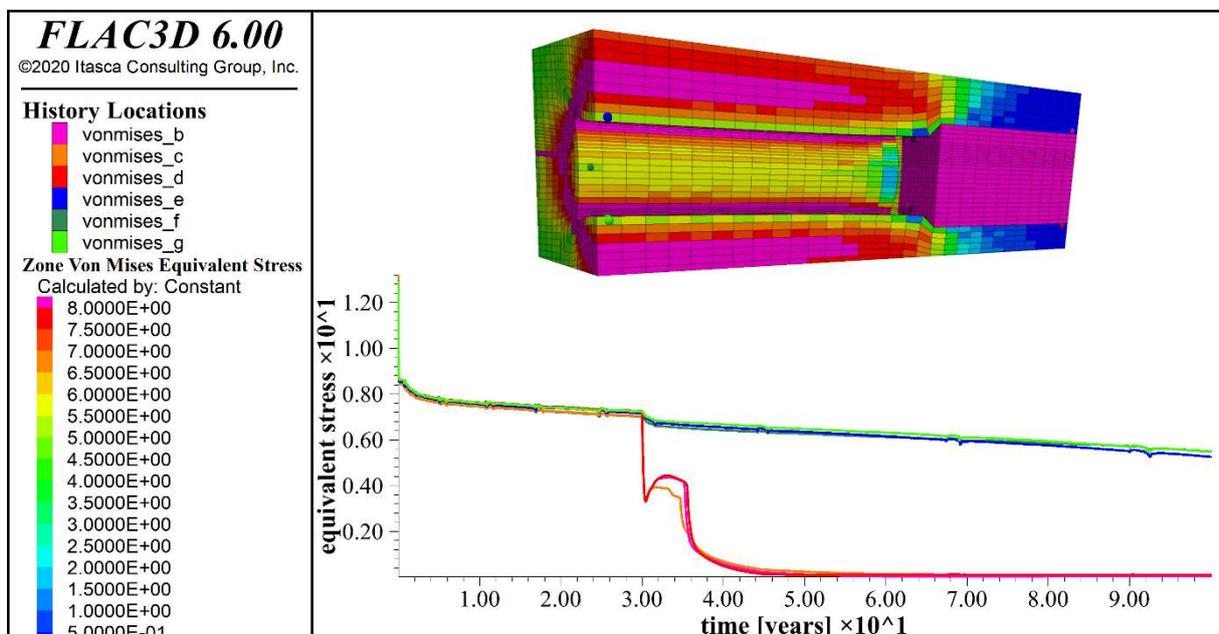


Abbildung 7-14: Entwicklung der von-Mises-Vergleichsspannung

7.3 Entwicklung des virtuellen Demonstrators 2

Im Zuge der Verlängerung der Projektlaufzeit des Forschungsprojektes WEIMOS wurde die Entwicklung eines weiteren virtuellen Demonstrators angestrebt. Da die Ergebnisse des ersten virtuellen Demonstrators keine intensiven Zugschädigungen oder sogar Ablösungen von Firstbereichen zeigten, sollte ein zweites Modell entwickelt werden, in dem diese Effekte abgebildet werden, da diese beispielsweise in der WIPP auftreten und bei der Betrachtung der Betriebssicherheit relevant werden können. Der Virtuelle Demonstrator 2 orientiert sich an einer realen Situation in der WIPP.

7.3.1 Modell IfG

Das Modell des Virtuellen Demonstrators 2 wurde durch IfG in Anlehnung an einen Querschnitt aus der WIPP erstellt und den Partnern zur Berechnung zur Verfügung gestellt. Bei dem Modell handelt es sich um ein Scheibenmodell des ebenen Verzerrungszustands (plain strain) mit rund 23.000 Zonen. Das Modell ist mit seinen Abmessungen in Abbildung 7-15 dargestellt.

Das Modell beinhaltet zwei Infrastrukturstrecken und mehrere Einlagerungskammern. Der Fokus liegt auf der Betrachtung der in der Abbildung ganz links dargestellten Strecke großen Querschnittes. Der Hohlraum hat die Maße 8 m x 8 m und die Ecken sind ausgerundet. Oberhalb der Strecke befindet sich ein Interface, das eine Tonschicht simuliert und die Abbildung einer Loslösung der Firste ermöglicht. Das Interface liegt 12 m oberhalb der Firste der Strecke und ist insgesamt 21 m breit. Es überragt somit die Strecke rechts und links mit jeweils 6,5 m. Die Eigenschaften sind Tabelle 7-2 zu entnehmen. Die Strecke rechts neben der beschriebenen Strecke weist mit 5 m x 5 m ebenfalls einen quadratischen Querschnitt auf. Der Pfeiler zwischen den beiden linken Strecken ist 26 m breit. Die insgesamt sieben rechteckigen Strecken (Einlagerungskammern) auf der rechten Modellseite haben eine Höhe von 5 m und eine Breite von 10 m. Die Pfeiler zwischen ihnen sind jeweils 30 m breit. Zwischen der kleinen quadratischen Strecke auf der linken Seite und der ersten rechteckigen Strecke auf der rechten Seite liegen 53 m.

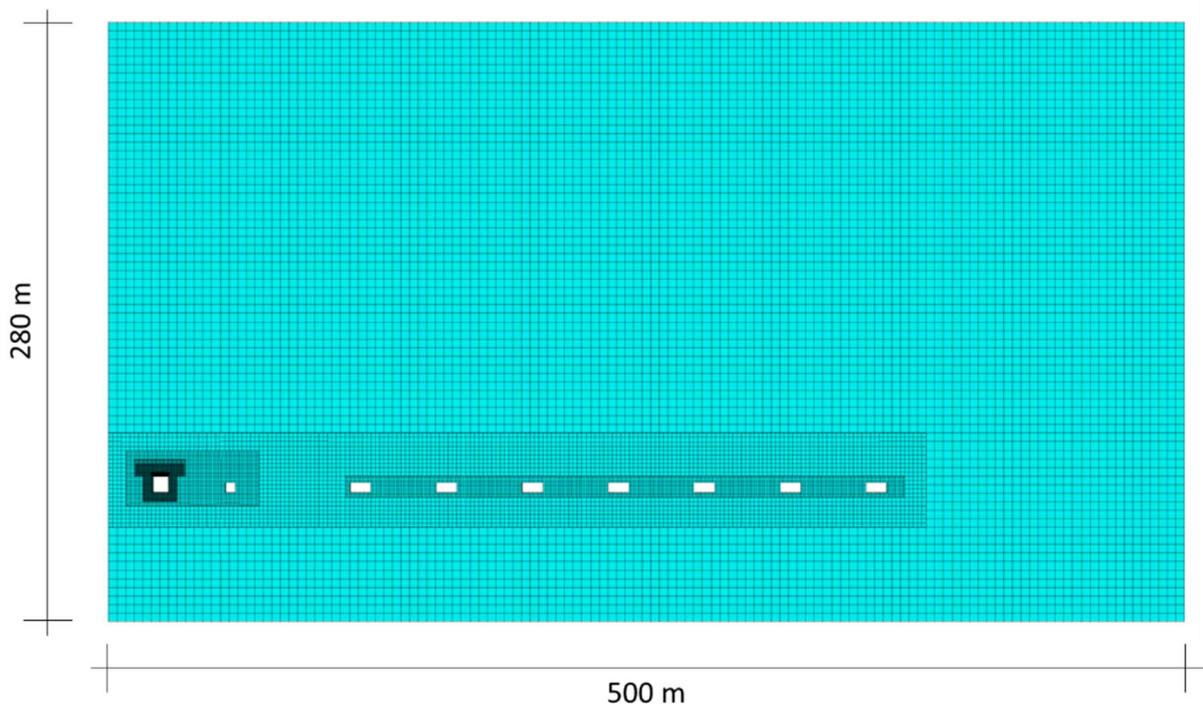


Abbildung 7-15: Abmessungen des zweiten virtuellen Demonstrators (Modell IfG)

Tabelle 7-2: Eigenschaften des Toninterfacés

Eigenschaft	Wert
Kohäsion [kPa]	50
Restkohäsion [kPa]	0
Zugfestigkeit [MPa]	0,25
Restzugfestigkeit [MPa]	0
Reibungswinkel [°]	15
Restreibungswinkel [°]	10
Normalsteifigkeit [MPa/m]	2.500
Schersteifigkeit [MPa/m]	1.500

7.4 Finale Berechnungen Virtueller Demonstrator 2

Die Berechnungen des Virtuellen Demonstrator 2 werden am Modell IfG durchgeführt. Als Randbedingung sind horizontale Verschiebungen an den seitlichen Rändern, ebenso wie vertikale Verschiebungen am unteren Modellrand gesperrt. Zur Berechnung des Primärspannungszustands wird ein Überlagerungsdruck von 9,8 MPa aufgebracht. Berechnet werden insgesamt 30 Jahre, wobei in den ersten 10 Tagen der Berechnung keine Schädigung bestimmt wird. Da das Stoffmodell *TUBSalt* mit der Zeiteinheit Sekunden rechnet, musste die Zeitschrittsteuerung entsprechend angepasst werden.

7.4.1 Ergebnisse der Berechnungen am Virtuellen Demonstrator 2

Vorgelegt und diskutiert werden die Berechnungsergebnisse anhand ausgewählter Plots. Ausgewertet wird die Entwicklung der Verschiebungen und der Schädigung sowie die Vergleichsspannung. Ein weiterer Fokus liegt auf der Auswertung der Zugschädigung.

7.4.1.1 Verformungen

Abbildung 4-16 und Abbildung 7-17 zeigen die Verschiebungen im Bereich der Hauptstrecke, über den gesamten Berechnungszeitraum bzw. für die Berechnungszeitpunkte 1a, 10a, 20a und 30a. Nach einem Jahr liegt die Konvergenz noch unter 10 cm. Nach zehn Jahren lässt sich bereits ein deutlicher Anstieg der Konvergenzen erkennen. Die Firste hat sich mittig zwischen 50 und 60 cm gesenkt, die Sohle hat sich um 20 bis 30 cm gehoben. Nach 30 Jahren hat sich die Firste schließlich um ca. 1 m gesenkt und die Sohle um etwa 60 gehoben. Die Asymmetrie der Verformungen resultiert aus dem Aufbau des Gesamtmodells, dass neben der betrachteten Hauptstrecke noch weitere Strecken bzw. Einlagerungsfelder berücksichtigt.

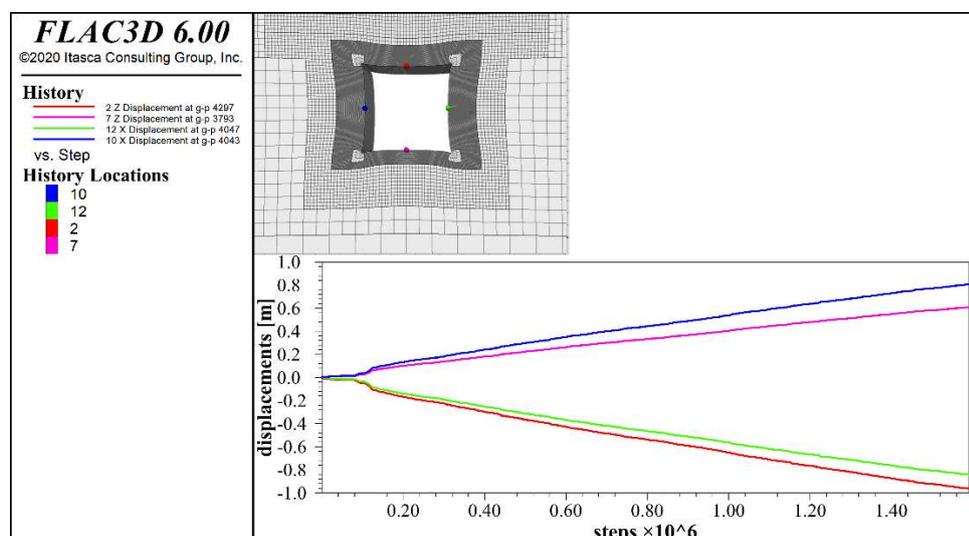


Abbildung 7-16: Größe der Verschiebungen nach 1, 10, 20 und 30 Jahren

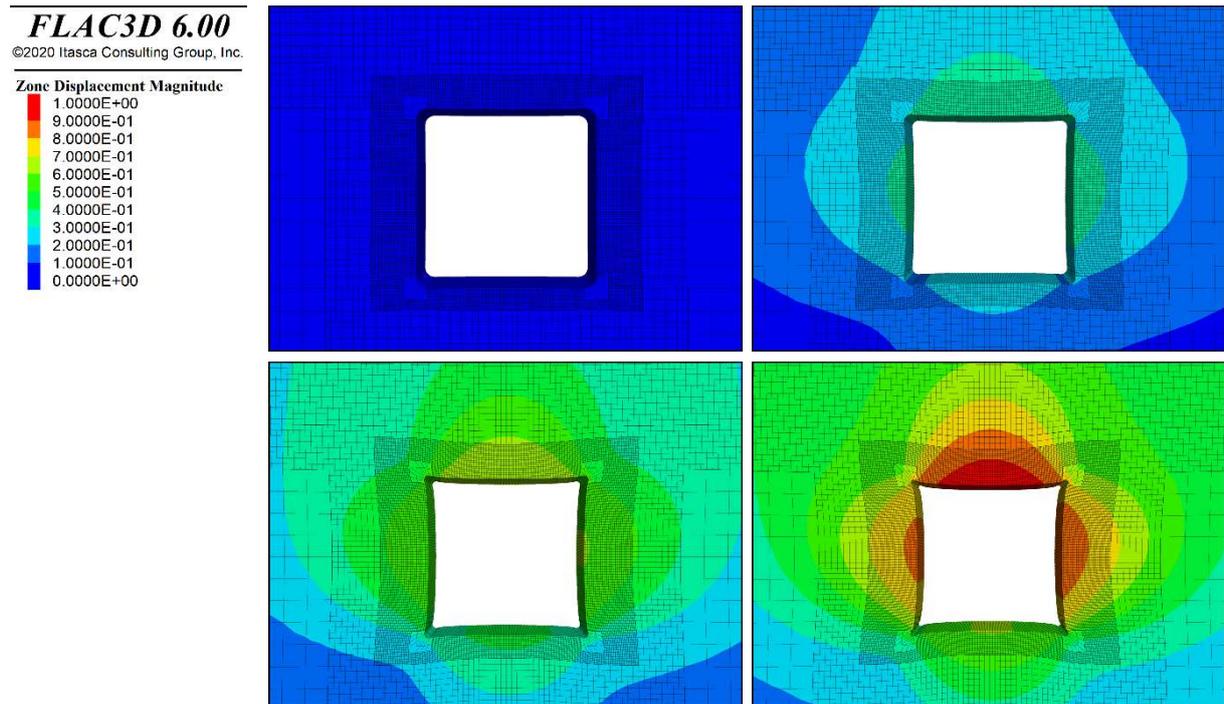


Abbildung 7-17: Größe der Verschiebungen nach 1, 10, 20 und 30 Jahren

7.4.1.2 Schädigungsvolumendehnung:

Abbildung 7-18 zeigt die Entwicklung der Schädigungsvolumendehnung im hohlraumnahen Bereich für die Berechnungszeitpunkte 1a, 10 a, 20a und 30a. Der geschädigte Bereich reicht etwa 1,5 m in das Gebirge hinein. Die Ausdehnung des Bereichs in dem Schädigung auftritt, verändert sich über die Jahre nur marginal. Während der Bereich nur marginal größer wird, wächst die Volumendehnung an. Für eine bessere Sichtbarkeit wurde für die Darstellung ein Maximalwert von $1e^{-3}$ gewählt.

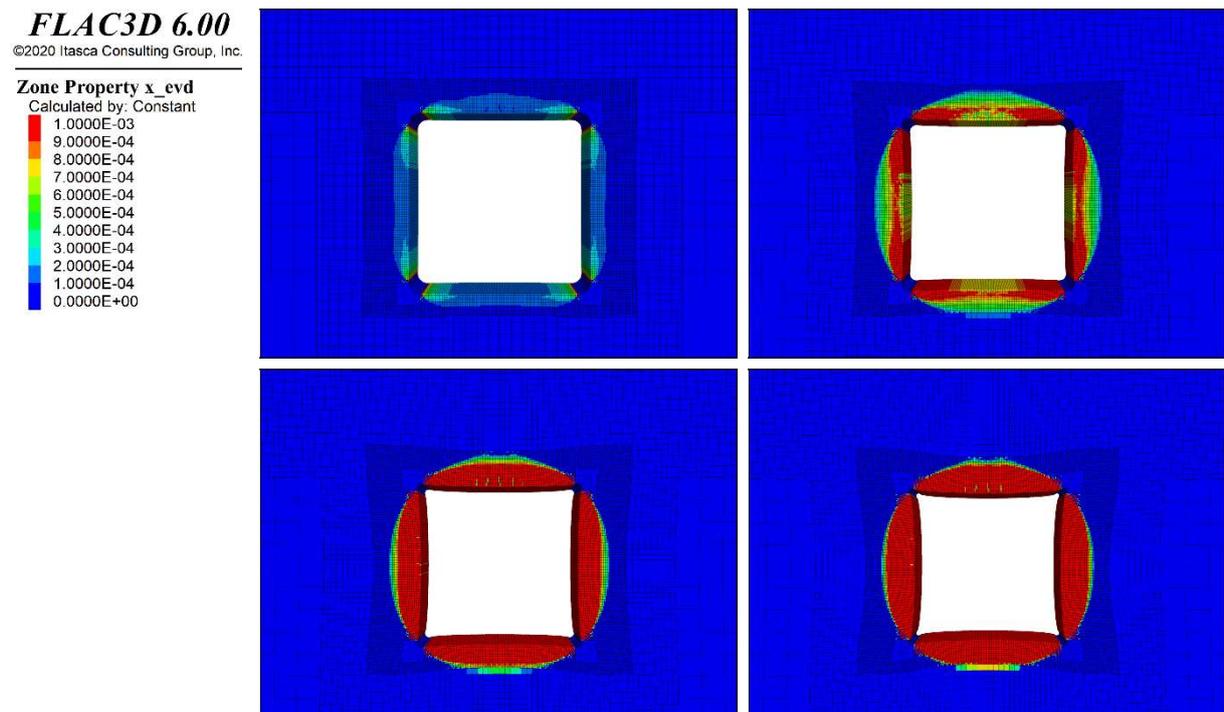


Abbildung 7-18: Schädigungsvolumendehnung nach 1, 10, 20 und 30 Jahren mit $e_{vd,max} = 1e^{-3}$

Im Vergleich mit den Partnern zeigt sich, wie bereits bei der Berechnung des virtuellen Demonstrators 1, dass die mit *TUBSsalt* berechnete schädigungsinduzierte Volumendehnung um mehr als eine Potenz geringer ausfällt. Die maximale berechnete Dilatanz liegt mit *TUBSsalt* bei etwas über $1,6e^{-3}$ (vgl. Abbildung 7-19), erwartet wird eine Schädigung in der Größenordnung von bis zu mehreren Zehnerprozenten. Eine Anpassung des Stoffmodells, die die Berechnung einer größeren schädigungsinduzierten Dilatanz ermöglicht und gleichzeitig die Nachrechnung aller Versuche adäquat abbildet, war in der Projektlaufzeit nicht möglich. Mögliche Ansatzpunkte sind die Überarbeitung der einzelnen Kriechanteile.

Abbildung 7-20 zeigt einen Plot einer Berechnung in der die Parameter des primären Kriechens um ein Vielfaches überhöht wurden. Zumindest qualitativ lässt sich sagen, dass *TUBSsalt* die Abbildung der parallel zur Streckenkontur erwarteten Risse adäquat abbilden kann.

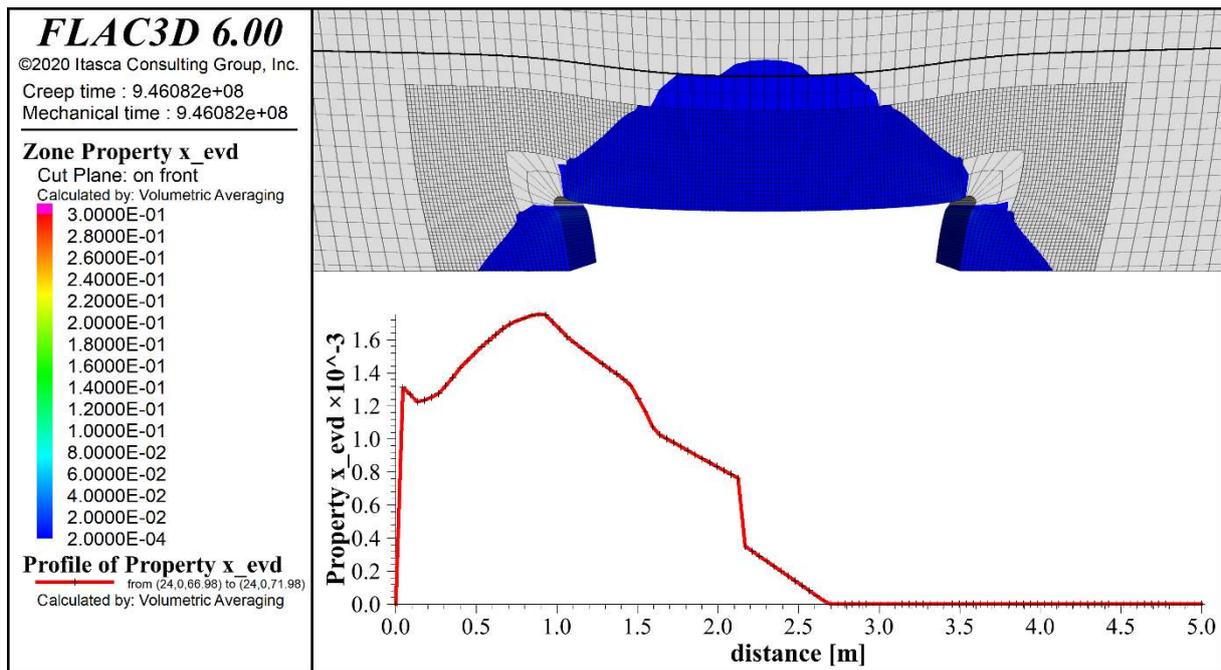


Abbildung 7-19: Schädigungsinduzierte Dilatanz, Profillinie über der Firste

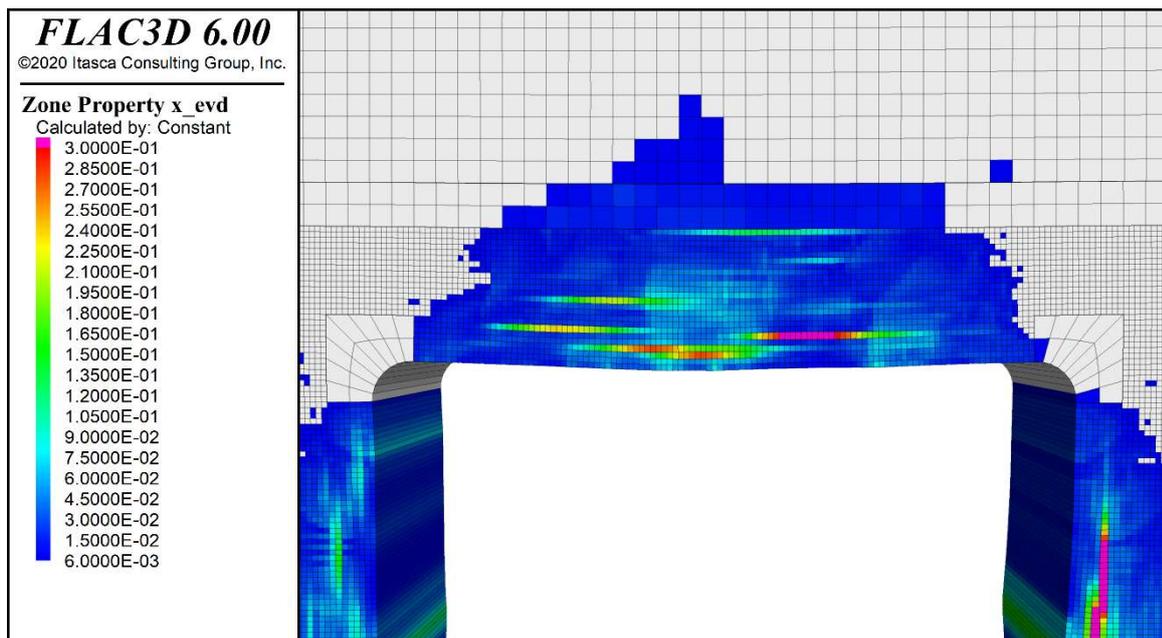


Abbildung 7-20: Schädigungsinduzierte Dilatanz (überhöhte Parameter für das primäre Kriechen)

7.4.1.3 Zugschädigung

Das Stoffmodell *TUBSsalt* weist den Zonen innerhalb der Berechnungen verschiedene Status zu. So lässt sich überprüfen, in welchen Zonen beispielsweise eine Kriechschädigung durch tertiäres Kriechen oder eine Zugschädigung stattgefunden hat. Zusätzlich zu der Information, ob ein bestimmter Mechanismus stattgefunden hat, kann mittels Kürzel ‚n‘ und ‚p‘ festgestellt werden, ob der Mechanismus im letzten Rechenschritt ‚now‘ oder in einem zurückliegenden Rechenschritt ‚past‘ stattgefunden hat. Abbildung 7-21 zeigt den Zonenstatus für den Bereich der Firste der großen Kammer für den Endpunkt der Berechnung (30 Jahre). Im Wesentlichen findet Kriechschädigung infolge tertiären Kriechens statt (blau-lila eingefärbten Zonen). Schädigung infolge von tertiären Kriechen und Zugbelastung sind in rot und pink gekennzeichnet.

Zugschädigung tritt lediglich in einigen wenigen Zonen im Bereich der Ecken auf. Über die Zeit setzt sich die Schädigung von dort weiter in das Gebirge fort. Die vergleichsweise geringen Zugschädigungen resultieren aus der geringen schädigungsinduzierten Dilatanz (vgl. Abschnitt 7.4.1.2). Die aktuelle Zugfestigkeit ist im Stoffmodell *TUBSsalt* abhängig von der aufgetretenen Schädigung (vgl. Kapitel 2.1.7).

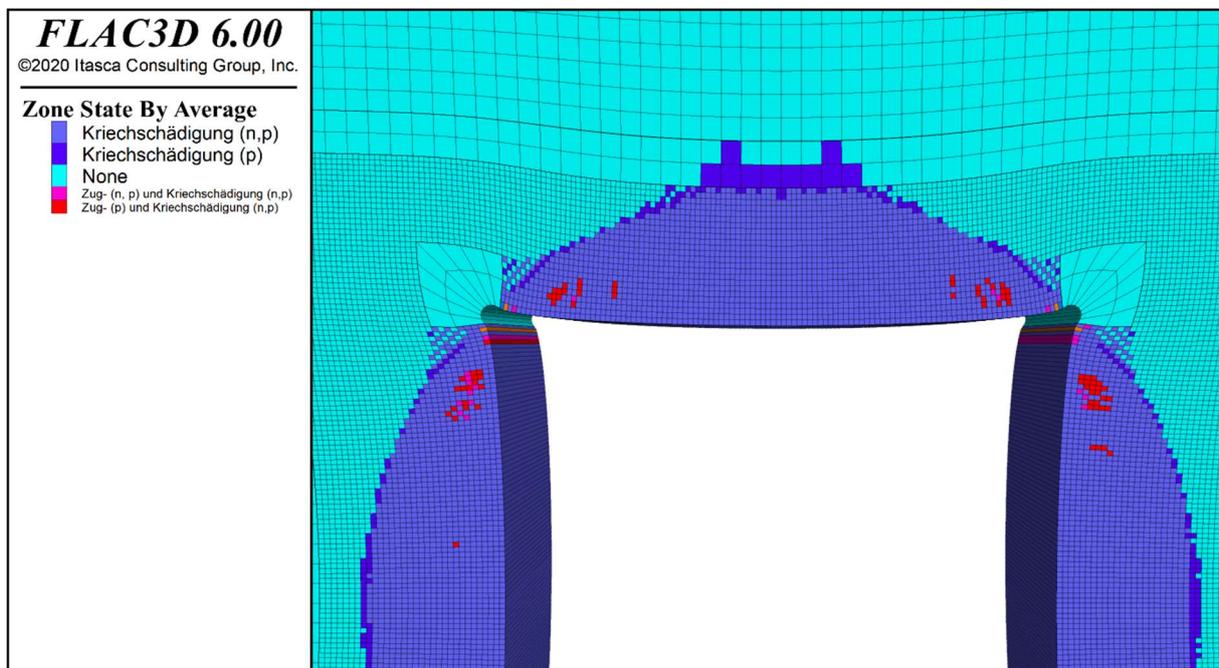


Abbildung 7-21: Zonenstatus im Bereich der Firste nach 30 Jahren

7.4.1.4 Vergleichsspannung

Abbildung 7-22 zeigt die von-Mises-Vergleichsspannung nach Ende der Berechnungszeit von 30 Jahren. Der Sprung in der Kurve zeigt die Position des Interfaces an. Aufgrund der geringen berechneten schädigungsinduzierten Volumendehnung, findet nur ein geringer Abbau der Spannungen im Hohlraumnahen Bereich statt.

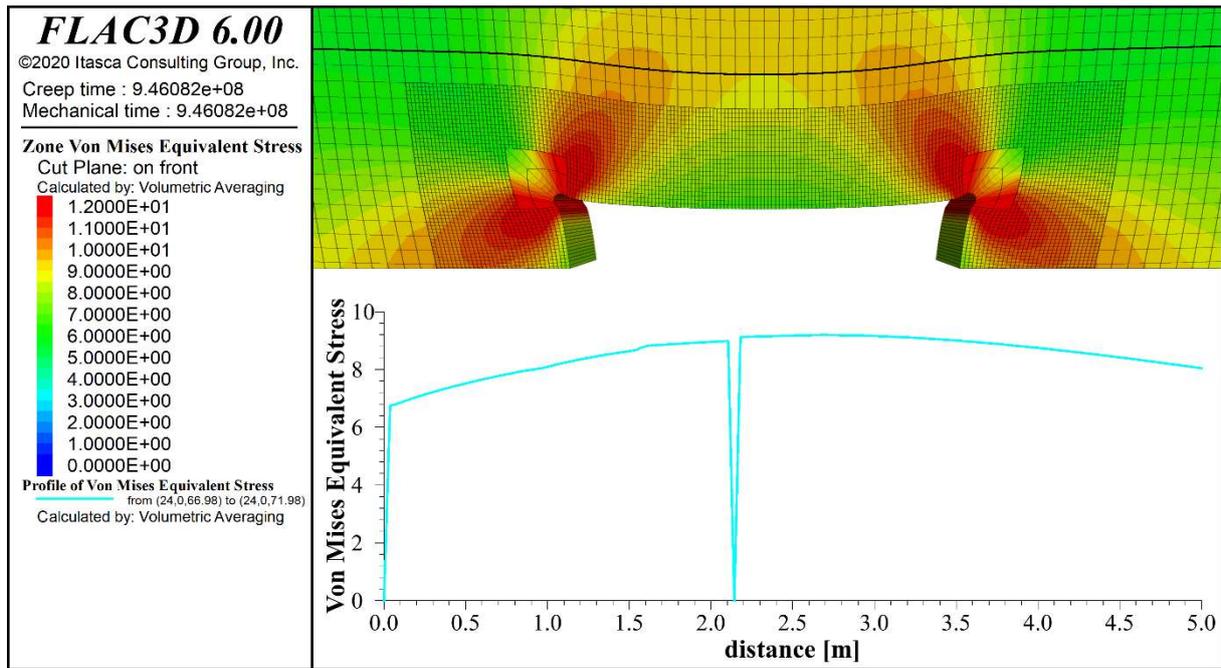


Abbildung 7-22: Von-Mises-Vergleichsspannung, Profillinie über der Firste

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verbundprojekt „Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz (WEIMOS)“ hatte zum Ziel, die existierenden Stoffmodelle für den Nachweis zur sicheren Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in untertägigen Steinsalzformationen weiterzuentwickeln und zu qualifizieren. Das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig beteiligte sich mit dem Stoffmodell *TUBSsalt*.

Im Verbundprojekt wurden umfassende Laborversuche zum Verformungsverhalten von Steinsalz bei kleinen Deviatorspannungen sowie zum Einfluss von Temperatur und Spannungszustand auf die Schädigungsrückbildung vorgenommen. Aufbauend auf den Versuchsergebnissen wurde das Stoffmodell *TUBSsalt* weiterentwickelt. Weiterhin wurden die Versuchsergebnisse zur Bestimmung der Parameter für das Modell *TUBSsalt* verwendet. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass *TUBSsalt* in der Lage ist, bei der Nachrechnung der Versuche die Ergebnisse der Versuche adäquat abzubilden.

Des Weiteren wurden Berechnungen an zwei komplexen gebirgsmechanischen 3D-Modellen, den Virtuellen Demonstratoren 1 und 2, durchgeführt. Die Berechnungen sollten die Funktionsfähigkeit des Stoffmodells an einem großen Modell zeigen und die im Rahmen des Forschungsprojektes vorgenommenen Entwicklungen demonstrieren.

Bei der Berechnung der Modelle zeigt sich, dass die Verformungen sowie die räumliche Ausdehnung des geschädigten Bereichs durch *TUBSsalt* plausibel abgebildet werden. Bei der Berechnung der schädigungsinduzierten Dilatanz werden allerdings, im Vergleich zu den weiteren Partnern, geringe Werte bestimmt. Die Größenordnung der Berechneten Schädigung liegt eine Potenz unter den Ergebnissen der Partner.

Die Schädigungsrückbildung (Verheilung) kann mit dem Modell *TUBSsalt* abgebildet werden. Aufgrund der geringen bestimmten Schädigung, findet eine schnelle Verheilung statt. Eine endgültige Validierung des Verheilungstherms ist mit Projektabschluss nicht möglich, hierzu ist das Stoffmodell zunächst dahingehend anzupassen, dass eine größere Schädigung bestimmt wird.

Vergleichbares gilt für die Beurteilung der Zugschädigung. Bei der Berechnung des zweiten Virtuellen Demonstrators wird lediglich eine schädigungsinduzierte Dilatanz im Promille-Bereich berechnet. Infolge dessen tritt nahezu keine Zugschädigung auf.

9 Summary

Joint Project WEIMOS aims to improve geomechanical rock salt models used to analyze high-level radioactive waste disposal in rock salt formations. The Institute for Geomechanics and Geotechnics of the Technische Universität Braunschweig participated in the joint project with the constitutive model *TUBSsalt*.

The project focused on the deformation behavior at low deviatoric stresses and the damage reduction and healing of rock salt. Furthermore, the deformation behavior resulting from tensile stresses and the influence of inhomogeneities (layer boundaries, interfaces) on deformation were investigated.

Laboratory experiments were used to improve the constitutive model and to determine all parameters needed for the constitutive model. The impacts of progress in the individual research areas were than demonstrated by simulating of two typical underground scenarios resembling structures at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP). Virtual Demonstrator 1 focuses on the damage reduction around a dam introduced into an open drift after 30 years. Virtual Demonstrator 2, vertical slice through part of an underground repository comprising two main drifts and seven emplacement chambers, illustrates the development of tensile damage.

The constitutive model *TUBSsalt* has proven its overall capability to achieve good results in the recalculation of the laboratory tests. In regard to the Virtual Demonstrators adjustments will still be necessary, since the order of the calculated damage induced dilatancy does not coincide with the results of the other partners.

10 Literaturverzeichnis

Buchholz, S.; Keffeler, E.; Lipp, K.; DeVries, K.; Hansen, F. (Hg.) (2019): Proceedings of the 10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation. Spent Fuel and Waste Disposition. 10th US/German Workshop on Salt Repository Research, Design, and Operation. Rapid City, May 28-30, 2019. RESPEC.

Eberth, S. (2007). „Modellansätze zum Verheilungsverhalten von Steinsalz und ihre Anwendung auf Querschnittsabdichtungen im Salinargebirge“. Dissertation. Clausthal: Technische Universität Clausthal, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften

Gährken, A., C. Missal und J. Stahlmann (2015). „A thermal-mechanical constitutive model to describe deformation, damage and healing of rock salt“. In: The Mechanical Behavior of Salt VIII. Proceedings of the 8th Conference. Hrsg. von L. Roberts, K. Mellegard und F. Hansen. London: Taylor & Francis Group (Balkema), S. 331–338

Gährken, A. (2018): Untersuchungen zum Einfluss der Spannungsgeometrie auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten von Steinsalz. Universitätsbibliothek Braunschweig.

Lowe, M. J. S.; Knowles, N. C. (1989): COSA II. Further benchmark exercises to compare geomechanical computer codes for salt : final report. Luxembourg: Commission of the European Communities, Directorate-General Science, Research and Development (Nuclear science and technology).

Missal, C.; Gährken, A. und Stahlmann, J. (2016a). „Ein thermisch-mechanisches Stoffmodell für Steinsalz mit Berücksichtigung von Schädigung, Bruch und Verheilung“. In: Geotechnik 39 (1), S. 2–17.

Missal, C.; Gährken, A. und Stahlmann, J. (2016b): Vergleich aktueller Stoffgesetze und Vorgehensweisen anhand von Modellberechnungen zum thermo-mechanischen Verhalten und zur Verheilung von Steinsalz. (Verbundprojekt: Teilvorhaben 6) Endbericht des Teilvorhabens. Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Braunschweig.

Missal, C. (2019): Numerisches Modell zur Entwicklung der Permeabilität von Steinsalz in Abhängigkeit von Schädigung, Fluiddruck und Spannungszustand. Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik. Braunschweig. <https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201903041301-0>

Norm DIN EN 12390-5, Oktober 2019: Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2019.

11 Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A_{F^t}	Faktor für Einfluss der Belastungsrichtung	
E^P	Verfestigungsmodul	MPa
F^n	Wirksame Spannung im Nachbruch	MPa
F^P	Wirksame Spannung des primären Kriechens	MPa
F^S	Wirksame Spannung des sekundären Kriechens	MPa
F^t	Fließfunktion des tertiären Kriechens und der Verheilung	MPa
FA	Faktor für Temperaturabhängigkeit	-
G	Aktueller Schubmodul	MPa
G_0	Schubmodul	MPa
G_r	Rest-Schubmodul	MPa
I_1	Erste Invariante des Spannungstensors	MPa
I_3	Dritte Invariante des Spannungstensors	MPa
J_2	Zweite Invariante des Spannungsdeviators	MPa
k	Koeffizient für Belastungsrate und Spannungszustand	-
K_0	Kompressionsmodul	MPa
m^n	Nachbruchbeiwert	-
m_*^n	Nachbruchbeiwert mit Temperatureinfluss	-
m^t	Schädigungsbeiwert	-
m_*^t	Schädigungsbeiwert mit Temperatureinfluss	-
m^v	Verheilungsbeiwert	-
m_*^v	Verheilungsbeiwert mit Temperatureinfluss	-
n_0	Anfangssteigung der Nachbruchfestigkeit	°
n_1	Maximale Nachbruchfestigkeit	MPa
n^P	Spannungsexponent des primären Kriechens	-
n^S	Spannungsexponent des sekundären Kriechens	-
p_0	Dimensionskonstante	MPa
p^{el}	Schädigungsexponent	-
p^P	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^P	-
p^S	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^S	-
Q	Aktivierungsenergie	J/mol
q^{el}	Temperaturkoeffizient für das elastische Verhalten	-
q^n	Temperaturkoeffizient des Nachbruchs	-
q^P	Temperaturkoeffizient des primären Kriechens	-
q^S	Temperaturkoeffizient des sekundären Kriechens	-
q_*^S	Temperaturkoeffizient des Spannungsexponenten	-
q^t	Temperaturkoeffizient des tertiären Kriechens	-
q^v	Temperaturkoeffizient der Verheilung	-
q^z	Temperaturkoeffizient des Zugbruchs	-
R	Gaskonstante	J/(K·mol)

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
t_0	Anfangssteigung der Dilatanzgrenze	°
T_0	Referenztemperatur	K
t_1	Maximale Fließspannung der Dilatanzgrenze	MPa
T_m	Schmelztemperatur von Steinsalz	K
η_0	Referenzviskosität	MPa·d
η^n	Viskosität im Nachbruch	MPa·d
η_*^n	Aktuelle Viskosität des Nachbruchs	MPa·s
η^p	Viskosität des primären Kriechens	MPa·d
η_*^p	Aktuelle Viskosität des primären Kriechens	MPa·s
η_{rec}^p	Viskosität des Erholungskriechens	MPa·s
η^s	Viskosität des sekundären Kriechens	MPa·d
η^t	Viskosität des tertiären Kriechens	MPa·d
η_*^t	Aktuelle Viskosität des tertiären Kriechens	MPa·s
η^v	Viskosität der Verheilung	MPa·d
η_*^v	Aktuelle Viskosität der Verheilung	MPa·s
$\dot{\epsilon}_0$	Referenzrate	1/s
$\epsilon_{d,*}$	Betrag der Schädigungskomponenten	-
$\epsilon_{v,d}$	Akkumulierte Dilatanz	-
$\epsilon_{v,d,b}$	Bruchvolumendehnung	-
$\epsilon_{v,d,b,*}$	Bruchvolumendehnung mit Temperatureinfluss	-
$\{\dot{\epsilon}^n\}$	Tensor der Nachbruchverzerrungsrate	1/s
$\{\dot{\epsilon}^p\}$	Tensor der primären Kriechrates	1/s
ϵ_{eq}	Vergleichsdehnung	-
$\epsilon_{eq,Lode}^p$	Akkumulierte primäre Kriechverzerrungen	-
$\epsilon_{eq,max}^p$	Primäre Grenzverzerrung	-
$\epsilon_{eq,min}^p$	Mindestverfestigung des primären Kriechens	-
$\{\dot{\epsilon}^s\}$	Tensor der sekundären Kriechrates	1/s
$\{\dot{\epsilon}^t\}$	Tensor der tertiären Kriechrates und der Verheilungsrate	1/s
ϵ_*^t	Betrag des Dilatanzvektors	-
θ	Lastgeometriefaktor	-
θ	Lodewinkel	-
ϑ_v	Faktor für Spannungsabhängigkeit der Verheilungsrate	-
ν^1	Beiwert zur Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit	-
ρ	Dichte	Gg/m ³
σ_{eq}	Von-Mises-Äquivalenzspannung	MPa
σ_o	Oktaedernormalspannung	MPa
$\sigma_{eq,0}^p$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^p	MPa
$\sigma_{eq,0}^s$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^s	MPa
σ^z	Aktuelle Zugfestigkeit	MPa
σ_0^z	Zugfestigkeit	MPa

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
τ_o	Oktaederschubspannung	MPa
ψ	Dilatanzwinkel	°
ψ_*^n	Dilatanzwinkel im Nachbruch	°
ψ_*^t	Dilatanzwinkel im tertiären Kriechen	°
ψ_{\max}^t	Maximaler Dilatanzwinkel im tertiären Kriechen	°
ψ_*^v	Dilatanzwinkel der Verheilung	°
$\frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \{\sigma\}}$	Ableitung der Äquivalenzspannung nach den Komponenten des Spannungstensors	-
$\frac{\partial Q}{\partial \{\sigma\}}$	Ableitung der Potentialfunktion des tertiären Kriechens	-
$\frac{\partial Q^v}{\partial \{\sigma\}}$	Ableitung der Potentialfunktion der Verheilung	-
$\frac{\partial Z}{\partial \{\sigma\}}$	Ableitung der Potentialfunktion des Zugbruchs	-
$\{\dot{\varepsilon}^z\}$	Tensor der Zugbruchverzerrungsrate	1/s

Anhang A1 - Parametersatz Asse Speisesalz

Nr.	Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	K_0	Kompressionsmodul	24.700	MPa
2	G_0	Schubmodul	14.300	MPa
3	p^{el}	Schädigungsexponent	2,2	-
4	η^p	Viskosität des primären Kriechens	5,6E+5	MPa·d
5	E^p	Verfestigungsmodul	65	MPa
6	$\sigma_{eq,0}^p$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^p	40	MPa
7	p^p	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^p	0,5	-
8	η^s	Viskosität des sekundären Kriechens	3,1E+7	MPa·d
9	$\sigma_{eq,0}^s$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^s	36	MPa
10	p^s	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^s	1,0	-
11	η^t	Viskosität des tertiären Kriechens	21	MPa·d
12	t_0	Anfangssteigung der Dilatanzgrenze	70	°
13	t_1	Maximale Fließspannung der Dilatanzgrenze	25	MPa
15	m^t	Schädigungsbeiwert	0,2	-
16	ψ	Dilatanzwinkel	40	°
17	$\varepsilon_{v,d,b}$	Bruchvolumendehnung	0,023	-
18	η^v	Viskosität der Verheilung	2,7E+6	MPa·d
19	m^v	Verheilungsbeiwert	0,55	-
20	η^n	Viskosität im Nachbruch	1600	MPa·d
21	n_0	Anfangssteigung der Nachbruchfestigkeit	60	°
22	n_1	Maximale Nachbruchfestigkeit	30	MPa
24	m^n	Nachbruchbeiwert	2,2	-
25	σ_0^z	Zugfestigkeit	2,0	MPa
26	Q	Aktivierungsenergie	28.000	J/mol
27	ρ	Dichte	2170E-6	Gg/m ³

Anhang A2 - Parametersatz WIPP clean salt (Virtuelle Demonstratoren)

Nr.	Symbol	Bezeichnung	Wert	Einheit
1	K_0	Kompressionsmodul	23.500	MPa
2	G_0	Schubmodul	13.600	MPa
3	p^{el}	Schädigungsexponent	2,4	-
4	η^p	Viskosität des primären Kriechens	4,2E+5	MPa·d
5	E^p	Verfestigungsmodul	60	MPa
6	$\sigma_{eq,0}^p$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^p	35	MPa
7	p^p	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^p	0,8	-
8	η^s	Viskosität des sekundären Kriechens	8E+6	MPa·d
9	$\sigma_{eq,0}^s$	Steigungswechsel für die Spannungsabhängigkeit von n^s	57	MPa
10	p^s	Krümmungsparameter für die Spannungsabhängigkeit von n^s	0.7	-
11	η^t	Viskosität des tertiären Kriechens	25	MPa·d
12	t_0	Anfangssteigung der Dilatanzgrenze	55	°
13	t_1	Maximale Fließspannung der Dilatanzgrenze	32,5	MPa
15	m^t	Schädigungsbeiwert	0,4	-
16	ψ	Dilatanzwinkel	17.5	°
17	$\varepsilon_{v,d,b}$	Bruchvolumendehnung	0,022	-
18	η^v	Viskosität der Verheilung	2,7E+6	MPa·d
19	m^v	Verheilungsbeiwert	0,55	-
20	η^n	Viskosität im Nachbruch	2000	MPa·d
21	n_0	Anfangssteigung der Nachbruchfestigkeit	60	°
22	n_1	Maximale Nachbruchfestigkeit	35	MPa
24	m^n	Nachbruchbeiwert	2,0	-
25	σ_0^z	Zugfestigkeit	1,0	MPa
26	Q	Aktivierungsenergie	28.000	J/mol
27	ρ	Dichte	2170E-6	Gg/m ³

Anhang B - Veröffentlichungen

Aktuelle Berichte und Veröffentlichungen zum Stoffmodell *TUBSsalt*:

Epkenhans, I.; Wacker, S.; Stahlmann, J. (2019): WEIMOS - Weiterentwicklung und Qualifizierung der gebirgsmechanischen Modellierung für die HAW-Endlagerung im Steinsalz. Tage der Standortauswahl, 13.-14.12.2019, Braunschweig

Hente, F. J.; Gährken, A.; Stahlmann, J. (2018): Einfluss des Hohlraumquerschnitts auf die Verheilung im Steinsalz, *geotechnik*, 41. Jahrgang, Heft 4, S. 264-271, Ernst & Sohn, Berlin

Gährken, A. (2018): Untersuchungen zum Einfluss der Spannungsgeometrie auf das Verformungs- und Schädigungsverhalten von Steinsalz. Dissertation. TU Braunschweig, Institut für Grundbau und Bodenmechanik. Braunschweig

Gährken, A.; DeVries, K. L.; Stahlmann, J. (2018): Advanced development of the constitutive model TUBSsalt for rock salt regarding the influence of Lode angle effects. *The Mechanical Behavior of Salt IX*, 12.-14.09.2018, Hannover

Gährken, A.; Missal, C.; Stahlmann, J. (2018): Study of an in-situ-problem under room temperature and heated conditions with the constitutive model TUBSsalt for rock salt. *The Mechanical Behavior of Salt IX*, 12.-14.09.2018, Hannover

Missal, C.; Stahlmann, J. (2018): A Relation of Anisotropic Damage and Permeability in the EDZ of Drifts in Rock Salt. *The Mechanical Behavior of Salt IX*, 12.-14.09.2018, Hannover

Eine Übersicht zu allen im Rahmen des Forschungsprojekts erschienenen Veröffentlichungen ist im Synthesebericht zu finden.

Anhang C – Formeln

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$J_2 = \frac{1}{6} \left((\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 \right) + \sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2$$
$$= \frac{1}{6} \left((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right)$$

$$I_3 = \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zz} + 2 \cdot \sigma_{xy} \cdot \sigma_{yz} \cdot \sigma_{zx} - \sigma_{xx} \cdot \sigma_{yz}^2 - \sigma_{yy} \cdot \sigma_{zx}^2 - \sigma_{zz} \cdot \sigma_{xy}^2$$
$$= \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot \sigma_3$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3 \cdot J_2}$$

$$\sigma_o = \frac{1}{3} \cdot I_1$$

$$\tau_o = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot J_2}$$