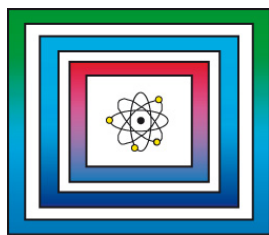


# F+E Endlagerung

9Y3214080000

## Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung auf das Deformationsverhalten



Ergebnisbericht

Hannover, August 2015

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE  
HANNOVER

F+E Endlager

Ermittlung des thermomechanischen und hydraulischen Verhaltens  
von Salzgestein

Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung auf das  
Deformationsverhalten

Ergebnisbericht

Autoren:	Schulze, Otto, Dr. Gräsle, Werner, Dr.
Auftraggeber:	BfS, Salzgitter
Auftragsnummer:	9Y3214080000 / A-0502026.A
Geschäftszeichen:	B3.4/B50112-08/2015-0002/001
Datum:	31.08 2015

Im Auftrag:

gez. V. Bräuer

Direktor und Professor Dr. V. Bräuer (Abteilungsleiter B3), Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung.....	3
1 Vorgang.....	4
2 Einleitung.....	4
2.1 Prüfplan zu den Laborversuchen.....	6
2.2 Ergebnisse zum Festigkeitsverhalten.....	7
2.2.1 Vorgaben für das Laborprogramm.....	7
2.2.2 Ergebnisse aus dem Laborprogramm.....	9
2.2.3 Untersuchungen zur Wirkung einer Einbettung in Salzgrus-Versatz.....	12
2.3 Steifemodul und Spannungsrelaxation unter Feuchte-Wirkung.....	15
2.3.1 Der Steifemodul.....	15
2.3.2 Spannungsrelaxation.....	17
2.4 Spannungsabhängigkeit der stationären Kriechrate unter Feuchte-Wirkung.....	21
3 Untersuchungen zum Deformationsverhalten von Anhydrit.....	29
3.1 Verformungsverhalten von Anhydrit bei erhöhter Temperatur.....	30
3.2 Verformungsverhalten von Anhydrit in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte.....	31
3.3 Verformungsverhalten von Anhydritmittelsalz mit scharfen Anhydrit-Steinsalz-Grenzflächen.....	32
4 Zusammenfassung.....	33
Literaturverzeichnis.....	36
Abkürzungsverzeichnis.....	40
Tabellenverzeichnis.....	41
Abbildungsverzeichnis.....	42

Gesamtblattzahl: 82

## Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Schulze, Otto, Dr. Gräsle, Werner, Dr.
Titel:	Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung auf das Deformationsverhalten
Schlagwörter:	Anhydrit, Dilatanz, Festigkeit, Feuchte-Wirkung, Kriechen, KW-Porendruck, Salzlösung

Berichtet werden die Ergebnisse aus den Labor-Untersuchungen zur Wirkung von Feuchte auf das Deformationsverhalten von Steinsalz. Dies betrifft dessen Abhängigkeit sowohl von der relativen Luftfeuchte als auch von wässriger Salzlösung unter uniaxialen und triaxialen Belastungsbedingungen.

Bei den Festigkeitsversuchen zeigt sich insbesondere bei den technisch geringstmöglichen Verformungsraten, dass die maximal aufnehmbare Spannung und die bis zum Festigkeitsmaximum erreichbare Verformung erheblich reduziert sind gegenüber denen aus einer Versuchsführung unter trockenen Bedingungen – sofern die Belastungsbedingungen im Dilatanzregime liegen. Ohne Dilatanz bleiben Feuchte-Effekte weitgehend unterdrückt.

Im Falle von Kriechversuchen wird die Abhängigkeit der Kriechduktilität von der Belastung relativ zur Dilatanzgrenze bestätigt gefunden. Ein gleichzeitiges Feuchteangebot bewirkt eine Duktilitätserhöhung nur im Falle einer Belastung im Dilatanzregime. Die Untersuchungen belegen, dass auch im Falle der durch Feuchte-Wirkung erhöhten Duktilität die Spannungsabhängigkeit der Kriechrate nichtlinear bleibt.

Es wird diskutiert, in welchem Maße die bei der BGR genutzten und einige der in der Literatur genannten Stoffgesetze zum Langzeit-Deformationsverhalten (d. h. zum stationären Kriechen) im Bereich geringer, experimentell nicht mehr praktikabler – aber in-situ relevanter – Differenzspannungen voneinander abweichen. Bei einer Differenzspannung von 2 MPa betragen die Unterschiede in den Verformungsraten bis zu ca. zwei Größenordnungen.

Anhydrit-Gestein reagiert bei mechanischer Belastung mit einem elastisch-spröden Materialverhalten. In der Literatur wird diskutiert, dass Anhydrit zwar ein gegenüber Steinsalz in der Regel vernachlässigbar geringes Kriechvermögen besitzt, aber bei einer Differenzspannung unterhalb der Sprödbrechgrenze sich doch duktil verformt. Die diesbezüglichen Laborbefunde bei der BGR weisen eine sehr geringe Kriechverformbarkeit aus.

## **1 Vorgang**

Die im Folgenden dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Arbeitspaketes 9Y3214080000 „Ermittlung des thermomechanischen und hydraulischen Verhaltens von Salzgestein“ durchgeführt.

Nachfolgend werden die für den Zeitraum vom 01.11.2010 bis 31.10.2013 geplanten und durchgeführten geowissenschaftlichen Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse zum Thema „Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung auf das Deformationsverhalten“ berichtet, womit das Erreichen des Meilensteins Nr. 15 „Einfluss von Q-Lösungen auf die Festigkeit bei in-situ relevanten Verformungsraten“ dokumentiert wird.

Die zum Themenkreis dieses Arbeitspaketes bisher erzielten Ergebnisse wurden ausführlich im Fachbericht „Projekt Gorleben: Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein“ vom Dezember 2003 dargestellt. Darauf aufbauende Untersuchungen und Ergebnisse wurden vor allem in den Tagungsbänden zu verschiedenen Salzkonferenzen publiziert (vgl. Literaturverzeichnis).

Der hier vorgelegte Bericht gibt den aktuellen Sachstand aus der Fortführung und Ergänzung dieser Arbeiten wieder. Schwerpunkt bilden die Ergebnisse aus der Untersuchung zum Thema „Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung auf das Deformationsverhalten von Steinsalz“.

## **2 Einleitung**

In diesem Arbeitspaket sollen die experimentellen und theoretischen Untersuchungen zu den mechanischen und hydraulischen Eigenschaften von Salzgestein das gesamte Spektrum der Prozesse umfassen, das dieses als Wirtsgestein für ein HAW-Endlager erfahren würde.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden an Hand von Stoffgesetzen beschrieben, wodurch die Grundlage geschaffen wird, das räumlich und zeitlich veränderliche Gesteinsverhalten zu berechnen und für eine Untertagesituation nachzubilden sowie vorherzusagen.

Den bisher in diesem Arbeitspaket erreichten Stand geben verschiedene, im anliegenden Literaturverzeichnis aufgeführte Berichte und Publikationen wieder.

Zur Beschreibung des Kriech- und Festigkeitsverhaltens von Steinsalz benutzt BGR das in Zusammenarbeit mit der Firma Dr. Andreas Hampel entwickelte CDM-Stoffgesetzsystem.

Die aktuelle Berichterstattung dazu erfolgte mit dem Bericht, der im Rahmen eines Auftrags an diese Firma vorgelegt wurde (HAMPEL 2012a). Schwerpunkte für die verbesserte Modellierung bilden die Stoffgesetz-Module zum transienten und stationären Kriechen, zum Einfluss von Feuchte auf die Festigkeit und Duktilität in Abhängigkeit von der Dilatanzgrenze, zum Volumenkriechen, zur Schädigungsentwicklung bis zum Bruch und zum Nachbruchverhalten. Der Sachstand zur Rückbildung von Schädigung im Falle der Rückkehr einer Belastung in einen Zustand ohne Dilatanzwirkung ist an anderer Stelle berichtet (SCHULZE 2007a; STÜHRENBERG & SCHULZE 2012).

Bei der BGR sind bereits verschiedene Aspekte der „Feuchte-Wirkung“ bearbeitet worden. Eine Übersicht liefern HUNSCHE et al. (2003) und dort zitierte Arbeiten. In Ergänzung zu den im Rahmen eines BGR-Arbeitspaketes erzielten Ergebnissen (SCHULZE 2007b; Kap. 4) werden an dieser Stelle die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung einer  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung auf das Festigkeitsverhalten von Steinsalz berichtet.

Hinzukommen die Ergebnisse zur Untersuchung der Spannungsempfindlichkeit des Kriechens bei Einwirkung von Feuchtigkeit. Hier geht es insbesondere um die Frage, ob eine durch Feuchte-Einwirkung erhöhte Kriech-Duktilität zu einer nur linearen Spannungsabhängigkeit der stationären Kriechrate von der Differenzspannung führt. Damit wird auch der Frage nachgegangen, ob im Falle sehr geringer Differenzspannung und entsprechend geringer Verformungsrate das Kriechvermögen eine schwächere Spannungsabhängigkeit aufweist als im Falle eines durch transkristalline Versetzungsbewegung dominierten Kriechens.

Aus den Untersuchungen u. a. von PHARR & ASHBY (1983) sowie ZHANG et al. (2007) ist bekannt, dass im Gegensatz zu wässrigen Lösungen, die beim natürlichen Steinsalz bei Vorliegen von Lösungseinschlüssen bei Dilatanz mobilisiert und wirksam werden können, entsprechend mobilisierbare KW-Einschlüsse wie auch andere chemisch inerte Stoffe keine Wirkung auf die Duktilität haben.

In einem weiteren Kapitel werden die Ergebnisse zum Dauerstandverhalten von anhydritischen Gesteinsprüfkörpern berichtet. Hier geht es um die Frage, ob ein viskoses Deformationsverhalten nachweisbar ist, wobei die Uniaxial-Kriechversuche unter Feuchte-Einwirkung oder bei hoher Temperatur durchgeführt wurden.

## 2.1 Prüfplan zu den Laborversuchen

Der Tab. 1 „Prüfplan“ ist die Übersicht zum Untersuchungsprogramm zu entnehmen. Die Uniaxial-Festigkeitsversuche wurden im klimatisierten Labor bei konstanter Temperatur von  $T = 22^\circ\text{C}$  durchgeführt. Die Temperatur wird auf  $\pm 1^\circ\text{C}$  konstant gehalten. Für die Verformung sind verschiedene Stauchraten genutzt worden und zwar  $5,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  bzw.  $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ,  $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  und  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ . Dabei wurden die Prüfkörper jeweils unterschiedlicher relativer Luftfeuchtigkeit ausgesetzt, nämlich 20 %rF sowie 45 %rF und 70 %rF.

Außerdem wurden Uniaxial-Festigkeitsversuche an Prüfkörpern durchgeführt, die in einem offenen Topf stehend auf ganzer Höhe mit einer  $\text{Mg}^{2+}$ -reichen Lösung (vgl. nachstehende Tab. 2) geflutet waren. Als Bodenkörper wurde eine geringe Menge Steinsalz-Pulver genutzt, wodurch aber keine Stützwirkung erfolgte.

Bei den Versuchen mit der Lösung ist in einigen Fällen der Ringspalt zwischen Übertopf und Prüfkörper auf voller Höhe mit Salzgrus verfüllt worden (Voll-Versatz), um das Wirken eines die Auflockerung behindernden Stützdrucks zu untersuchen. Um die tatsächlich wirkende Stützwirkung geregelt vorzugeben, ist auch ein Triaxial-Versuch durchgeführt worden, bei dem der Ringspalt zwischen Gummiummantelung und Prüfkörper ebenfalls mit Salzgrus und Lösung aufgefüllt war. Hier wurde während des Festigkeitsversuchs ein konstanter Manteldruck auf den axial gestauchten zylindrischen Prüfkörper aufgebracht.

Die Feuchte-Wirkungen bei den vier untersuchten Steinsalztypen unterscheiden sich voneinander teilweise signifikant. Untersucht wurden:

- Asse-Speisesalz (z2SP; aus den Bohrungen Asse1/94 und Asse2/94)
- Asse-Speisesalz mit „Verunreinigungen“ durch Fremdminerale (z2SP-ph, hier dominiert Polyhalit; aus der Bohrung Asse3/94)

Diese Prüfkörper stammen aus Bohrkernen, die mit einem Durchmesser von 300 mm auf der 800 m-Sohle der Schachanlage Asse sehr schonend erbohrt wurden (Bereich „Alte Tankstelle“).

- Asse-Liniensalz (z3LS; aus einer Bohrung von der 574 m-Sohle)
- Asse-Steinsalz aus dem vertaubten Kalilager (z3OS-Ro; Asse4/88 von der 490 m-Sohle)

Letzteres besteht nahezu ausschließlich aus halitischem Gestein mit einigen carnallitischen Einsprengseln.

## 2.2 *Ergebnisse zum Festigkeitsverhalten*

### 2.2.1 *Vorgaben für das Laborprogramm*

Die Ergebnisse aus uniaxialen Festigkeitsversuchen sind geeignet, die Tragfähigkeit von Stützelementen in einem Grubenbau abzuschätzen und zu bewerten. Dies ist insbesondere dann gegeben, wenn die Tragelemente sehr schlank dimensioniert sind. Dann unterliegen sie einer nahezu uniaxialen Beanspruchung.

Mit Blick auf die jahreszeitlich variierende Luftfeuchte im Wetterstrom eines Salzbergwerks oder im Falle der Flutung mit einer Salzlösung ist zusätzlich zu bewerten, in welcher Weise und mit welchem Gewicht Feuchte-Effekte das Materialverhalten und die Festigkeitseigenschaften solcher Tragelemente beeinflussen.

Im Zuge von uniaxialen Kriechversuchen ist mehrfach belegt, wie das Verformungsverhalten auf die Variation einer während des Versuchs einwirkenden Luftfeuchte reagiert. Die erhöhte Kriech-Duktilität wird auch im Falle triaxialer Beanspruchung beobachtet – sofern der Belastungszustand in den Dilatanzbereich geführt wird, vgl. Abb. 1 und Abb. 2 (SCHULZE 2007b).

In Kriechversuchen mit konstant gehaltener Differenzspannung liegen die stationären Verformungsraten üblicherweise im Bereich von  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ d}^{-1}$  (entsprechend ca.  $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ) und geringer. In Festigkeitsversuchen, die in der Regel bei mehr als 10.000-fach höherer Verformungsrate durchgeführt werden (d. h.  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), reagiert die Verformbarkeit ebenfalls auf eine gleichzeitig einwirkende Feuchte. Allerdings dominieren hier Verfestigung durch Verformung und Entfestigung durch Schädigung den Spannungs-Dehnungs-Verlauf. Dieser Sachverhalt muss beachtet werden, wenn versucht wird, aus Ergebnissen zur Kurzzeit-Festigkeitseigenschaft eine Aussage zur Dauerfestigkeit bei einer Belastung unter In-situ-Bedingungen abzuleiten.

Bei Verformungsraten von nur  $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  und noch geringer wächst der Beitrag aus dem Kriechen gegenüber dem durch Schädigung verursachten Verformungsbeitrag an, so dass durch Feuchte-Effekte verursachte Verformungsbeiträge dominanter werden können. Dies wird nachfolgend anhand der Ergebnisse aus den uniaxialen Festigkeitsversuchen unter gleichzeitiger Einwirkung von Luftfeuchte und einer  $\text{Mg}^{2+}$ -reichen Salzlösung gezeigt. Anhand der maximal aufnehmbaren Spannung (Bruchspannung) und der Verformung bis zum Bruch wird diskutiert, in welcher Weise eine Feuchte-Einwirkung das Materialverhalten im Hinblick auf die Langzeit-Tragfähigkeit beeinflusst.

Aus der Tab. 1 „Prüfplan“ ist abzulesen, bei welchen Verformungsraten und unter welcher Feuchteeinwirkung die uniaxialen Festigkeitsversuche durchgeführt wurden. Außerdem



ist abzulesen, dass neben dem hauptsächlich verwendeten Asse-Speisesalz (z2SP) auch Steinsalz aus der Asse mit polyhalitischen Beimengungen (z2SP+ph) und Liniensalz (z3LS) sowie Steinsalz aus dem vertaubten Kalilager, z3OS-Ro, geprüft wurde. Mit dem Asse-Speisesalz (z2SP) ist ein Gesteinstyp als Standard gewählt worden, der ein homogenes halitisches Gefüge ohne Störung des Untersuchungsziels durch weitere mineralische Beimengungen aufweist.

Die relative Luftfeuchte wird durch die Klimaregelung im Laborraum auf 45 %rF bei der konstant gehaltenen Temperatur von 22 °C fest vorgegeben. Für eine höhere relative Luftfeuchte als 45 %rF, die während eines uniaxialen Festigkeitsversuchs konstant zu halten war, ist in der Prüfkammer der Prüfmaschine ein geregelter Ultraschall-Vernebler genutzt worden. Eine relative Luftfeuchte von weniger als 45 %rF wurde mit Hilfe von bedarfsweise zugeführter trockener Luft geregelt. Für die Versuche mit einer Salzlösung zur Simulation einer Flutung wurde eine Mg<sup>2+</sup>-reiche Lösung mit der Zusammensetzung gemäß Tab. 2 „Mg<sup>2+</sup>-reiche Lösung“ genutzt. Bei dieser Lösung wird davon ausgegangen, dass sie sich im chemischen Gleichgewicht mit den Salzgesteinen befindet, die in einem Grubengebäude anstehen, und dass sie insbesondere im Kalilager keine Auflösung und keine Umlösung verursacht – im Gegensatz zu einer lediglich mit NaCl gesättigten Lösung. Die Mg<sup>2+</sup>-reiche Lösung ist demzufolge geeignet, im Kalilager einen Feststoff-Verlust durch Umlösung zu vermeiden, was bei Zutritt einer NaCl-Lösung, die lediglich gegenüber einem Gesteinskörper aus Steinsalz im chemischen Gleichgewicht ist, nicht der Fall wäre. Die Lösung der Zusammensetzung gemäß Tab. 2 wird daher auch „Schutzfluid“ genannt.

Die Lösung wurde über IfG, Leipzig, in einem 10-Liter-Kanister angeliefert. Sie enthält keinen Bodenkörper.

Zum Vergleich der Feuchtwirkung bei den Versuchen mit geregelter Luftfeuchte in der Prüfkammer wurde die Luftfeuchte gemessen, welche sich in einem geschlossenen System über dem „Schutzfluid“ einstellt, mit dem ein Prüfkörper vor einem Festigkeitsversuch vollständig geflutet war. Die Messungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt (22 °C), die Ablesung erfolgte nach einer Wartezeit von jeweils mindestens 18 Stunden:

- „Schutzfluid“ ohne Bodenkörper (Lieferzustand) → 47,8 %rF
- „Schutzfluid“ nach Eindampfen bei 60 °C auf 2/3 des Ausgangsvolumens, wonach ein Bodenkörper vorlag → 31,5 %rF
- „Schutzfluid“ über halitischem Bodenkörper (Asse-Speisesalz, z2SP) → 47,6 %rF
- „Schutzfluid“ über halitischem Bodenkörper (Asse-Speisesalz, z2SP), nach nahezu vollständigem Eindampfen bei 60 °C → 31,4 %rF

- „Schutzfluid“ nach Eindampfen bei 60 °C auf 80 % des Startgewichts → 31,3 %rF
- „Schutzfluid“ nach Zugabe von destilliertem Wasser auf 90 % des Startgewichts → 38,7 %rF
- „Schutzfluid“ nach Zugabe von destilliertem Wasser auf 100 % des Startgewichts → 48,7 %rF
- Kalibrierung mit 100 g destilliertem Wasser und 50 g Asse-Speisesalz, z2SP) → 74,9 %rF
- „Schutzfluid“ mit kontinuierlicher Zugabe von carnallitischem Salz (z2SF) bis zum Verbleib eines Bodensatzes: Startwert: 48,4 %rF ... Endwert: → 47,2 %rF

Demnach bleibt die relative Luftfeuchte über dem „Schutzfluid“ bei einem Bodenkörper aus dem Asse-Steinsalz (z2SP), der mit dem „Schutzfluid“ überdeckt war, unverändert im Bereich von 45 %rF bis 50 %rF. Bei Trocknung oder Zugabe von Wasser wird dieses Gleichgewicht gestört, die relative Luftfeuchte sinkt bzw. steigt entsprechend. Das Ergebnis ist reversibel, wenn auf den Ausgangszustand zurückgekehrt wird.

Für das Drei-Phasen-Gleichgewicht, das von gesättigter NaCl-Lösung dominiert wird, folgt 75 %rF als stabiler Endwert. Bei den Laborversuchen ist die Luftfeuchte auf 70 %rF begrenzt worden, um Materialverlust durch das oberflächliche „Anlösen“ eines Prüfkörpers zu vermeiden. Der für einige Festigkeitsversuche vorgegebene Feuchtwert von 45 %rF entspricht dem, der über einer Lösung gemessen wurde, die im 3-Phasen-Gleichgewicht mit einem Carnallit-Bodenkörper steht. Entsprechend hat sich die Gleichgewichtsfeuchte bei Zugabe von carnallitischem Gesteinspulver (Asse, z2SF) bis zur Bildung eines Bodenkörpers nur im Bereich um 1 %rF reduziert.

## 2.2.2 Ergebnisse aus dem Laborprogramm

Im BGR-Bericht (SCHULZE 2007b) wurde bereits dokumentiert, wie in Festigkeitsversuchen mit Wegregelung die maximal aufnehmbare Spannung  $\sigma_{max}$  und die Verformung bis zum Spannungsmaximum  $\varepsilon(\sigma_{max})$  sich verringern, wenn ausgehend von einer relativen Luftfeuchtigkeit von weniger als 50 %rF die relative Luftfeuchtigkeit auf ca. 70 %rF erhöht wurde. Dabei zeigte sich eine intensivere Feuchte-Wirkung, wenn die aufgeprägte Verformungsrate geringer wird. Eine Zusammenfassung mit Differenzierung des Materialverhaltens in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte und der Verformungsrate liefert Abb. 3. In die Darstellung konnte zum Nachweis für diese Abhängigkeiten der Versuch „20 %rF\_1.0E-8\_05049“ aufgenommen werden, obwohl der Prüfkörper aus dem Speisesalz polyhalitische Beimengungen (z2SP+ph) enthält. Diese bleiben ohne

Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten, da das Feuchteangebot mit 20 %rF – und offenkundig dann auch die Feuchte-Wirkung auf die polyhaltischen Beimengungen – vernachlässigbar gering bleibt.

Bei diesen Untersuchungen wurde bestätigt, dass mit dünner Teflon-Folie an den Stirnseiten der zylindrischen Prüfkörper die Endflächenreibung und die Verformung des Prüfkörpers reduziert werden (SCHULZE 2007b, dort Abb. 4.5 und Abb. 4.6). Als Folge der reduzierten Endflächenreibung werden generell die vergleichsweise höhere Differenzspannung und Verformung bis zum Festigkeitsmaximum erreicht. Aufgrund dieser Befunde wird mittlerweile bei allen Kriech- und Festigkeitsversuchen mit Teflon-Folie zur Reduktion der Endflächenreibung gearbeitet.

In Ergänzung zu diesen Befunden wird mit einigen der neuen Ergebnisse in Abb. 4 nachgewiesen, wie das Steinsalz auf die  $Mg^{2+}$ -reiche Lösung reagiert. Beim Asse-Speisesalz mit den polyhalitischen Verunreinigungen, z2SP+ph, werden bei Feuchte-Einwirkung stets die geringste aufnehmbare Differenzspannung und die geringste Verformung bis zum Festigkeitsmaximum erreicht. Bei Einwirken der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung ist die Reduktion von aufnehmbarer Differenzspannung und Verformung bis zum Festigkeitsmaximum ähnlich wie bei Einwirken der feuchten Luft mit 75 %rF.

Diese Abhängigkeit der Festigkeit und der Verformbarkeit vom Feuchte-Angebot bestätigen die Versuchsspuren in Abb. 5, wo die Ergebnisse aus Versuchen bei der hier geringsten Verformungsrate  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  für alle vier der untersuchten Steinsalz-Typen (vgl. Kap. 3.1) zusammengestellt sind. Da sich die grundsätzlichen Unterschiede in der Reaktion auf die Feuchte-Einwirkung gleich zeigen, wurde nicht bei jedem Versuch die Verformung bis zum Festigkeitsmaximum oder gar über das Festigkeitsmaximum hinaus geführt.

In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass im Falle der geringen Verformungsrate von  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  bis zum Erreichen einer Verformung von 1 % eine Versuchsdauer von 11,6 Tagen benötigt wird. Für eine Gesamtverformung von beispielsweise 10 % ist eine Versuchsdauer von mehr als 100 Tagen einzuplanen. Bei zusätzlichen Haltephasen in der Verformung, die zur Ermittlung der Spannungsrelaxation genutzt werden, wurden in einigen Fällen mehr als 200 Versuchstage aufgewendet. Bei vielen sogenannten Kriech- und Dauerstandversuchen wird weniger Zeit aufgewendet und demzufolge bereits abgebrochen, bevor ein stationäres Kriechen erreicht sein kann. Dieser Sachverhalt wird bei Versuchen zur Ermittlung der stationären Kriechrate oftmals nicht genügend beachtet. Mit Blick auf die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Verformungsrate ist zu beachten, dass In-situ-Verformungsraten in der Regel mehr als 100-fach geringer sind als die geringste hier genutzte Stauchrate von  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ .

Eine Gesamt-Übersicht zur maximal erreichten Spannung und der jeweiligen Verformung bis zum Festigkeitsmaximum liefert für die Versuche aus der Tab. 1 „Prüfplan“ die Abb. 6. Für die Ergebnisse mit der Stauchrate der Größenordnung  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$  stehen die Quadrat- und Rauten-Symbole, für die mit  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  die Kreis-Symbole und für die mit  $10^{-8} \text{ s}^{-1}$  die Dreieck-Symbole. Der Feuchte-Effekt zeigt sich besonders deutlich bei kleinen Verformungsraten.

Bei der geringen relativen Luftfeuchte von 20 %rF wird unabhängig von der Stauchrate die Axialspannung von 20 MPa stets übertroffen. Unterschiede folgen aus der bis zum Festigkeitsmaximum erreichbaren Verformung. Bei der geringsten Stauchrate von  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  trägt Kriechverformung vermehrt zur Gesamtverformung bei.

Unter Einwirken höherer relativer Luftfeuchte, insbesondere unter Einwirken von feuchter Luft bei 70 %rF oder der  $\text{Mg}^{2+}$ -reichen Lösung, fallen die bis zum Festigkeitsmaximum aufnehmbare Spannung und die Verformung bis zum Festigkeitsmaximum umso mehr ab, je geringer die Stauchrate ist. Das ist mit den Versuchsverläufen in Abb. 4 und Abb. 5 bereits exemplarisch gezeigt worden. Im Falle der geringen Stauchraten bleibt während fortschreitender Dilatanz (d. h. Auflockerung und Schädigung) mehr Feuchte-Wirkzeit für Kohäsionsreduktion und Umlöse-Prozesse im Gefüge. Die generell intensivere Feuchte-Empfindlichkeit für das Speisesalz mit den polyhalitischen Beimengungen bestätigt sich in dieser Zusammenstellung aller Ergebnisse. Dagegen wird für das Steinsalz aus den stratigraphisch jüngeren Bereichen (z3LS und z3OS-Ro) die tendenziell geringste Feuchte-Wirkung auf das erreichbare Festigkeitsmaximum und die bis dahin auftretende Verformung gefunden.

Zur Verdeutlichung dieser Zusammenhänge wird die Deformationsenergie genutzt. In Abb. 7.1 ist dargestellt, wie die Deformationsenergie bestimmt wird, um deren Abhängigkeit von der Verformungsrate und der Art der Feuchte-Wirkung diskutieren zu können. Das Ergebnis für die Versuche aus Tab. 1 zeigt die Abb. 7.2. Mit Hilfe der Rahmenlinien für die Ellipse wird erkennbar, dass im Falle geringen Feuchteangebotes und geringer Stauchrate wegen des Kriechbeitrags ohne konkurrierenden Kohäsionsverlust die höchste Deformationsenergie erreicht wird. Bei Einwirken eines Feuchteangebotes wird im Falle abnehmender Stauchrate der mögliche Kriechbeitrag durch den gleichzeitig wirksamen Kohäsionsverlust aufgezehrt. Dieser Sachverhalt wird durch die nahezu horizontal liegende Rechteck-Rahmenlinie nachvollziehbar.

Die gemäß Abb. 6 sowie Abb. 7.1 und Abb. 7.2 offenkundige Reduktion von aufnehmbarer Axialspannung und Verformung bis zum Festigkeitsmaximum wird nicht beobachtet, wenn der Belastungszustand unterhalb der Dilatanzgrenze bleibt. Die in Abb. 2 dargestellten Befunde belegen, dass dann Feuchte-Wirkung unterdrückt wird, weil ohne Dilatanz die für Feuchtezutritt erforderlichen Wegsamkeiten nicht entstehen bzw. sich nicht entwickeln,

sondern bei einem Spannungszustand unterhalb der Dilatanzgrenze gegebenenfalls sogar rekompaktiert werden (STÜHRENBERG & SCHULZE 2012). Auch wenn eine lokalisierte Spannungskonzentration wie beispielsweise an Fremdmineral-Einschlüssen (sogenannten Härtlingen) oder in durch Deformation besonders verfestigten Gefügebereichen lokale Gefügeschädigung schafft, entstehen dadurch keine durchgängigen Wegsamkeiten. Das heißt, diese für das Entstehen von Schädigung und Entfestigung primär verantwortlichen Gefügebereiche bleiben für Feuchtezutritt und Feuchte-Einwirkung ohne Dilatanz-Fortschritt nicht erreichbar.

### 2.2.3 Untersuchungen zur Wirkung einer Einbettung in Salzgrus-Versatz

Zur Nachbildung der Situation in einem mit Salzgrus-Versatz stabilisierten Untertage- Hohlraum können Uniaxial-Festigkeitsversuche dienen. Dafür kam der Prüfkörper ( $D_0 = 100$  mm) in einen Übertopf mit festem Boden ( $D_{Topf} = 130$  mm). Der verbleibende Ringraum wurde mit Salzgrus aus Asse-Speisesalz (z2SP) und dann bis zum oberen Rand mit der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung aufgefüllt. Aus eingefüllter Salzgrus-Menge und Volumen des befüllten Ringraumes folgt als Dichte im Versatz-Körper,  $\rho_0 = 1,54$  g/cm<sup>3</sup>, woraus mit dem Ideal-Wert  $\rho_{Halit} = 2,165$  g/cm<sup>3</sup> eine Einbau-Porosität von  $\Phi_0 = 29$  % berechnet wird.

Die Abb. 8 zeigt die Versuchsspuren zur Festigkeitsprüfung in diesem Versuchsaufbau mit der Verformungsrate  $1,0 \cdot 10^{-7}$  s<sup>-1</sup> für das reine Asse-Steinsalz (z2SP) und für das Steinsalz mit polyhalitischen Beimengungen (z2SP+ph). Bei diesen Versuchen mit der Stützwirkung durch den Voll-Versatz wird die mit der Prüfmaschine maximal mögliche Axialkraft ausgeschöpft. Beim technisch bedingten Endwert von ca. 35 MPa ist das Festigkeitsmaximum noch in keinem Fall erreicht. Im Fall des Versuchs 08031, bei dem der Voll-Versatz mit der Lösung aufgefüllt war, ist nach dem Ausbau die Porosität des verdichteten Versatz-Körpers ermittelt worden:  $\rho_{fin} = 1,76$  g/cm<sup>3</sup>,  $\Phi_{fin} = 19$  %.

Die seitliche Stützwirkung durch den Versatz-Körper konnte bei diesem Versuchsaufbau nicht gemessen werden. Aufgrund der Abnahme in der Porosität von  $\Phi_0 = 29$  % auf  $\Phi_{fin} = 19$  % ist davon auszugehen, dass die Stützwirkung, d. h. die Minimal-Spannung auf den Prüfkörper, im Zuge der Stauch-Verformung des Prüfkörpers anwächst.

Um die Abhängigkeit der Fluid-Wirkung von der Minimal-Spannung kontrolliert untersuchen zu können, wurde auch noch ein Triaxial-Versuch durchgeführt. Für diesen wurde der Prüfkörper aus Asse-Speisesalz (z2SP) mit einem Außendurchmesser von 60 mm in einen Gummi-Schutzschlauch mit einem Durchmesser von 100 mm gesteckt und der verbleibende Ringraum mit Salzgrus aus Asse-Speisesalz verfüllt. Anschließend erfolgte die Zugabe der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung bis auf ca. halbe Füllhöhe, wodurch im Versatz ein freies Poren-Reservoir für den Zutritt von Lösung aus der zu erwartenden Versatz-

Verdichtung verblieb. Dadurch wurde vermieden, im Porenraum des Versatz-Körpers einen Fluiddruck aufzubauen, der Fluid in den Prüfkörper treibt und dort einen Porendruck aufbaut, welcher der äußeren Druck-Spannung entgegenwirkt.

Der Triaxial-Versuch wurde als Kriechversuch durchgeführt. Dadurch bleibt mehr Zeit als bei einem Kurzzeit-Festigkeitsversuch für die in Abhängigkeit vom Dilatanz-Zustand mögliche Fluid-Infiltration. Außerdem können die sich einstellenden Kriechraten mit denen verglichen werden, die gemäß einem Kriechgesetz vorhergesagt werden. Als Bezug wird hier das Kriechgesetz BGRa genutzt. Die Temperatur blieb während des gesamten Versuchs konstant bei  $T = 30\text{ °C}$ . Anhand Abb. 9.1 kann der Versuchsverlauf verfolgt werden. Nach einer kurzen Andruck- und Setzphase (Differenzspannung  $\sigma = 0,5\text{ MPa}$ ; Manteldruck  $p = 0,2\text{ MPa}$ ) liegt der Spannungszustand mit der Differenzspannung von 10 MPa oberhalb der Dilatanzgrenze. Nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) gilt:  $\sigma_{dil}(p = 0,2\text{ MPa}) \approx 1\text{ MPa}$ .

Die aufgebrachte Differenzspannung von 10 MPa verursacht nur wenig Verformung – und daher entsprechend wenig Gefüge-Schädigung und Auflockerung für Wegsamkeiten zum Feuchtetransport. In diesem Versuchsabschnitt wird eine Gesamtverformung von ca. 0,8 % erreicht. Eine spontane Reaktion auf das Feuchte-Angebot, wie sie in bereits aufgelockertem Steinsalz gemäß Abb. 1 und Abb. 2 sonst gefunden wird und wie sie im Falle des Uniaxial-Kriechversuchs (Abb. 1) bereits auch nach nur ca. 1 % Verformung zum beschleunigten (tertiären) Kriechen führt, tritt hier nicht auf.

In diesem Versuch bleibt die Kriechrate trotz eines Spannungszustands im Dilatanz-Regime im Bereich der Größenordnung, die gemäß dem Kriechgesetz BGRa für stationäres Kriechen vorhergesagt wird. Für Angaben zum Kriechvermögen werden abgestufte Kriechklassen genutzt (HUNSCHE et al. 2003; SCHULZE & PLISCHKE 2010). Für BGRa gilt per definitionem die Kriechklasse  $K = 5$ :  $\dot{\epsilon}(K) = 2^{K-5} \cdot \dot{\epsilon}(BGRa)$ .

In Abb. 9.1 weist das Asse-Speisesalz nach dem Abklingen des transienten Kriechens in Versuchsabschnitten mit annähernd stationärem Kriechen jeweils ein zwei- bis dreifach höheres Kriechvermögen aus. Eine erhöhte Duktilität oder eine Entfestigung mit Kriechbeschleunigung wird während der ersten ca. 120 Tage Versuchszeit unter der Differenzspannung von 10 MPa noch nicht registriert. Die Kriechrate bleibt annähernd stationär, bzw. erreicht kurz nach jedem Eingriff durch Manteldruck-Erhöhung wieder stationäres Kriechverhalten.

Für eine durch Feuchte-Wirkung erhöhte Duktilität ist offenbar nicht ausreichend, einen Spannungszustand im Dilatanzregime vorzugeben. Erforderlich ist ein Mikroriss-Netzwerk, das im zuvor intakten Gefüge durch Verformung mit Dilatanz erst geschaffen werden muss. Nur dann können Feuchtezutritt in Gefügebereichen mit Deformationsverfestigung, deren von Feuchte unterstützte Erholung und die daraus resultierende Duktilitätssteigerung stattfinden.

Im weiteren Versuchsverlauf wurde der Manteldruck erhöht – also die Minimal-Spannung angehoben, was der Entwicklung in einer versetzten Strecke im Zuge von Konvergenz entsprechen soll. Dadurch ist der Spannungszustand nicht mehr im Dilatanzbereich. Dies ist in Abb. 9.1 daran zu erkennen, dass die Differenzspannung unter der “Dilatanzgrenze C+H“ liegt. Zu Versuchsbeginn gilt:  $\sigma_{dil}(p = 0,2 \text{ MPa}) \approx 1 \text{ MPa}$ . Durch das stufenweise Anheben des Manteldrucks folgt für den Abschnitt kurz vor dem 120. Tag  $\sigma_{dil}(p = 2 \text{ MPa}) \approx 8 \text{ MPa}$  und danach  $\sigma_{dil}(p = 5 \text{ MPa}) \approx 16 \text{ MPa}$ .

Anhand der Spannungsempfindlichkeit der Kriechrate soll der Frage nachgegangen werden, ob die während der vorhergehenden Versuchsphase im Dilatanz-Regime mögliche Einwirkung von Lösung in Form von Entfestigung durch Kohäsionsverlust (BRODSKY & MUNSON 1991) oder Duktilitätssteigerung durch Drucklösung (URAI et al. 1986, SPIERS & CARTER 1998) wirksam war. Damit soll zusätzlich geprüft werden, ob das dafür erforderliche Eindringen von Lösung in den Salzkörper stattfinden konnte und die Lösung dort Korngrenzen und Mikro-Risse benetzt hat.

Zur Ermittlung der Spannungsabhängigkeit der Kriechrate ist bei dem in Abb. 9.1 wiedergegebenen Versuch die Differenzspannung zweimal erhöht worden, von 10 MPa auf 12 MPa und nach Rücknahme auf 10 MPa später auf 14 MPa. Die Kriechrate steigt zunächst jeweils stärker an, als gemäß BGRa vorhergesagt wird. Allerdings wird in den jeweiligen Laststufen das stationäre Kriechen wegen der dafür zu kurzen Prüfphasen nicht ganz erreicht und daher das Kriechvermögen jeweils überschätzt. Die am Ende eines Versuchsabschnitts abgelesenen quasi-stationären Kriechraten liefern ein Kriechvermögen geringer als Kriechklasse  $K = 8$ . Damit bleibt das Kriechvermögen im Rahmen dessen, was auch sonst für das generell duktilere Speisesalz gefunden wird.

Aus den annähernd stationären Kriechraten in den Spannungsstufen bei 12 MPa und 14 MPa wird der Spannungsexponent  $n = 4.2$  ermittelt. Im Falle der Rücknahme der Differenzspannung von 14 MPa auf 10 MPa am Ende des Versuches folgt sogar  $n > 10$ .

Der Spannungsexponent von nahezu  $n = 5$  bei gesteigerter Spannung und der noch höhere Wert nach Rücknahme der Differenzspannung sind eindeutige Belege für die Dominanz einer von transkristalliner Versetzungsbewegung getragenen Verformung. Ein Spannungsexponent verschieden von  $n > 1$  und das Nachwirken von Dehnungsverfestigung kann nämlich nicht auftreten im Falle eines Kriechens, das primär von Feuchte-Wirkung nach Auflockerung mit Kriechen unter Drucklösung (pressure solution creep: SPIERS et al. 1990; URAI & SPIERS 2007) und schließlich bei Kohäsionsverlust durch Entfestigung und Kriechbeschleunigung getragen wird (ZHANG et al. 2007; HUNSCHE et al. 1996, eq. 5; SCHULZE 1984).

Diese Befunde bestätigen, dass der unter Uniaxial-Bedingungen unter Einwirken hoher relativer Luftfeuchte (70 %rF) und auch bei Einwirken der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung gefundene Feuchte-Effekt im Falle einer seitlichen Einspannung unterdrückt wird – beispielsweise über Versatz als Stützmaterial. Die stoffgesetzliche Beschreibung der an den Spannungszustand relativ zur Dilatanzgrenze gekoppelten Wirkung von Feuchte auf das Verformungsverhalten liefern die Arbeiten von HUNSCHE & SCHULZE (2002), HUNSCHE et al. (2003) sowie HAMPEL (2012a).

Im Nachgang zu diesem Versuch ist geprüft worden, ob der Prüfkörper während des Kriechversuchs im Dilatanz-Regime überhaupt Wegsamkeiten für den Zutritt der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung in das Korn-Gefüge erhalten hat. Dazu ist der Prüfkörper nach Ausbau (vgl. Abb. 9.2) bei  $T = 40\text{ °C}$  über zwei Wochen getrocknet worden. Der Masse-Verlust des anfangs oberflächlich bereits trockenen Prüfkörpers betrug noch  $\Delta M/M \approx 1,5\%$ . Anschließend wurde der Prüfkörper für die Bestimmung der Porosität von oberflächlicher Auflockerung durch Abdrehen auf einer Drehbank für die Messung in einem Pycnometer überarbeitet. Durch das Abdrehen der Oberfläche und das Kürzen wurden ca. 40 % des Ausgangsvolumens des deformierten Prüfkörpers entfernt. Mit einem Pycnometer wurde eine Porosität von 0,9 % ermittelt. In einem Gerät zur Bestimmung der Permeabilität (Typ: Hassler-Zelle) wurde unter dem isostatischen Druck  $p_{iso} = 5\text{ MPa}$  bei stationärer Durchströmung mit trockenem  $N_2$ -Gas,  $p_{gas} \leq 2,5\text{ bar}$ , die Permeabilität  $k \approx 4,5 \cdot 10^{-15}\text{ m}^2$  ermittelt. Die Ergebnisse aus der Nachuntersuchung belegen anhand der Rohdichte zu Beginn des Kriechversuchs  $\rho_0 = 2,164\text{ g/cm}^3$  und der Enddichte  $\rho_{fin} = 2,142\text{ g/cm}^3$  außerdem, dass im Prüfkörper während des Kriechversuchs Auflockerung und Wegsamkeiten für den Zutritt der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung geschaffen wurden.

## 2.3 *Steifemodul und Spannungsrelaxation unter Feuchte-Wirkung*

### 2.3.1 **Der Steifemodul**

Bei den Untersuchungen zur Feuchte-Wirkung ging es bisher darum nachzuweisen, welche diese auf die in Festigkeitsversuchen mit einer Wegregelung maximal erreichbare Spannung und auf die Verformung bis zum Festigkeitsmaximum sowie auf die bis zum Festigkeitsmaximum aufnehmbare Deformationsenergie hat. In Ergänzung dazu wurde in einigen Versuchsabschnitten auch der Steifemodul bestimmt. Dieser folgt bei der Versuchsführung in Weg-Regelung nach einem Relaxationsversuch aus dem quasi-linearen Wiederanstieg in der Spannung-Verformung-Kurve oder aus der  $d\sigma/d\varepsilon$ -Steigung in zusätzlichen Ent- und Wiederbelastungsschleifen. Während der Relaxation gilt:  $\dot{\varepsilon} = 0$ . Dabei wird die zuvor erzeugte Deformationsverfestigung durch Kriechen zum Teil abgebaut. Die zur Konstanthaltung der Verformung erforderliche Spannung klingt entsprechend ab. Zur Fortsetzung des Versuchs zwecks Ermittlung des weiteren Spannungs-Verformungs-



Verhaltens wird wieder die gleiche Deformationsrate wie zuvor aufgeprägt:  $\dot{\varepsilon} = const.$  Dabei folgt zunächst ein steiler Anstieg im  $\sigma - \varepsilon$ -Verlauf, aus dem der Steifemodul  $E^* = d\sigma/d\varepsilon$  abgeleitet wird. Bei Annäherung an die zuvor bereits erreichte Fließspannung flacht der  $\sigma - \varepsilon$ -Verlauf wieder ab, weil inelastisches Spannungs-Verformungs-Verhalten wieder dominant wird. Für die zusätzlichen Ent- und Wiederbelastungsschleifen wird nur das Vorzeichen der Wegrampe gewechselt. Beispiele zeigen Abb. 10 und Abb. 11, im Falle von Abb. 10 neben einem zeitlich aufgelösten Relaxationsversuch auch noch die in diesem Versuch stets nachfolgende Belastungsschleife. Wegen des erheblichen Zeitbedarfs bei der Durchführung derartiger Versuche wurde der Steifemodul  $E^*$  in der Regel sonst allein aus dem Wiederanstieg der Spannung nach einem Relaxations-Abschnitt bestimmt (vgl. Abb. 11) – also ohne Zyklus. Durch diese Versuchsführung lässt sich die Entwicklung des Steifemoduls  $E^*$  bei fortschreitender Verformung in Abhängigkeit vom Spannungsverlauf verfolgen. Angemerkt sei, dass die Größenordnung des Steifemoduls im Größen-Bereich bleibt, der nahezu allein linear-elastisches Verhalten mit  $E^* \approx 20$  GPa anzeigt. Für den dynamischen Elastizitätsmodul von Steinsalz wird aus Messung der Ultraschall-Laufzeiten in der Regel  $E_{dyn} = 36$  GPa gefunden.

Nach Ausweis der Beispiele bleibt der wiederholt ermittelte Steifemodul  $E^* = d\sigma/d\varepsilon$  bis zum Festigkeitsmaximum immer nahezu konstant. Da im quasi-linearen Bereich des  $\sigma - \varepsilon$ -Verlaufs der Anstieg allerdings extrem steil ist, resultieren für den Steifemodul Werte, die in Abhängigkeit vom gewählten  $\sigma - \varepsilon$ -Kurvenabschnitt innerhalb einer gewissen Bandbreite liegen. Zur Reduktion der Ablesungsunsicherheit wurde für die Darstellung in Abb. 10 der Maximalwert  $E_{max}^*$  aus der  $\sigma - \varepsilon$ -Tangente zu Beginn des quasi-linearen Abschnitts abgelesen. Aus der Sekante im mittleren Drittel des Ordinatenintervalls folgt der nachfolgend nicht mehr diskutierte Minimalwert  $E_{min}^*$ .

Zum Nachweis der Feuchte-Wirkung auf den Steifemodul  $E^*$  dient Abb. 12. Dargestellt ist der Steifemodul  $E^*$  als Funktion der Axial-Verformung  $\varepsilon$ . Es handelt sich um Ergebnisse aus Versuchen, die bei Einwirken einer relativen Luftfeuchtigkeit von 20 %, 50 % oder 70 % sowie der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung durchgeführt wurden. Diese Darstellung bestätigt, dass der Steifemodul  $E^*$  im gesamten Verformungsbereich nahezu konstant bleibt. Allerdings werden im Falle von Feuchte-Einwirkung durch  $Mg^{2+}$ -reiche Lösung bzw. durch feuchte Luft (70 %rF) die bis zum Maximum der Festigkeit generell geringeren Verformungen und die generell geringeren Steifemoduli gefunden. Dabei zeigt sich wieder, dass das Steinsalz mit den polyhalitischen Beimengungen am empfindlichsten reagiert.

In Abb. 13 sind die Ergebnisse zum Steifemodul  $E^*$  über der normierten Verformung  $\varepsilon_{norm}$  aufgetragen. Die Normierung erfolgte mit der Verformung, die im jeweiligen Uniaxial-Festigkeitsversuch bei der Maximal-Spannung erreicht worden ist:  $\varepsilon_{norm} = \varepsilon/\varepsilon(\sigma_{max})$ .

Mit der Zusammenstellung der Ergebnisse in Abb. 12 und Abb. 13 soll belegt werden, dass der Steifemodul  $E^*$  – selbst im Falle eines durch Feuchte-Wirkung generell reduzierten Steifemoduls – bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu konstant bleibt, obwohl bei aufgeprägter Verformung insbesondere unter uniaxialer Belastung wegen Dilatanz Schädigung und Entfestigung kontinuierlich zunehmen. Hier gilt jedoch, dass nach einer Spannungsrelaxation zu Beginn der Wiederbelastung zunächst das nahezu linear-elastische Materialverhalten dominiert und Schädigung sowie Entfestigung bewirkende Verformung erst wieder überwiegt, wenn die zuvor erreichte Deformationsverfestigung (d. h. die Spannung zu Beginn des Relaxationsversuchs) erneut erreicht wird und mit fortschreitender nicht-elastischer Verformung auch Riss-Öffnung sowie Schädigungsentwicklung wieder einsetzen.

Wenn in einem Salzbergwerk ein Hohlraum sich durch Konvergenz wieder schließt, verringert sich die Differenzspannung, welche Konvergenz bewirkt und Dilatanz bewirkt hat. Dieser Prozess soll mit Laborversuchen zur Spannungsrelaxation nachgebildet sein. Demzufolge wird in der Auflockerungszone um einen Untertage-Hohlraum nach Ausweis der Laborbefunde auch dort der Steifemodul nahezu nicht abnehmen. Dieser Sachverhalt ist bei Modellberechnungen zur Konvergenz unter In-situ-Bedingungen zu berücksichtigen, wenn das Spannungs-Verformungs-Verhalten zutreffend modelliert werden soll.

### 2.3.2 Spannungsrelaxation

In Abb. 10 (Versuch 08033, z2SP, 50 %rF,  $T = 22\text{ °C}$ ,  $\dot{\varepsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7}\text{ s}^{-1}$ ) und Abb. 11 (Versuch 05035, z2SP+ph, 20 %rF,  $T = 22\text{ °C}$ ;  $\dot{\varepsilon} = 1,0 \cdot 10^{-8}\text{ s}^{-1}$ ) werden Versuchsabschnitte mit Spannungsrelaxation herausgestellt, die während Haltephasen in den Festigkeitsversuchen mit Wegregelung aufgezeichnet wurden. Die besondere technische Anforderung bei der Ermittlung der Spannungsrelaxation besteht in der Konstanthaltung der Gesamtverformung des Prüfkörpers ( $\varepsilon = \text{const} \Leftrightarrow \dot{\varepsilon} = 0$ ) über die gesamte Haltephase. Nur so kann die Abnahme der Spannung ermittelt werden, die allein durch „innere“ Kriechverformung verursacht wird. Im Falle einer instabilen Konstanthaltung der Gesamtverformung würden sich Änderungen in der Spannung überlagern, die aus einer elastischen Reaktion des Gesteins resultieren. Ein Beispiel für die in diesen Versuchen erreichte Regelgüte zur Weg-Konstanthaltung gibt die Abb. 14. Die Axial-Verformung eines Prüfkörpers wird über den Mittelwert von drei Weg-Aufnehmern gemessen, die um  $120^\circ$  gegeneinander versetzt sind. Während eines Relaxationsversuchs kann die Weg-Anzeige  $L$  für einen Einzelweg auf  $\Delta L = 1\text{ }\mu\text{m}$  konstant gehalten werden. Dokumentiert ist in diesem Beispiel die Wirkung einer Störung in der Weg-Konstanthaltung, die am Ende dieser Prüfphase auftrat. Wegen spontan elastischen Materialverhaltens folgt aus dem Sprung in der Weg-Konstanthaltung von 1 mm ein Sprung im Spannungsverlauf von 0,2 MPa. Diese Größenordnung wird mit Ansetzen des theoretischen Elastizitätsmoduls für Steinsalz von  $E^* = 36\text{ GPa}$  bestätigt.

Aus dem in Abb. 11 gezeigten Festigkeitsversuch 05035 (z2SP+ph, 20 %rF) wurde für jeden Abschnitt, der eine Relaxationsprüfphase enthält, in der Form  $\sigma(t-t_0)/\sigma(t=t_0)$  als Funktion der Relaxationszeit  $(t-t_0)$  herausgezogen. Das Ergebnis ist in Abb. 15 zusammengefasst. Beim Versuch 08029 (z2SP, 50 %rF) wurde in gleicher Weise vorgegangen. Das Ergebnis für diesen Versuch zeigt Abb. 16. Ein weiteres Ergebnis zeigt Abb. 17 für den Versuch 08032 (z2SP; Mg<sup>2+</sup>-Fluid). Allen Befunden ist gemeinsam das nahezu stets deckungsgleiche Abklingverhalten für die normierte Spannung  $\sigma(t-t_0)/\sigma(t=t_0)$  als Funktion der Relaxationszeit  $(t-t_0)$ .

Einen davon abweichenden Verlauf weist die Abb. 18 für den bereits in Abb. 10 gezeigten Versuch 08033 (z2SP; 50 %rF,  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ) aus. Die Überprüfung der Weg-Konstanthaltung belegt hier, dass im letzten Versuchsabschnitt es technisch nicht gelungen ist, bei der Weg-Regelung die Bedingung ( $\epsilon = \text{const} \Leftrightarrow \dot{\epsilon} = 0$ ) einzuhalten. Die Ursache liegt im progressiven Schädigungsfortschritt, die Axialspannung ist bereits auf ca. 80 % der im Festigkeitsmaximum erreichten Axialspannung abgesunken, die Verformung liegt um ca. 30 % über der bis zum Festigkeitsmaximum erreichten. Eine Schiefstellung des Prüfkörpers aufgrund ungleichmäßig werdender Verformung ist die Folge.

Nur in Fällen, in denen zu Versuchsbeginn der Kraftschluss noch unzureichend war und ein „weiches Relaxationsverhalten“ aufgrund überlagerter Artefakte vortäuschte bzw. wenn das Festigkeitsmaximum überschritten war und im Bereich des Bruch-Versagens die Weg-Konstanthaltung nicht mehr gelang, resultiert ein Abweichen vom engen Band in der Kurvenschar (vgl. Abb. 18). In der Regel konnten aber alle Versuche zur Spannungsrelaxation genutzt werden – auch die, bei denen es gelang, die Bedingung ( $\epsilon = \text{const} \Leftrightarrow \dot{\epsilon} = 0$ ) selbst nach Überschreiten des Festigkeitsmaximums einzuhalten. Dann bleiben die normierten Relaxationskurven über den gesamten Versuchsverlauf nahezu deckungsgleich.

Der Abbau einer während eines Festigkeitsversuchs aufgeprägten Differenzspannung wird wegen „Deckungsgleichheit“ demzufolge nicht von Deformationsprozessen dominiert, die vom jeweils erreichten Schädigungs- und Entfestigungsgrad bestimmt sind, sondern von einem vom Schädigungsgrad unabhängigen Kriechvermögen des Salzgesteins. Daraus ist zu schließen, dass die Spannungsrelaxation, also der Abbau einer dem Gestein eingepprägten Deformationsenergie, primär von durch transkristalline Versetzungsbewegung getragenen Kriechen bewirkt wird. Nach Ausweis dieser Befunde ist nicht sachgerecht, eine Modellierung der Spannungsumlagerung in der EDZ, also die Reduktion der Differenzspannung bei Konvergenz, mit Hilfe von durch Schädigung erhöhter Duktilität oder reduzierter elastischer Steifigkeit vornehmen zu wollen.

Anmerkung: Schlanke Pfeiler, die in einem Gebirgsbereich mit hohem Durchbauungsgrad stehen und die im Zuge von Konvergenz weiterhin ohne Stützwirkung aus dem Verbruch bleiben, können durchgehend aufgelockert sein und daher an Steifigkeit verlieren. Dies belegen Untersuchungen zum Nachbruch-Verhalten, wo die Steifigkeit von den Eigenschaften der Bruchfugen dominiert ist (vgl. Abb. 13). Eine solche Situation liegt außerhalb der hier diskutierten Untersuchungen.

Wenn der Spannungszustand in einem Gesteinsbereich im Dilatanzbereich liegt bzw. die Re-Kompaktion von geschädigtem Salzgestein unzureichend ist, so dass Wegsamkeiten für Feuchte-Zutritt bleiben, wird in diesen Gesteinsbereichen die Feuchte-Wirkung zu einer erhöhten Duktilität führen (SCHULZE 2007b; HUNSCH & SCHULZE 2002). Zur Untersuchung dieser Annahme, also ob auch die das Relaxationsverhalten tragende Kriech-Verformbarkeit von der Feuchte-Wirkung abhängt, sind die normierten Relaxationskurven von Versuchen mit unterschiedlicher Feuchte-Einwirkung in der Abb. 19 zusammengestellt. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, werden für die jeweils nahezu deckungsgleichen Relaxationskurven angepasste Modell-Kurven genutzt (gemäß SCHULZE 2011):

$$\frac{\sigma(t)}{\sigma(t_0)} = \frac{\sigma(t_\infty)}{\sigma(t_0)} + \left(1 - \frac{\sigma(t_\infty)}{\sigma(t_0)}\right) \cdot \exp\left(-\alpha \cdot \sqrt{t - t_0}\right)$$

Der Parameter  $\sigma(t_0)$  steht für die Spannung zu Beginn einer Relaxationsphase und  $\sigma(t_\infty)$  für den Grenzwert, der während der Relaxation asymptotisch erreicht wird. Bei der Darstellung handelt es sich um Versuche an Asse-Speisesalz (z2SP), in einigen Fällen enthalten die Prüfkörper polyhalitische Beimengungen (z2SP+ph). Bei der geringsten Luftfeuchte (20 %rF) klingt die Spannung am langsamsten ab, die polyhalitischen Beimengungen bleiben hier noch ohne Auswirkung (vgl. Abb. 3). Bei der Luftfeuchte von 50 %rF erfolgt das Abklingen bereits steiler. Hier liegt kein Ergebnis für das Speisesalz (z2SP+ph) vor. Für den Fall der Versuchsführung mit vollständig in die  $Mg^{2+}$ -reiche Lösung eingetauchtem Prüfkörper ist der Spannungsabfall noch steiler als bei 50 %rF. Dabei zeigt sich, dass die leichtere Löslichkeit der polyhalitischen Beimengungen die Spannungsrelaxation begünstigt (vgl. Abb. 4). Bei der Luftfeuchte von 70 %rF ist ein Unterschied im Relaxationsverhalten zwischen den beiden Speisesalz-Typen dann nicht mehr erkennbar.

In Abb. 20 werden Befunde zum Relaxationsverhalten an Steinsalz aus dem vertaubten Kalilager (Asse, z3OS-Ro, 490 m-Sohle) zusätzlich dargestellt. Nach Ausweis von Abb. 5 sowie Abb. 6 und Abb. 7.2 weist dieser Steinsalztyp gegenüber dem Speisesalz (z2SP) und noch mehr gegenüber dem Speisesalz mit polyhalitischer Beimengung (z2SP+ph) die in der Regel höhere Maximal-Spannung, die größere Verformung bis zur Maximal-Spannung und die größere Deformationsenergie bis zum Festigkeitsmaximum auf. Insofern scheinen die Befunde in Abb. 20 dazu im Widerspruch zu stehen. Sowohl bei

einer Luftfeuchte von 50 %rF als auch bei Einwirken der  $Mg^{2+}$ -reichen Lösung wird für das z3OS-Ro-Steinsalz das jeweils steilere Abklingen der Spannung gefunden. Hier ist davon auszugehen, dass während der Verfestigung mit der Versuchsführung  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  die im Steinsalz des vertaubten Ronnenberg-Kalilagers nachgewiesenen carnallitischen Mineral-Reste als „Härtlinge“ wirken. Dabei haben sich in dem während der Belastungsphase festeren z3OS- Ro-Steinsalz Wegsamkeiten für Feuchte-Zutritt bilden können, die ein selektives Anlösen der carnallitischen Einschlüsse zulassen. In der Relaxationsphase macht sich dieses Anlösen mit einem Beitrag zum von Feuchte-Wirkung unterstützten Kriechen bemerkbar.

Der Versuch, aus den Ergebnissen zur Spannungsrelaxation bei unterschiedlicher Feuchte-Wirkung das Kriechvermögen bezüglich stationären Kriechens abzuleiten, ist nicht verfolgt worden (vgl. SCHULZE 2011). In Abb. 21 ist das Relaxationsverhalten für Versuche dargestellt, bei denen die Prüfkörper zuvor bei  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$  bzw. zehnfach schneller bei  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$  verformt worden waren. Im Falle der beiden Versuche mit der höheren Verformungsrate folgt in der Relaxationsphase gleich zu Beginn der erheblich steilere Spannungsabfall. Die Linienform weicht von den Trendlinien zu den Versuchen bei der geringeren Verformungsrate charakteristisch ab. Als Ursache werden Unterschiede in der mikrostrukturellen Verfestigung unterstellt. Bei der höheren Verformungsrate ( $10^{-7} \text{ s}^{-1}$  entsprechend ca.  $10^{-2} \text{ d}^{-1}$  gegenüber bei Kriechversuchen sonst üblichen Verformungsraten von  $\leq 10^{-5} \text{ d}^{-1}$ ) ist die Mikrostruktur weniger im stationären Gleichgewicht zwischen Verfestigung und Erholung der Verfestigung, so dass bei Halt der Verformung für die Spannungsrelaxation im Falle der zuvor höheren Verformungsrate der höhere Anteil freier Versetzungen verfügbar ist. Beim weiteren Relaxationsverlauf zeigt sich in allen Fällen, dass für den asymptotischen Verlauf der Modellkurven der Grenzwert  $\sigma(t_{\infty})/\sigma(t_0)$  ist. Dieser von Null verschiedene Grenzwert widerspiegelt, dass die zuvor erzeugte Deformationsverfestigung selbst während der über einige Tage ausgedehnten Relaxationsphasen nicht so abklingt, dass ein stationäres Kriechen mit einer Mikrostruktur erreicht wird, die sich im Gleichgewicht mit der abklingenden Spannung befindet.

Unabhängig davon sind die Versuche zur Spannungsrelaxation gut geeignet, um die Feuchte-Wirkung auf Kriechprozesse über Unterschiede im Abklingverhalten und bei den asymptotischen Grenzwerten in Ergänzung zu den Befunden aus den Festigkeitsversuchen (vgl. Abb. 6 und Abb. 7.2) nachzuweisen.

## 2.4 **Spannungsabhängigkeit der stationären Kriechrate unter Feuchte-Wirkung**

Um den Kenntnisstand zur Feuchte-Wirkung auf das Kriechen zu erweitern, sind Kriechversuche durchgeführt worden, bei denen insbesondere die Spannungsempfindlichkeit der stationären Kriechrate analysiert wurde.

Für Modellberechnungen, die das Langzeit-Verhalten des Wirtsgesteins „Steinsalz“ in einem HAW-Endlager vorhersagen sollen, ist von entscheidender Bedeutung, welche Stoffgesetze für die jeweilige Belastungssituation als zutreffend erachtet und eingesetzt werden. Insbesondere für den Bereich geringer Differenzspannung ist Gegenstand der Forschung und Diskussion, welcher Spannungsabhängigkeit das Langzeit-Kriechen im Zuge von Konvergenz und entsprechender Reduktion der Differenzspannung unterliegt.

Bei der Modellierung des Langzeit-Kriechens wird davon ausgegangen, dass stationäres Kriechen vorliegt, die das Kriechvermögen determinierende Mikrostruktur sich wegen dynamischer Erholung also im stationären Gleichgewicht mit der aktuell einwirkenden Differenzspannung befindet. Damit wird davon ausgegangen, dass die Deformationsverfestigung, welche durch die Differenzspannung zuvor erzeugt wurde, nicht mehr nachwirkt. Die direkt nach dem Ausbruch des Untertage-Hohlraums wirksame Effektiv-Spannung wird nämlich im Zuge der Spannungsumlagerung und Konvergenz kontinuierlich abgebaut.

Für ein Stoffgesetz zum stationären Kriechen und zur stationären Kriechrate  $\dot{\epsilon}_{st}$  der Form (Potenzgesetz):

$$\dot{\epsilon}_{st} \sim \sigma_{eff}^n$$

gilt wegen Deformationsverfestigung, dass eine innere Rückspannung bzw. Reibspannung  $\sigma_i$  gegen die aufgewendete, äußere Spannung  $\sigma_a$  wirkt:

$$\sigma_{eff} = \sigma_a - \sigma_i$$

Im Falle stationären Kriechens ist die Reibspannung der äußeren Spannung proportional (SCHULZE 1984):

$$\sigma_{eff} = \sigma_a - \sigma_i = \sigma_a - \beta \cdot \sigma_a = \sigma_a \cdot (1 - \beta) \quad \text{mit} \quad \sigma_i = \beta \cdot \sigma_a \quad \text{und} \quad \beta = const.$$

Dieser Sachverhalt ist Voraussetzung für ein Stoffgesetz wie BGRa in Tab. 3.

Mit Laborversuchen kann die Rückentwicklung von Spannungen als Folge von dynamischer Erholung und das resultierende In-situ-Verformungsverhalten in der Regel nur begrenzt nachgebildet werden. Insbesondere Laborversuche bei Raumtemperatur oder bei nur wenig höherer Temperatur bleiben immer nur von der Qualität eines „Zeitraffer-Experiments“, wenn in einem Langzeit-Kriechversuch, bei dem das Erreichen des stationären Kriechens versuchstechnisch noch abgewartet werden konnte, eine Spannungsreduktion folgt.

Ein Beispiel dazu gibt der Triaxial-Kriechversuch bei  $T = 50\text{ °C}$  in Abb. 22. Aus den Phasen mit Erhöhung der Differenzspannung  $\sigma$  von 20 auf 22 und dann auf 25 MPa konnte ein Spannungsexponent von  $n = 7 \pm 1$  bestimmt werden, der deutlich über dem meist angenommenen Wert  $n = 5$  liegt. Für  $\sigma = 20\text{ MPa}$  nähert sich die Kriechrate asymptotisch dem stationären Wert  $\dot{\epsilon}_{st} = (1,67 \pm 0,15) \cdot 10^{-4}\text{ d}^{-1}$  (berechnet als Mittelwert aus der 1., 3. und 4. Lastphase mit 20 MPa; die 2. Lastphase war für eine Bestimmung der stationären Kriechrate zu kurz).

Nach Absenken der Differenzspannung von 20 MPa auf 15 MPa findet innerhalb des zugehörigen Prüfzeitraums von 11 Wochen nur eine geringe Verformung statt. Aus dieser Verformung kann eine stationäre Kriechrate von  $\dot{\epsilon}_{st} = (2,45 \pm 0,06) \cdot 10^{-6}\text{ d}^{-1}$  bestimmt werden. Gemäß einem Potenzgesetz mit  $n = 5$  nach dem Lastwechsel auf  $\sigma = 15\text{ MPa}$  wäre dagegen eine stationäre Kriechrate von  $\dot{\epsilon}_{st} = 4,0 \cdot 10^{-5}\text{ d}^{-1}$ , für  $n = 7$  von  $\dot{\epsilon}_{st} = 2,2 \cdot 10^{-5}\text{ d}^{-1}$  zu erwarten. Das ist nicht der Fall, die zuvor erzeugte Deformationsverfestigung wirkt in diesem Prüfzeitraum dauerhaft nach. Rechnerisch ergibt sich für die Absenkung der Differenzspannung von 20 MPa auf 15 MPa ein Spannungsexponent  $n = 14,7 \pm 0,3$ .

Selbst bei einer geringen Lastabsenkung von 20 MPa auf 19 MPa bleibt der berechnete Spannungsexponent  $n = 9,1 \pm 1,7$  deutlich (aber statistisch nicht signifikant) größer als bei Lasterhöhung. Bei einem Lastwechsel von 20 MPa auf 18 MPa wird dies mit  $n = 9,8 \pm 0,8$  noch deutlicher und auch signifikant. Bei Absenken der Last ist der Spannungsexponent also stets größer als bei der zur Ermittlung des Spannungsexponenten sonst genutzten stufenweisen Erhöhung der Differenzspannung.

Beim stufenweisen Erhöhen der Spannung bleibt die zuvor erzeugte Deformationsverfestigung ohne Nachwirkung, sie wird durch eine dann wirksamere überprägt, d. h.  $\beta = const$ . Aus diesem Grunde wird bei Untersuchungen zum Kriechvermögen in den verschiedenen Homogenbereichen einer Steinsalz-Struktur stets bzw. möglichst mit Erhöhen der Differenzspannung gearbeitet, um den „Gedächtniseffekt“ zu vermeiden, wobei für die Ermittlung von Homogenbereichen genügt, stationäres Kriechen nur annähernd zu erreichen (SCHULZE & PLISCHKE 2010).

Zum Phänomen der nachwirkenden Deformationsverfestigung und deren dynamischer, thermisch aktivierter Erholung mit transientser Verformung liegen das Grundverständnis und Modelle zur stoffgesetzlichen Beschreibung vor. Der in Abb. 22 wiedergegebene Versuchsverlauf wurde von HAMPEL & SCHULZE (2007) diesbezüglich ausführlich diskutiert (vgl. dort: Figure 2). Abweichend von HAMPEL & SCHULZE (2007) wurden die Daten hier unter Einbeziehung von Korrekturen für thermische Expansion des Prüfkörpers sowie Temperatureinfluss auf die Kriechrate entsprechend BGRa neu ausgewertet. Die stationären Kriechraten  $\dot{\epsilon}_{st}$  wurden dabei durch Anpassung einer asymptotisch abklingenden Funktion  $\dot{\epsilon}(t) = \dot{\epsilon}_{st} + b \cdot \exp(-c \cdot (t - t_0))$  an die gemessenen  $\dot{\epsilon}(t)$ -Verläufe bestimmt.

Für eine Untertage-Situation ist ausschlaggebend, dass im Zuge von Hohlraum-Konvergenz die Differenzspannung nur langsam und kontinuierlich abnimmt, wodurch Kriechen für die damit verbundene dynamische Erholung der Deformationsverfestigung aktiv bleibt. Aufgrund dieser Ergebnisse ist – im Gegensatz zu den Befunden aus den zuvor berichteten Relaxationsversuchen – dann doch gerechtfertigt, für Modellberechnungen zur Hohlraum-Konvergenz nur stationäres Kriechen ohne Nachwirken eines „Gedächtniseffekts“ anzusetzen.

Weitere Beiträge zum Thema „Langzeit-Kriechverhalten“ und den Sachstand in der Diskussion „Prozessverständnis“ liefern neben anderen die Arbeiten von HAMPEL (2012a, b), HUNSCHKE et al. (2003), SCHULZE et al. (2007), SPIERS et al. (1990), URAI & SPIERS (2007), URAI et al. (1986) und ZHANG et al. (2007).

Insbesondere aus den Untersuchungen von URAI & SPIERS (2007) folgt, dass zur Modellierung von zeitlich und räumlich veränderlicher Verformung und Spannung neben der Spannungsabhängigkeit und der Temperaturabhängigkeit des Kriechens auch noch der psc-Prozess (d. h. der von Feuchte-Wirkung getragene „pressure solution creep“-Prozess) einzubeziehen sei. Beim psc-Stoffgesetz kommt die Abhängigkeit von Parametern der Mikrostruktur hinzu (SPIERS & CARTER 1998; URAI et al. 1986). Dazu postuliert das psc-Stoffgesetz die Abhängigkeit der Kriechrate von der Korngröße, weil die als dominant wirksam erachteten Prozesse an den mikrostrukturellen Nahbereich von Korngrenzen gebunden sind. Außerdem folgt aus dem Prozess-Verständnis eine lineare Spannungsabhängigkeit der Kriechrate.

Die Herausforderung, das Stoffgesetz zu finden, welches für die Aufgabenstellung „Modellberechnungen zum Langzeitverhalten bei geringen Differenzspannungen“ als zutreffend erachtet wird, illustriert die Abb. 23. Die Labor-Untersuchungen zur Ermittlung der Spannungsabhängigkeit der stationären Kriechrate wurden überwiegend bei Raumtemperatur durchgeführt. Der mit experimentellen Untersuchungen abgedeckte Bereich ist farblich hervorgehoben. In diese Abbildung sind die Graphen zu einigen Stoffgesetzen



eingezeichnet, die in der oben genannten Literatur diskutiert werden und die für Modellberechnungen regelmäßig zur Anwendung kommen. In Tab. 3 sind die zugehörigen Stoffgesetz-Formulierungen zum stationären Kriechen von Steinsalz zusammengestellt.

Bezüglich des S&C\_psc-Stoffgesetzes ist darauf hinzuweisen, dass die experimentellen Untersuchungen, welche zur Ermittlung der Stoffgesetz-Parameter genutzt wurden, bei geringeren Korngrößen als  $d = 5 \text{ mm}$  durchgeführt wurden. Wird der für die durchgeführte experimentelle Untersuchung typische Wert  $d = 1 \text{ mm}$  eingesetzt (synthetische Steinsalz-Prüfkörper aus Pulvermaterial), folgt wegen der  $(1/d^3)$ -Abhängigkeit eine 125-fach höhere Kriechrate. Unter dieser Voraussetzung,  $d = 1 \text{ mm}$ , trifft die Modellkurve ebenfalls den experimentell zugänglichen Nachweis-Bereich.

Bei allen Stoffgesetzen – denen in Tab. 3 und anderen – werden freie Parameter benötigt, um Modellberechnungen mit Hilfe eines Stoffgesetzes an die Labor- bzw. die In-situ-Befunde anpassen zu können. Das gilt auch für Stoffgesetze, welche die Prozesse, die das Deformationsverhalten dominieren, physikalisch begründet und zutreffend abbilden. Auf diese Weise gelingt immer, innerhalb eines mehr oder weniger weiten Bereiches von Spannung und Temperatur, die Entwicklung von Verformungen und Spannungszustand zutreffend nachzubilden bzw. vorherzusagen. Bei der Extrapolation zu geringen Spannungen und entsprechend geringen Kriechraten, für die Nachweise aus experimentellen Untersuchungen nicht erhalten werden können – also außerhalb des grün umrandeten Bereichs in Abb. 23 – wird jedoch die erhebliche Divergenz in den Prognosen offensichtlich.

In Abb. 24 sind für die Stoffgesetze BGRa und S&C\_psc ( $d = 5 \text{ mm}$ ) die Graphen für  $T = 50 \text{ °C}$  hinzugefügt. Da das psc-Kriechen nach Ausweis von Tab. 3 die geringste Temperatur-Empfindlichkeit, also die geringste Aktivierungsenergie  $Q$ , von allen Stoffgesetzen aufweist, wird dessen Relevanz mit steigender Temperatur immer geringer.

In Abb. 24 ist außerdem der Befund aus fünf Uniaxial-Langzeit-Kriechversuchen an Steinsalz, ERAM RB394 und RB396, z3OS-BK/BD, eingetragen. In dem genutzten Säulen-Prüfstand werden fünf Prüfkörper gleichzeitig belastet. Die Einzelheiten zu diesem Versuch wurden ausführlich bei SCHULZE & PLISCHKE (2010) berichtet. Mit diesem Beispiel für das wenig duktile Steinsalz aus der Misch-Fazies, z3OS-BK/BD, soll darauf hingewiesen werden, dass wegen der Bandbreite im Kriechvermögen von natürlichen Steinsalz-Typen eine Extrapolation von Modell-Ansätzen nicht zielführend sein kann, welche die Abhängigkeit von den Salztyp-Eigenschaften unberücksichtigt lässt.

Für die Diskussion der Extrapolierbarkeit bleibt aber Aufgabe, die nach Ausweis von Abb. 23 und Abb. 24 erhebliche Divergenz zu bewerten, die allein aus der Spannungsabhängigkeit der Kriechrate in den Stoffgesetzen resultiert – und dies unabhängig von einer möglichen

Zusatz-Wirkung auf das Kriechvermögen durch weitere Parameter, wie beispielsweise spezifische Gefüge-Eigenschaften, die in der Regel durch die stratigraphische Stellung determiniert sind (SCHULZE & PLISCHKE 2010).

Im weiteren werden neuere Ergebnisse aus Laboruntersuchungen zur Spannungsabhängigkeit des Kriechens vorgestellt, welche wegen eines möglichen Duktilitätsbeitrags aus dem psc-Kriechen die gleichzeitige Feuchte-Wirkung einbeziehen und dabei die Ergebnisse vom Abschnitt 1.2.3 „Untersuchungen zur Wirkung von Versatz“ diesbezüglich wesentlich ergänzen.

In Abb. 25 sind die Befunde aus einem Triaxial-Kriechversuch zusammengefasst. Untersucht wurde das Kriechen eines Steinsalz-Prüfkörpers aus dem Hauptsalz, z2HS2, der aus einem Block, Kantenlänge ca. 1,5 m, gewonnen wurde. Der Block stammt aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben, Querschlag 1 West, 840 m-Sohle, in der Nähe zum Abzweig südliche Richtstrecke.

Der Triaxial-Kriechversuch wurde bei konstanter Temperatur,  $T = 22\text{ °C}$ , durchgeführt und bei dem konstant gehaltenen Manteldruck von 2 MPa begonnen. Die Differenzspannung wurde über mehrwöchige Prüf-Abschnitte konstant gehalten – und zwar zwischen 18 MPa und 25 MPa. Nach CRISTESCU & HUNSCHE (1998) tritt dann mit Dilatanz verbundene Deformation auf, da die Differenzspannung größer ist als  $\sigma_{dil}(p = 2\text{ MPa}) \approx 10\text{ MPa}$ . Um den Feuchte-Einfluss auf die Spannungsempfindlichkeit der Kriechrate zu ermitteln, die nach Spannungswechseln aus den annähernd stationären Kriechraten am Ende eines Belastungsabschnitts berechnet wird, ist vor Beginn des Versuchs auf die obere Stirnseite und zwischen Prüfkörper und Ummantelung des Prüfkörpers ca. 1 ml gesättigte NaCl-Lösung zugefügt worden.

In einem zweiten Prüfabschnitt wurde der Manteldruck auf 10 MPa erhöht. Dann bleibt der Belastungszustand ohne Dilatanz-Wirkung:  $\sigma_{dil}(p = 10\text{ MPa}) \approx 22,5\text{ MPa}$ . Dieser Abschnitt wurde zum Erhalt der Übersichtlichkeit nicht mehr in die Abb. 25 aufgenommen. Stattdessen ist ein Diagramm eingefügt, welches die abschnittsweise ermittelten, annähernd stationären Kriechraten in doppelt-logarithmischer Darstellung wiedergibt. Dabei zeigt sich anhand der Vergleichsgeraden für stationäres Kriechen gemäß einem Potenzgesetz  $\dot{\epsilon} \sim \sigma^n$ , dass im Versuchsverlauf die Spannungsempfindlichkeit stets größer ist als  $n = 1$ , das Kriechen durch ein linear-viskoses Kriechverhalten also nicht dominiert sein kann. Außerdem zeigt sich an den Kriechraten nach Spannungsreduktion, dass trotz der vorherigen Belastung im Dilatanzregime und trotz der Zugabe von gesättigter NaCl-Lösung zu Beginn des Versuchs die zuvor erzeugte Deformationsverfestigung und nicht-stationäres – und zwar invers-transientes Erholungskriechen nachwirken. Aus dem doppelt-logarithmischen Diagramm folgt für die quasi-stationären Kriechraten, dass bei einem Lastwechsel mit

Erniedrigen der Differenzspannung die Kriechrate zunächst steiler abfällt als sie – sofern Erholungskriechen hat abgewartet werden können – bei einem Lastwechsel mit Erhöhen der Differenzspannung dann wieder ansteigt (SCHULZE 1984).

Einen weiteren experimentellen Befund zur Spannungsempfindlichkeit der stationären Kriechrate bei Feuchte-Wirkung liefert Abb. 26. Wie schon in den vorhergehenden Ausführungen berichtet, entstehen im Falle der Versuchsführung unter uniaxialer Belastung unvermeidlich Wegsamkeiten im Prüfkörper, durch die Feuchte in den Prüfkörper vordringen könnte. Um die Feuchtwirkung zu untersuchen, wurde aus diesem Grunde ein Uniaxial-Kriechversuch durchgeführt, in dem der Steinsalz-Prüfkörper wie zuvor schon bei den Festigkeitsversuchen kontinuierlich mit Luft hoher relativer Feuchte umspült wurde. In den Uniaxial-Kriechprüfstand, der in einer Klimakammer mit Regelung der relativen Luftfeuchte und der Temperatur steht, können bis zu fünf Prüfkörper gleichzeitig eingebaut werden (wobei ein Prüfkörper ein irreguläres Verhalten zeigte und in der weiteren Darstellung ausgeschlossen wird). Die Temperatur wird konstant gehalten,  $T = 25\text{ °C}$ . Zur Regelung der relativen Luftfeuchte wird während der gesamten Versuchsdauer bedarfsweise trockene Luft in die Klimakammer eingespeist oder aber Wasserdampf aus einem Ultraschall-Vernebler. Vom Versuchsverlauf mit einer Gesamtdauer von ca. 400 Tagen zeigt Abb. 26 den Abschnitt mit dem Lastwechsel bei der relativen Luftfeuchte von 65 %rF, der höchsten in diesem Versuch. Die stationären Kriechraten bei  $\sigma = 12\text{ MPa}$ , bestimmt durch Anpassung der asymptotisch abklingenden Funktion  $\dot{\epsilon}(t) = \dot{\epsilon}_{st} + b \cdot \exp(-c \cdot (t - t_0))$  an die gemessenen  $\dot{\epsilon}(t)$ -Verläufe, unterscheiden sich vor und nach einer zwischenzeitlichen Erhöhung der Belastung auf  $\sigma = 14\text{ MPa}$  nur wenig, so dass ein Nachwirken der Deformationsverfestigung hier nicht nachweisbar ist. Im Gegenteil wurde nach der höheren Belastungsstufe sogar eine etwas höhere stationäre Kriechrate ( $\dot{\epsilon}_{st} = (3,7 \pm 0,4) \cdot 10^{-7}\text{ d}^{-1}$ ) ermittelt als vorher ( $\dot{\epsilon}_{st} = (2,4 \pm 0,3) \cdot 10^{-7}\text{ d}^{-1}$ ). Dies weist darauf hin, dass die unvermeidliche Zunahme von Wegsamkeiten während der höheren Belastungsstufe eine Intensivierung des Feuchtezutritts und damit eine Steigerung des Kriechvermögens zur Folge hatte. Dies macht deutlich, dass in der uniaxialen Versuchssituation eine Überlagerung gegenläufiger Effekte (Nachwirken von Deformationsverfestigung vs. Duktilitätssteigerung durch intensivierten Feuchtezutritt) vorliegen kann. Eine sichere Erfassung und Quantifizierung der einzelnen Effekte ist unter diesen Umständen nicht möglich.

Unter der Prämisse einer fortschreitenden Intensivierung der Feuchte-Wirkung ist der Spannungsexponent  $n = 9,0 \pm 0,9$  für die Lasterhöhung von 12 auf 14 MPa als überhöht gegenüber einem unter konstanter Feuchte-Wirkung gegebenem Spannungsexponenten zu beurteilen, während der Spannungsexponent  $n = 6,1 \pm 0,9$  aus der nachfolgenden Lastverringern von 14 auf 12 MPa entsprechend niedriger ausfiel als bei konstanter Feuchte-Wirkung.

Wesentlicher Befund ist hier, dass trotz Feuchte-Wirkung nicht eine lineare Spannungsempfindlichkeit mit  $n = 1$  für die Kriechrate folgt, wie sie bei Dominanz des „pressure solution“-Kriechens (psc) gefunden würde.

Im Versuchsabschnitt bei geringer relativer Luftfeuchte (30 %rF, ohne Abbildung) folgt aus den Lastwechseln erneut mit  $n = 6,6 \pm 1,2$  ein Spannungsexponent von  $n \geq 5$ . Für den Spannungsexponenten werden hier sogar Werte von  $n = 16,3 \pm 1,6$  berechnet, wenn für einen Lastwechsel die Axialspannung von einem höheren Niveau reduziert wurde. Der Grund liegt auch hier im Nachwirken von zuvor erzeugter Deformationsverfestigung, die bei der geringeren Feuchte offensichtlich viel langsamer abgebaut wird als bei 65 %rF.

Dabei zeigt sich, dass wegen des Nachwirkens von Deformationsverfestigung über lange Zeit versuchstechnische Grenzen bestehen, wenn in nur einem einzelnen Versuch die Spannungsempfindlichkeit der stationären Kriechrate über mehrere Lastwechsel ermittelt werden soll. Die Deformationsverfestigung muss abklingen. Erst nach Erholung der das Kriechverhalten determinierenden Mikrostruktur bis zum stationären Gleichgewicht entsprechend der jeweils wirksamen Differenzspannung kann die Spannungsempfindlichkeit zutreffend bestimmt werden. Die Erholung der Deformationsverfestigung erfolgt im Falle der Versuchsführung bei hoher relativer Luftfeuchte durch die Feuchte-Wirkung begünstigt. In diesem Fall lassen sich bei Rücknahme der Spannung keine signifikant höheren Spannungsexponenten feststellen, weil die transiente Kriechphase bis zum dynamischen Gleichgewicht in der Mikrostruktur zeitlich kürzer ist (LE CLEAC'H et al. 1996; URAI & SPIERS 2007). Ein Einfluss einer mit der im Versuchverlauf unvermeidlichen Zunahme von Wegsamkeiten einhergehenden Intensivierung der Feuchte-Wirkung für auf diesen experimentellen Befund ist allerdings nicht auszuschliessen.

Nach Ausweis der Ergebnisse und der Diskussion bei URAI & SPIERS (2007) und anderen zuvor bereits zitierten Autoren führt eine mechanische Belastung von Steinsalz stets zu irreversibler Verformung. Eine „Schwellenspannung“, unterhalb der allein elastisch-reversibles Verformungsverhalten erfolgt, wird für Steinsalz als nicht vorhanden gefunden. Als die Verformung tragende Mikro-Mechanismen werden transkristalline Versetzungsbeziehung und psc-Korngrenzengleiten als dominant wirksam angesehen – sofern die Drucklösung für das psc-Korngrenzengleiten in den dafür erforderlichen Fluidfilmen stattfinden kann (ZHANG et al. 2012). Weitere Mechanismen, wie sie beispielsweise in den „deformation mechanism maps“ von FROST & ASHBY (1982) diskutiert werden, sind für den hier zu betrachtenden Temperaturbereich von vernachlässigbarer Bedeutung. Spannungszustände, die zu bevorzugtem Abgleiten auf Riss-Flächen führen (nicht-viskose, plastische Verformung) können im Fernfeld um einen Untertage-Hohlraum auch nur auftreten, wenn durch geotektonische Prozesse oder Feststoff-Verlust bei Umlösung die Einspannung nicht mehr gegeben ist – also die minimale Hauptspannung beispielsweise

durch Biege-Beanspruchung bis in den Zugbereich verschoben wird. Dergleichen soll hier bezüglich des Langzeit-Deformationsverhaltens in einer Steinsalz-Formation nicht weiter erörtert werden.

Aus Mikrostruktur-Analysen an Steinsalz, das in Laborversuchen bis zum Erreichen des stationären Kriechens verformt worden war, liegen Ergebnisse zur Spannungsabhängigkeit der Subkorngröße zahlreich vor (CARTER & HANSEN 1983). Das von transkristalliner Versetzungsbewegung getragene Kriechen führt im dynamischen Gleichgewicht von Verfestigung und Erholung zur Ausbildung einer stationären Subkorngrößenverteilung (HAMPEL 2012a, b). Für die Beziehung zwischen mittlerer Subkorngröße  $L_{sk}$  und Differenzspannung wird gefunden (CARTER ET AL. 1993):

$$L_{sk} = 214 \cdot \sigma^{-1.15}$$

Nun wird schon bei CARTER & HANSEN (1983) und in Nachfolge-Untersuchungen versucht, aus der mittleren Subkorngröße von Steinsalz, das außerhalb der Einwirkung des Spannungszustands um einen Untertage-Hohlraum gewonnen wurde, die über geologische Zeiträume wirksam gebliebene Differenzspannung bzw. die „eingefrorene“ Rest-Spannung im Sinne einer „Schwellenspannung“ gegen viskose Verformung zu ermitteln. Das setzt voraus, dass die Subkorngrößen-Analyse mit einem repräsentativen Mittelwert in der heterogen ausgebildeten und breit verschmierten Größenverteilung technisch zuverlässig gelingt und die Extrapolation der aus Labor-Experimenten empirisch abgeleiteten Subkorngrößen-Spannungs-Beziehung zulässig ist. Vorbehalte folgen aus Befunden zur Subkorngrößenverteilung an im Labor gleichartig verformtem Steinsalz mit unterschiedlichen Anteilen von Zweit-Phasen-Partikeln (Verunreinigungen der halitischen Matrix, „Härtlinge“). Nur in einer Halit-Matrix ohne die Behinderung von Versetzungen kann erwartet werden, dass sich die allein auf den Spannungszustand beziehbare Gleichgewichts-Substruktur auch einstellt. In der Arbeit von PAPE et al. (2002) wird nun aber nachgewiesen, dass in Steinsalz-Proben aus dem Salzstock Gorleben Gefüge-Bereiche angetroffen werden, die trotz tektonischer Prozesse „Chevron-Kristalle“ enthalten (ROEDER 1984) – die also über geologische Zeiträume ein Primärgefüge erhalten haben, das seit seiner Entstehung keine Indikatoren für Verformung und dynamische Rekristallisation bis zur Entwicklung einer Subkorn-Gleichgewichtsstruktur gespeichert hat.

URAI & SPIERS (2007) schließen aus ihren Ergebnissen zur Mikrostrukturanalyse, dass von transkristalliner Versetzungsbewegung getragene Verformung (nichtlineare Spannungsabhängigkeit gemäß Potenzgesetz) und das psc-Kriechen (lineare Spannungsabhängigkeit) zur Gesamtverformung Beiträge liefern, die additiv angesetzt werden dürfen. Das setzt voraus, dass die Mechanismen unabhängig voneinander aktiv sein können. Nun wird aber Drucklösung auch in der Argumentation bei URAI & SPIERS (2007) nur dann einsetzen,

wenn das thermo-dynamische Gleichgewicht lokal gestört ist. Das ist immer dann der Fall, wenn beispielsweise durch von Versetzungen getragene Deformationsverfestigung die Löslichkeit lokal erhöht ist und dynamische Rekristallisation im Fluidfilm lokal begünstigt wird, wobei der Fluidfilm mit der Rekristallisationsfront in den transkristallin verformten Gefügebereich hinein mitwandern muss. Diese Überlegungen fordern, die Verformung durch transkristalline Versetzungsbewegung und die gegebenenfalls mögliche dynamische Rekristallisation in einem dafür verfügbaren Fluidfilm als gekoppelte Prozesse zu betrachten. Nach Ausweis der zuvor berichteten Befunde (Abb. 25 und Abb. 26) bleibt dabei – auch im Falle der für Migration von Lösung erforderlichen Dilatanz – die nichtlineare Abhängigkeit der Verformungsrate von der Spannung dominant. Sofern der psc-Prozess bei ausreichend verfügbarem Feuchte-Angebot zur Verformbarkeit beitragen kann, bleibt seine Wirkung auf die im Bereich innerer Wegsamkeiten begünstigte Erholung und Rekristallisation der transkristallin erzeugten Deformationsverfestigung begrenzt.

### **3 Untersuchungen zum Deformationsverhalten von Anhydrit**

An Gesteinsprüfkörpern aus massivem Anhydrit wie auch an solchen aus Steinsalz, die von massiven Anhydritlagen durchzogen sind, wurden Untersuchungen schon zahlreich durchgeführt. In diesem Kapitel werden die aktuellen Untersuchungsergebnisse insbesondere zum Dauerstandverhalten dieser Gesteinstypen berichtet. Dabei soll insbesondere der Frage nachgegangen werden, ob Anhydrit ein viskoses Materialverhalten zeigt, wie es vom Steinsalz her bekannt ist, oder ob eine dem Anhydrit aufgeprägte Verformung von einem elastisch-spröden Materialverhalten dominiert wird.

Zur Untersuchung dessen wurden drei Laborprogramme zum Verformungsverhalten durchgeführt – und zwar unter uniaxialer Dauerstandbelastung in Anlehnung an die Versuchsführung zur Untersuchung des Kriechvermögens von Steinsalz:

- bei erhöhter Temperatur
- unter Einwirkung abschnittsweise veränderter relativer Luftfeuchte
- an Anhydritmittelsalz (z3AM) mit scharfem Anhydrit-Steinsalz-Grenzflächenkontakt.

Herkunft und Eigenschaften der für die drei Prüfvorhaben ausgewählten Prüfkörper sind in Tab. 4 zusammengestellt. Die massiven Anhydrite weisen generell eine Dichte von  $\rho > 2,8 \text{ g/cm}^3$  auf. Beim Anhydritmittelsalz wird im Falle des Prüfkörpers mit der geringsten Dichte, das heißt mit dem geringsten Anteil von Anhydrit, in jedem Versuchsabschnitt mit stufenweise erhöhter Dauerstandbelastung stets die größte Kriechrate gefunden. Details dazu sind in Tab. 4 unter „Probenbeschreibungen“ aufgeführt.

### 3.1 **Verformungsverhalten von Anhydrit bei erhöhter Temperatur**

Die anhydritischen Gesteinsprüfkörper stammen aus der mit Lösung geteufte Erkundungsbohrung Go1002. Obwohl die beim Teufen eingesetzte Spüllösung nicht auf ein chemisches Gleichgewicht mit den carnallitischen Einschlüssen in diesem Gesteinsabschnitt eingestellt war, enthalten die Prüfkörper in den kavernen Spots, die sich auf einer Prüfkörper-Oberfläche deutlich abzeichnen, neben Halit auch Carnallit.

Die drei hier genutzten Prüfkörper mit den Standard-Abmessungen  $L_0 = 250 \text{ mm}$  und  $D_0 = 100 \text{ mm}$  wurden uniaxial über knapp eine Woche unter Andruck belastet ( $\sigma = 1 \text{ MPa}$ ,  $T = 30 \text{ °C}$ ), um Verformung durch Setzen des Mess-Systems und Kraftschluss zwischen Druckplatten und den Stirnflächen der Prüfkörper abklingen zu lassen. Um das Erzeugen von Artefakten in dem möglicherweise spröde reagierenden Material zu vermeiden, wurde kein höherer Andruck gewählt. Anschließend wurde die Axialspannung auf  $\sigma = 18 \text{ MPa}$  erhöht und über mehr als 400 Tage konstant gehalten. Die Prüftemperatur wurde allerdings schon am 19. Versuchstag auf  $T = 150 \text{ °C}$  eingeregelt. Wegen der im Grunde nicht messbaren „Kriechverformung“ wurde die Axialspannung am 440. Versuchstag noch auf  $\sigma = 20 \text{ MPa}$  erhöht.

In Abb. 27 ist der Versuchsverlauf nur für den Gesteinsprüfkörper 11073 dargestellt (vgl. Tab. 4). Dieser weist die vergleichsweise geringste Dichte auf und dieser Versuch erlaubt als einziger – nach dem Übergangsverhalten zu Versuchsbeginn – noch einen Versuchsabschnitt mit einer scheinbar stationären Kriechrate abzulesen. In dem dabei am wenigsten durch Störungen beeinflussten Versuchsabschnitt vom ca. 140. bis 440. Versuchstag konnte eine Gesamtverformung von  $30 \text{ }\mu\text{m}$  pro 300 Tagen messtechnisch zuverlässig abgelesen werden. Bei den beiden anderen Versuchen war dies wegen der noch geringeren Verformungen und der diese überlagernden Störungen nicht möglich – verursacht beispielsweise durch Ausfall der Klimaanlage, der Heizung oder der Stromversorgung. Hierzu sei angemerkt, dass allein aus dem „thermischen Rauschen“ im Falle einer Temperatur-Regelung mit der Güte von  $\Delta T = \pm 2 \text{ K}$  und einem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha(\text{Anhydrit}) = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  bis  $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  bei einer Prüfkörperlänge von  $250 \text{ mm}$  eine Ablesungs-Unsicherheit in der Längenmessung von  $\Delta L = \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$  bis  $\pm 8 \text{ }\mu\text{m}$  folgt.

Die aus dem messtechnisch auswertbaren Abschnitt ermittelte Verformungsrate von  $\dot{\epsilon} = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ d}^{-1}$  liegt um fünf Größenordnungen unter der von Steinsalz, wenn die gleichen Prüfbedingungen zu Grunde gelegt werden:  $\sigma = 18 \text{ MPa}$ ;  $T = 150 \text{ °C}$ . Als Bezug für den Vergleich gelten die Stoffgesetze BGRa bzw. BGRb. Deren Prognosen unterscheiden sich für diesen Temperaturbereich weniger als bei Raumtemperatur.

Zur Illustration des Unterschieds in der Duktilität und des Verformungsverhaltens von Anhydrit und Steinsalz bei Dauerstandbelastung und für den Fall, dass stationäres Kriechen erreicht wird, sind in Abb. 28 die Graphen für die Stoffgesetze BGRa und BGRb bei Raumtemperatur (22 °C) und bei erhöhter Temperatur (150 °C) in doppelt-logarithmischer Form dargestellt, wie sie aus dem Ansatz in den Stoffgesetzen gemäß  $\dot{\epsilon} \sim \sigma^n$  folgen. In dieses Diagramm sind die beiden Messpunkte aus dem Anhydrit-Versuch bei 150 °C und 18 MPa sowie 20 MPa eingetragen. Ergänzt werden diese Datenpunkte mit denen für das Asse-Speisesalz (z2SP) und repräsentative Messpunkte für Steinsalz bei ebenfalls 150 °C.

### 3.2 **Verformungsverhalten von Anhydrit in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte**

Der Feuchte-Kriechprüfstand (N7) erlaubt den gleichzeitigen Einbau von fünf Prüfkörpern. Die genutzten Prüfkörper stammen aus der Erkundungsbohrung G01005 (Teufenabschnitt: ~ 615 m) und weisen wieder Standard-Abmessungen auf ( $L_0 = 250$  mm und  $D_0 = 100$  mm), vgl. Tab. 4. Dadurch erhalten alle Prüfkörper wegen der gleichen Axialkraft auch die annähernd gleichen Axialspannungen. Bei der Gesteinsdichte gilt:  $\rho > 2,8$  g/cm<sup>3</sup>. Mit der Abb. 29, Prüfkörper 85302, wird belegt, dass die anhydritische Matrix viele kavernöse Spots aufweist. Auch im Falle der Erkundungsbohrung Go1005 (Teufenabschnitt: ~ 615 m) bleiben trotz des Bohrens mit Lösung selbst in den Oberflächen-Spots noch Spuren von Halit und Carnallit erhalten. Der Volumenanteil der Einschlüsse wird auf 5 % bis 7 % geschätzt (Schnittlängen-Analyse an Kernfotos).

Während des Dauerstandversuchs wurden – über den gesamten Versuchszeitraum von 150 Tagen – die Axialspannung auf 20 MPa und die Temperatur auf 22 °C konstant eingeregelt gehalten. In der Klimakammer um den Feuchte-Kriechprüfstand wird die relative Luftfeuchte mit kapazitiven Sensoren gemessen und über die bedarfsweise Zufuhr von getrockneter Luft oder Wasserdampf aus einem Ultraschall-Vernebler geregelt. In Abb. 30 ist das Verformungsverhalten der fünf gleichzeitig belasteten Prüfkörper über der Zeit dargestellt. Zusätzlich eingetragen ist die abschnittsweise bis auf 70 %rF erhöhte relative Luftfeuchte.

Obwohl ab einer relativen Luftfeuchte von mehr als 50 %rF das Mineral Carnallit hygroskopisch wirkt, in Lösung geht und am Anhydrit-Prüfkörper Laufspuren bildet, ist am Verformungsverhalten des Anhydrits keine Reaktion ablesbar. Nach Abklingen der Setzphase im Prüf-System bleiben die dann vermeintlich stationären Kriechraten im Rahmen der Systembedingungen sehr gering. Über einen Zeitraum vom 20. bis 140. Versuchstag kann eine Gesamtverformung von  $\epsilon < 0,007$  % abgelesen werden (siehe gepunktete Gerade). Demzufolge ist die stationäre Kriechrate  $\dot{\epsilon}(20$  MPa; 22 °C)  $\leq 5,8 \cdot 10^{-7}$  d<sup>-1</sup>. Unter



gleichen Bedingungen wird für Steinsalz gemäß BGRa als repräsentative stationäre Kriechrate  $\dot{\epsilon}$  (20 MPa; 22 °C; BGRa; 45 %rF) =  $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1}$  vorhergesagt. Aus diesem Vergleich folgt ein Duktilitätsunterschied von Anhydrit: Steinsalz < 1 : 250.

Obwohl ab einer relativen Luftfeuchte von mehr als 50 %rF deutlich erkennbar wird, dass sich die carnallitischen Einsprengsel auflösen und als Lösung auslaufen, und obwohl bei einer relativen Luftfeuchte von bis zu 70 %rF sich die Duktilität von Steinsalz noch einmal um einen Faktor von nahezu 100 erhöht (HUNSCHKE et al. 2003; HUNSCHKE & SCHULZE 2002), erweist sich die anhydritische Gesteinsmatrix selbst bei der hohen Axialspannung von 20 MPa und der zuletzt hohen relativen Luftfeuchte von 70 %rF als gering viskos verformbar. Eine Feuchte-Wirkung auf das Kriechen des Anhydrit ist nicht nachweisbar.

### **3.3 Verformungsverhalten von Anhydritmittelsalz mit scharfen Anhydrit-Steinsalz-Grenzflächen**

Da anhydritisches Gestein nach Ausweis auch der zuvor berichteten Laboruntersuchungen im Vergleich mit Steinsalz nur eine um mehrere Größenordnungen geringere Kriechverformbarkeit zeigt, ist geprüft worden, wie sich die Grenzfläche zwischen Anhydrit und Steinsalz verhält, wenn wegen des Kontrastes in der Verformbarkeit sich in diesem Gefügebereich lokal Spannungskonzentrationen aufbauen, Risskeime entstehen und diese sich während andauernder Belastung und Verformung weiter entwickeln. Die diesbezüglichen Laboruntersuchungen und einige Ergebnisse sind bereits berichtet worden (PLISCHKE & SCHULZE 2003). In einem Dauerprüfstand waren drei Prüfkörper des Anhydritmittelsalzes (z3AM) aus dem ERAM eingebaut. Die Prüfkörperdaten sind wieder in Tab. 4 zusammengestellt.

Im Zuge abschnittsweiser Steigerung der Axialspannung entstehen in der Kontaktzone zwischen Anhydrit und Steinsalz zunächst nur im spröden Anhydrit diskrete Risskeime. Diese führen an diesen Stellen zu einem Festigkeitsverlust im Anhydrit. Als Folge davon erfährt das Steinsalz einen zusätzlichen Lasteintrag und am Kontakt zu den Risskeimen im Anhydrit eine entsprechende Spannungskonzentration. Durch die fortschreitende Verformung und die weiter erhöhte Axialspannung setzt auch im Steinsalz die Gefügeschädigung ein. Diese zeigt sich zunächst aber nicht in einem lokalisierten Rissfortschritt aus dem Anhydrit heraus und in das Steinsalzgefüge hinein, sondern in einer diffus verschmierten, makroskopisch bevorzugt über Korngrenzen ablaufenden Auflockerung. Trotz der letztlich auch im Kontaktbereich zum Steinsalz entstehenden Einzelrisse durchdringen Auflockerung und Bruch über Korngrenzen den gesamten Kornverbund im halitischen Bereich eines Prüfkörpers.

Diese Interpretation wird sehr anschaulich im bereits zitierten BGR-Bericht (PLISCHKE & SCHULZE 2003) mit der dort dokumentierten Bilderfolge belegt. Im dort in Abb. 4 dargestellten Versuchsverlauf sind Markierungen eingetragen, die anzeigen, wo Kern-Fotos angefertigt wurden. Diese zeigen für die verschiedenen Stadien der Schädigungsentwicklung, wie ab Bild 4 bzw. ab Bild 5 an der Grenzschicht im Anhydrit die Risskeime entstehen und wachsen, wie in Bild 6 und Bild 7 neben der Auflockerung des Korngefüges im Steinsalz auch dort lokalisierte Einzel-Risse entstehen, bis die Bilderfolge mit dem homogenen das Steinsalzgefüge durchsetzenden Korngrenzen-Makro-Bruch endet.

Die Prüfkörper aus diesem „Verbundwerkstoff“ haben nach Abklingen des transienten Kriechens in jeder Spannungsstufe ein im Vergleich zur Vorhersage gemäß BGRa geringes Kriechvermögen (weniger als Kriechklasse „0“). Die Kriechklasse steigt bis zu einer Axialspannung von  $\sigma \leq 30 \text{ MPa}$  nicht an, vgl. Abb. 31 mit Gefügebildern aus PLISCHKE & SCHULZE (2003). Erst bei noch höherer Spannung setzt wegen Entfestigung die Kriechbeschleunigung ein, die zum Bruch des Prüfkörpers führt.

#### **4 Zusammenfassung**

Berichtet werden die Ergebnisse aus den Labor-Untersuchungen zur Wirkung von Feuchte auf das Deformationsverhalten von Steinsalz. Dies betrifft dessen Abhängigkeit sowohl von der relativen Luftfeuchte als auch von wässriger Salzlösung unter uniaxialen und triaxialen Belastungsbedingungen.

Bei den in Wegregelung durchgeführten Festigkeitsversuchen zeigt sich insbesondere bei den technisch geringstmöglichen Verformungsraten ( $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$ ), dass die maximal aufnehmbare Spannung und die bis zum Festigkeitsmaximum erreichbare Verformung erheblich reduziert sind gegenüber denen aus einer Versuchsführung unter trockenen Bedingungen – sofern die Belastungsbedingungen im Dilatanzregime liegen. Ohne Dilatanz bleiben Feuchte-Effekte weitgehend unterdrückt.

Wenn Feuchte zutreten kann, ist die Reaktion zusätzlich abhängig von der mineralischen Zusammensetzung eines Steinsalz-Typs. Obwohl bei den Versuchen mit einer Lösung gearbeitet wurde, die im chemischen Gleichgewicht mit einem halitisch-carnallitischen Mineralgemenge steht, wird stets eine Wirkung auf das mechanische Verhalten registriert, wie sie gleichwertig auch in einer Umgebung mit feuchter Luft (ca. 70 %rF) gefunden wird. Dabei fällt die Reaktion auf eine Feuchte-Einwirkung in dem Steinsalz-Typ mit polyhalitischen Gefüge-Anteilen am intensivsten aus.

Im Falle von Kriechversuchen wird die Abhängigkeit der Kriechduktilität von der Belastung relativ zur Dilatanzgrenze bestätigt gefunden. Ein gleichzeitiges Feuchteangebot bewirkt eine Duktilitätserhöhung nur im Falle einer Belastung im Dilatanzregime. Die Untersuchungen belegen, dass auch im Falle der durch Feuchte-Wirkung erhöhten Duktilität die Spannungsabhängigkeit der Kriechrate nichtlinear bleibt. Ein Materialverhalten, wie für eine Dominanz des Mechanismus des Druck-Lösung-Kriechens (psc – pressure solution creep) vorhersagt, wird nicht beobachtet.

Es wird diskutiert, in welchem Maße die bei der BGR genutzten und einige in der Literatur genannte Stoffgesetze zum Langzeit-Deformationsverhalten (d. h. zum stationären Kriechen) im Bereich geringer, experimentell nicht mehr bestimmbarer – aber in-situ relevanter – Verformungsraten voneinander abweichen. Bei einer Differenzspannung von beispielsweise 2 MPa betragen die Unterschiede in den vorhergesagten Verformungsraten bereits bis zu ca. 2 Größenordnungen.

In anspruchsvollen Einzelfällen werden Sensitivitätsstudien unverzichtbar bleiben, bei denen unabhängig vom für Modellberechnungen gewählten Stoffgesetz die natürliche Bandbreite im Kriechvermögen verschiedener Steinsalz-Typen einbezogen wird.

Die Untersuchungen wurden an Steinsalz aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben, dem ERA Morsleben und dem Salzbergwerk Asse durchgeführt. Die Ergebnisse sind abhängig von den spezifischen Eigenschaften des jeweils genutzten Kernmaterials. Dies ist bei der Beprobung verschiedener Bereiche und mineralogisch-petrologisch-stratigraphischer Einheiten sorgsam zu beachten. Eine Abhängigkeit nur vom Standort einer Salzformation wird nicht erwartet und auch nicht gefunden. Mit Bezug auf das entwickelte Grundverständnis und die für die verschiedenen Steinsalz-Typen gefundenen Abhängigkeiten sind die Ergebnisse generell übertragbar.

Anhydrit-Gestein reagiert bei mechanischer Belastung mit einem elastisch-spröden Materialverhalten. In der Literatur wird diskutiert, dass Anhydrit zwar ein gegenüber Steinsalz in der Regel vernachlässigbar geringes Kriechvermögen besitzt, aber bei einer Differenzspannung unterhalb der Spröbruchgrenze sich doch duktil verformt. Die Uniaxial-Dauerstandversuche bei erhöhter Temperatur (150 °C) und gleichzeitig hoher Axialspannung (18 MPa sowie 20 MPa) weisen eine sehr geringe Kriech-Duktilität auf. Die ermittelte Kriechrate von  $\dot{\epsilon}(18 \text{ MPa}; 150 \text{ °C}) \approx 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ d}^{-1}$  bleibt um mehr als fünf Größenordnungen unter der, die unter gleichen Bedingungen für Steinsalz als repräsentativ gefunden wird.

Ein durch die relative Luftfeuchte (bis zu 70 %rF) beeinflussbares Deformationsverhalten wird nicht gefunden. Ab einer relativen Luftfeuchte von ca. 45 %rF gehen die carnallitischen Einsprengsel in Lösung und beginnen aus der anhydritischen Matrix auszufließen. Dabei wird wieder nur die zuvor gefundene geringe (zeitabhängige) Kriech-Verformbarkeit registriert.

An Prüfkörpern, die scharfe Grenzflächen zwischen Anhydrit und Steinsalz enthalten, wurden ebenfalls Uniaxial-Dauerstandversuche durchgeführt. Da sich Steinsalz der Belastung durch Kriechverformung entzieht, führt dies in der Grenzschicht zu Scherbewegung. Daraus resultieren Spannungskonzentrationen mit Rissbildung im Anhydrit.

## Literaturverzeichnis

- BRODSKY, N. S. & MUNSON, D. E. (1991): The effect of brine on the creep of WIPP salt in laboratory tests.- Proc. 32nd U. S. Symp. on Rock Mech., University of Oklahoma, Norman, p. 703-712.
- BRÜGE, B. (1993): Das Verdichtungsverhalten von Steinsalzhaufwerk aus dem Salzbergwerk Asse - Eine gefügekundliche Studie -. Diplomarbeit, Institut für Geowissenschaften, TU Braunschweig.
- CARTER, N. L. & HANSEN, F. D. (1983): Creep of rocksalt. – Tectonophysics 92: 275-333.
- CARTER, N. L., HORSEMAN, S. T., RUSSELL J. E. & HANDIN, J. (1993): Rheology of rocksalt.- Journ. Struct. Geol. 15: 1257-1271.
- CRISTESCU, N. & HUNSCHKE, U. (1998): Time effects in Rock Mechanics. – Serie: Materials, Modelling and Computation, 342 S., John Wiley and Sons; Chichester.
- FROST, H. J. & ASHBY, M. F. (1982): Deformation mechanism maps: the plasticity and creep of metals and ceramics.- Pergamon Press; Oxford.
- HAMPEL, A. (2012a): Weiterentwicklung der Module im CDM-Stoffgesetzsysteem und deren Formulierung für die Verwendung in JIFE.- Abschlussbericht für den Auftraggeber BGR vom 30.09.2012. Bestell-Vorgang: 201-4500067224; 10048096.
- HAMPEL, A. (2012b): The CDM constitutive model for the mechanical behavior of rock salt: Recent developments and extensions.- In: BÉREST, P., GHOREYCHI, M., HADJ-HASSEN, F. & TIJANI, M. (Hrsg.): Mechanical Behavior of Salt VII; Proc. of the Seventh Conf. (Saltmech7), Paris, April 2012: 45-55, CRC Press/Balkema, Leiden (Taylor & Francis Group, London).
- HAMPEL, A. & SCHULZE, O. (2007): The Composite Dilatancy Model: A constitutive model for the mechanical behaviour of rock salt.- In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY W. & HARDY, H. R., JR. (eds.): The Mechanical Behaviour of Salt. Understanding of THMC Processes in Salt. Hannover 2007: 99-107. Taylor & Francis; London.
- HUNSCHKE, U. & SCHULZE, O. (2002): Humidity induced creep and its relation to the dilatancy boundary.- In: Basic and Applied Salt Mechanics; Proc. of the Fifth Conf. on the Mech. Behavior of Salt (MECASALT V), Bucharest 1999. Editors: CRISTESCU, N. D., HARDY H. R., JR., SIMIONESCU, R. O.; p. 73 – 87. Balkema, Lisse.

- HUNSCHKE, U., MINGERZAHN, G. & SCHULZE, O. (1996): The influence of textural parameters and mineralogical composition on the creep behavior of rock salt.- In: GORHEYCHI, M., BEREST, P., HARDY, H. R., JR. & LANGER, M. (eds.): The Mechanical Behaviour of Salt, Proc. 3rd Conf., Palaiseau (Frankreich) 1993: 143-151; Trans Tech Publications; Clausthal.
- HUNSCHKE, U., SCHULZE, O., WALTER F. & PLISCHKE, I. (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein.- BGR-Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G213811.
- JOCKWER, N. (1982): Untersuchungsmethoden und Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung an Steinsalzkerne aus den Bohrungen Gorleben 1002 und 1003. - GSF-IFT-Bericht, ABT 9/82; Braunschweig.
- LE CLEAC'H, J. M., GHAZALI, A., DEVEUGHELE, M. & BRULHET, J. (1996): Experimental study of the role of humidity on the thermomechanical behaviour of various halitic rocks.- In: The Mechanical Behavior of Salt III, Proc. 3<sup>rd</sup> Conf., Palaiseau (France) 1993: 231-248; Trans Tech Publications; Clausthal.
- LUX, K.-H. (1984): Gebirgsmechanischer Entwurf und Felderfahrungen im Salzkavernenbau.- Ferdinand Enke Verlag; Stuttgart.
- PAPE, T., MICHALZIK, D. & BORNEMANN, O. (2002): Chevronkristalle im Kristallbrockensalz (Zechstein 2) des Salzstocks Gorleben. Primärgefüge salinärer Flachwassersedimentation im Zechsteinbecken. – Z. Dtsch. Geol. Ges. 153: 115–129.
- PHARR, G. M. & ASHBY, M. F. (1983): On creep enhanced by a liquid phase.- *acta met.* 31: 129-138.
- PLISCHKE, I. & SCHULZE, O. (2003): Gebirgsmechanische und geotechnische Untersuchungen im Labor und in situ. Ingenieurgeologische Erkundung von Homogenbereichen. - BGR-Abschlussbericht zum AP 9M2131002500. Mai 2003, Tgb. Nr. 10548/03.
- ROEDDER, E. (1984): The fluids in salt. - *American Mineralogist* 69: 413-439.
- SCHULZE, O. (1984): Thermomechanical properties of irradiated rock salt.- *Nucl. Instruments and Methods in Physics Research*, B1: 542-548.
- SCHULZE, O. (2007a): Investigations on damage and healing of rock salt. - In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W. & HARDY, H. R., JR. (eds.), *The Mechanical Behavior of Salt. Understanding of THMC Processes in Salt.* Hannover 2007: 33-43. London: Taylor & Francis.

- SCHULZE, O. (2007b): Thermomechanisches und hydraulisches Verhalten von Salzgestein. - BGR-Bericht zum AP 9Y3214080000. März 2007, Tgb. Nr. 11037/06.
- SCHULZE, O., HEEMANN, U., ZETSCHKE, F., HAMPEL, A., PUDEWILLS, A., GÜNTHER, R.-M., MINKLEY, W., SALZER, K., HOU, Z., WOLTERS, R., ROKAHR, R., ZAPF, D. (2007): Comparison of advanced constitutive models for the mechanical behaviour of rock salt – results from a joint research project. - In: WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W. & HARDY, H. R., JR. (eds.), The Mechanical Behavior of Salt. Understanding of THMC Processes in Salt. Hannover 2007 (SaltMech-6): 77-88. London: Taylor & Francis.
- SCHULZE, O. & PLISCHKE, I. (2010): Homogenbereichskartierung zum Kriechen von Steinsalz - Verfahren und Ergebnisse.- BGR- Bericht zum AP 9M2811001100. September 2010 Tgb. Nr. B3.2/B50132-01/2010-0002/001.
- SCHULZE, O. (2011): Strengthening and stress relaxation of Opalinus Clay.- Physics and Chemistry of the Earth 36: 1891–1897.
- SPIERS, C. J. & CARTER, N. L. (1998): Microphysics of rocksalt flow in nature.- Mech. Behavior of Salt (SaltMech4), Montreal 1996; AUBERTIN, M. & HARDY, H. R., JR. (eds.) .-Trans. Tech. Publ., Clausthal, 115-128.
- SPIERS, C. J., SCHUTJENS, P. M., BRZESOWSKY, R. H., PEACH, C. J., LIEZENBERG, J.L. & ZWART, H.J. (1990): Experimental determination of constitutive parameters governing creep of rock-salt by pressure solution.- In: Deformation Mechanisms, Rheology and tectonics. In: KNIPE, R. J. & RUTTER, E. H. (eds.), Geological Society Special Publication No. 54, p. 215-227.
- STÜHRENBERG, D. & SCHULZE, O. (2012): Porosity and permeability of crushed and damaged rock salt during compaction.- In: BÉREST, P., GHOREYCHI, M., HADJ-HASSEN, F. & TIJANI, M. (eds.): Mechanical Behavior of Salt VII; Proc. of the Seventh Conf. (Saltmech 7), Paris, April 2012: 275-282, CRC Press/Balkema, Leiden (Taylor & Francis Group, London).
- URAI, J., SPIERS, C., ZWART, H. & LISTER, G. (1986): Weakening of rocksalt by water during long term creep.- Nature 324: 554–557.
- URAI, J. L. & SPIERS, C. J. (2007): The effect of grain boundary water on deformation mechanisms and rheology of rocksalt during long-term deformation.- In WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W. & HARDY, H. R., JR. (eds.), The Mechanical Behavior of Salt. Understanding of THMC Processes in Salt. Hannover 2007: 149-158. London: Taylor & Francis.

ZHANG, X., PEACH, C. J., GRUPA, J. & SPIERS, C. J. (2007): Stress relaxation experiments on compacted granular salt: the effect of water.- In WALLNER, M., LUX, K.-H., MINKLEY, W. & HARDY, H. R., JR. (eds.), The Mechanical Behavior of Salt. Understanding of THMC Processes in Salt. Hannover 2007: 159-166. London: Taylor & Francis.



## Abkürzungsverzeichnis

ERAM Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben

KW Kohlenwasserstoffe

psc pressure-solution creep (Druck-Lösungs-Kriechen)

rF relative Feuchte

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Prüfplan zur Untersuchung der Feuchtwirkung auf die Festigkeits- eigenschaften von Steinsalz.....	79
Tab. 2: Zusammensetzung der Mg <sup>2+</sup> -reichen Salzlösung (Schutzfluid) zur Simulation der Feuchte-Wirkung nach Flutung (Quelle: persönliche Mitteilungen von DEUSA, Bleicherode, und. IfG, Leipzig).....	80
Tab. 3: Stoffgesetze zum stationären Kriechen von Steinsalz als Funktion der Differenzspannung.....	81
Tab. 4: Eigenschaften von Prüfkörpern aus dem Anhydrit (z3HA) und dem Anhydritmittelsalz (z3AM).....	82

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Uniaxiale Kriechversuche bei ca. 13 MPa mit Wechseln der relativen Luftfeuchte zwischen 25 %rF und 65 %rF. Die beiden Prüfkörper waren in der Klimakammer des Prüfstands gemeinsam eingebaut, bei gleicher Axialkraft resultieren die Unterschiede in der Axialspannung aus unterschiedlichen Durchmessern und Formänderungen während der Verformung. Die beiden Prüfkörper waren zuvor für Triaxial-Kriechversuche genutzt worden. Beim Ausbau aus der Triaxialzelle verölte der Prüfkörper 86474P, daher zeigt er im Kriechverhalten keine Reaktion auf Feuchtewechsel.....	46
Abb. 2: Zwei Kriechversuche an Steinsalz (z2HS1; GoEB1RB341), konstante Differenzspannung $\sigma = 20 \text{ MPa}$ , Temperatur $T = 30 \text{ °C}$ . Die Kriechrate ist abhängig vom Manteldruck ( $p = 0,5 - 20 \text{ MPa}$ ), d. h. von der Belastung relativ zur Dilatanzgrenze. Nach Entlastung, Zugabe von NaCl-gesättigter Lösung und Fortsetzung des Versuchs am 230. Tag erfolgte verstärkte Feuchte Wirkung im Dilatanz-Regime.....	47
Abb. 3: Uniaxial-Festigkeitsversuche an Asse-Speisesalz (z2SP) bei $T = 22 \text{ °C}$ . Relative Luftfeuchte bei 20 %rF oder 70 %rF. Stauchraten in [s <sup>-1</sup> ]: $5,0 \cdot 10^{-6}$ ; $1,0 \cdot 10^{-6}$ ; $1,0 \cdot 10^{-7}$ ; $1,0 \cdot 10^{-8}$ . Einige der Versuche enthalten Haltephasen zur Ermittlung der Spannungsrelaxation. Der Versuche 05049 wurde mit dem Asse-Speisesalz (z2SP+ph) durchgeführt, das leicht lösliche polyhalitische Beimengungen enthält. Wegen der geringen relativen Luftfeuchte von nur 20 %rF bleiben diese ohne Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten (vgl. Verlauf in Abb. 4).....	48
Abb. 4: Vergleich der Feuchte Wirkung auf das Asse-Speisesalz (z2SP) und das mit polyhalitischen Beimengungen (z2SP+ph). Bei der relativen Luftfeuchte von 70 %rF wie auch bei Flutung mit der Mg <sup>2+</sup> -reichen Lösung (sfl) sind die max. Fließspannung und die Verformung bis zum Maximum für beide Salztypen reduziert, wobei das (z2SP+ph)-Steinsalz empfindlicher reagiert.....	49
Abb. 5: Festigkeitsverhalten der Steinsalztypen z2SP, z3OS-Ro und z3LS bei 45 %rF und Einwirken der Mg <sup>2+</sup> -reichen Lösung. Zum Vergleich sind die Versuchspuren für das Steinsalz z2SP+ph bei nur 20 %rF und unter Einwirken der Lösung dargestellt $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ d}^{-1}$ .....	50
Abb. 6: Axialspannung und Axialverformung im Festigkeitsmaximum in Abhängigkeit von der Stauchrate und dem Feuchteangebot. Polyhalitisches Speisesalz (z2SP+ph; in punktierten Kreisen) zeigt die systematisch stärkere Reaktion auf ein erhöhtes Feuchteangebot.....	51
Abb. 7.1: Uniaxiale Festigkeitsversuche ( $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ d}^{-1}$ ) bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte (20 %rF und 70 %rF). Vergleich der Axialspannung im Festigkeitsmaximum und der Axialverformung mit der bis zum Maximum jeweils aufnehmbaren Deformationsenergie.....	52
Abb. 7.2: Deformationsenergie, die bis zum Festigkeitsmaximum aufgenommen wird, als Funktion des Feuchteangebotes und der Stauchrate.....	53

Seite

Abb. 8: Wirkung eines seitlichen Stützdrucks durch Vollversatz aus Steinsalz-Pulver (Körnung $\leq 2$ mm) nach Zugabe der Mg <sup>2+</sup> -reichen Lösung (FI = Fluid) und ohne Flutung. Im Falle von Vollversatz enden die Versuche bei der im Prüfstand maximal aufbringbaren Axialkraft.....	54
Abb. 9.1: Triaxial-Kriechversuch_08036 an Asse-Speisesalz (z2SP) bei $T = 30^\circ\text{C}$ nach Flutung mit Mg <sup>2+</sup> -reicher Lösung in einem Salzgrus-Ringspalt. Zu Beginn lag die Spannung oberhalb der Dilatanzgrenze. In Abschnitten mit nahezu stationärem Kriechen wurde die Kriechklasse gemäß BGRa bestimmt, d. h. „Klasse 5“. Die ermittelten Kriechklassen bleiben im für Speisesalz üblichen Bereich, d. h. „Klasse < 8“. Aus den annähernd stationären Kriechraten in den Spannungsstufen bei 12 MPa und 14 MPa folgt als Spannungsexponent $n = 4.2$ . Eine durch Feuchte-Wirkung erhöhte Duktilität und eine Reduktion der Spannungsempfindlichkeit auf den Exponenten $n = 1$ werden nicht gefunden.....	55
Abb. 9.2: Triaxial-Kriechversuch an Steinsalz (Asse2/94/08036, z2SP): Offene Druckzelle mit Prüfkörper im Schutzschlauch und nach Entfernen der Ummantelung für den mit Mg <sup>2+</sup> -reicher Lösung getränkten Voll-Versatz.....	56
Abb. 10: Uniaxial-Festigkeitsversuch (08033-z2SP; 1,0·107 s1, 50 %rF; $T = 22^\circ\text{C}$ ) mit Spannungsrelaxation ( $\varepsilon = \text{const}$ ) und mit Schleifen für Entlastung und Wiederbelastung zur Ermittlung des Steifemoduls $E^*$ im quasilinearen Versuchsabschnitt. Versuchsdauer: 62 Tage.....	57
Abb. 11: Uniaxial-Festigkeitsversuch (05035-z2SP+ph; 1,0·108 s1, 20 %rF; $T = 22^\circ\text{C}$ ) mit Spannungsrelaxation ( $\varepsilon = \text{const.}$ ) und mit Wiederbelastung zur Ermittlung des Steifemoduls $E^*$ im quasilinearen Versuchsabschnitt. Gesamtdauer des Versuchs: ca. 450 Tage.....	58
Abb. 12: Der Steifemodul $E^* = d\sigma/d\varepsilon$ in Abhängigkeit von der Axialverformung $\varepsilon$ .....	59
Abb. 13: Der Steifemodul $E^* = d\sigma/d\varepsilon$ in Abhängigkeit von der relativen Axialverformung $\varepsilon/\varepsilon(\sigma_{\text{max}})$ .....	60
Abb. 14: Nachweis zur Güte der Wegregelung während einer Versuchsphase mit Spannungsrelaxation. Die Störung mit einem Weg-Sprung von $\Delta L \approx 1\mu\text{m}$ bewirkt den Spannungsabfall von $\Delta\sigma \approx 0.2\text{MPa}$ - in Übereinstimmung mit $\Delta\sigma = E^* \cdot \Delta L/L_0$ für $E^* = 36\text{GPa}$ und $L_0 = 200\text{mm}$ .....	61
Abb. 15: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit 12 Relaxationsphasen. Die Legende nennt die Spannung und die relative Verformung $\varepsilon/\varepsilon(\sigma_{\text{max}})$ bei Beginn der Relaxationsphase. Ohne Feuchtwirkung (20 %rF) bleibt der Verlauf der Spannungsabnahme während einer Relaxationsphase (wie schon der Steifemodul $E^*$ ) bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu unverändert.....	62
Abb. 16: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit sechs Relaxationsphasen. Das Relaxationsverhalten bleibt bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu unverändert.....	63

Seite

Abb. 17: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit zwei Relaxationsphasen. Das Relaxationsverhalten bleibt bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu unverändert.....	64
Abb. 18: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit Relaxationsphasen. Die Ziffern in der Legende verweisen auf die Spannung und die Verformung bei Start einer Relaxationsphase. Exemplarisch ist für Relaxationsphasen (4), (8) und (9) anhand „eps - eps_o“ ablesbar, wo die Bedingung $\varepsilon = const$ eingehalten wurde.....	65
Abb. 19: Spannungsrelaxation in Abhängigkeit vom Feuchteangebot. Vergleich der repräsentativen Modellkurven zu deckungsgleichen Einzelergebnissen für Steinsalz (z2SP gegenüber z2SP+ph).....	66
Abb. 20: Spannungsrelaxation in Abhängigkeit vom Feuchteangebot. Vergleich der repräsentativen Modellkurven zu deckungsgleichen Einzelergebnissen für Steinsalz (z2SP und z2SP+ph) gegenüber dem z3OS-Ro mit carnallitischen Beimengungen.....	67
Abb. 21: Spannungsrelaxation. Vergleich der repräsentativen Modellkurven zu deckungsgleichen Einzelergebnissen für Steinsalz (z2SP und z2SP+ph) in Abhängigkeit vom Feuchteangebot und der Verformungsrate im Uniaxial-Festigkeitsversuch.....	68
Abb. 22: Triaxial-Kriechversuch Asse2/94/04138 (z2SP). Beispiel zum Bedarf für Zeit bzw. Verformung zum Wiedererlangen stationären Kriechens.....	69
Abb. 23: Extrapolation von Stoffgesetzen zum stationären Kriechen aus dem experimentell zugänglichen Nachweisbereich zu geringen Spannungen für $T = 22\text{ °C}$ (295 K). Das S&C_psc-Gesetz (vgl. Tab. 3) wurde aus Befunden bei Korngrößen ( $d < 5\text{ mm}$ ) abgeleitet.....	70
Abb. 24: Extrapolation von Stoffgesetzen zum stationären Kriechen aus dem experimentell zugänglichen Nachweisbereich für $T = 22\text{ °C}$ (295 K). Zu BGRa und S&C_psc ( $d = 5\text{ mm}$ ) wurden die Graphen für $T = 50\text{ °C}$ hinzugefügt. Der Befund aus fünf Uniaxial-Langzeit-Kriechversuchen an Steinsalz (z3OS-BK/BD) dient als Beispiel für die Bandbreite im Kriechvermögen von natürlichem Steinsalz.....	71
Abb. 25: Triaxial-Kriechversuch mit einem Spannungszustand im Dilatanz-Regime zum Nachweis der Spannungsempfindlichkeit unter Feuchtwirkung.....	72
Abb. 26: Uniaxial-Kriechversuch an Steinsalz, GoEB1Bo1.2, z2HS2. Ausschnitt mit Lastwechsel bei hoher relativer Luftfeuchte (65 %rF).....	73
Abb. 27: Dauerstandversuch zum Deformationsverhalten von Anhydrit (Go1002; z3HA8; Teufe: 690 m) bei $T = 150\text{ °C}$ .....	74
Abb. 28: Vergleich der stationären Kriechrate für Steinsalz (BGR-Modellkurven) mit den Daten für Anhydrit bei $T = 150\text{ °C}$ ; vergl. Abb. 27.....	75

Seite

Abb. 29: Anhydrit-Prüfkörper ( $L_0 \approx 248 \text{ mm}$ ;  $D_0 \approx 99 \text{ mm}$ ) aus der Bohrung Go1005, Teufe:  $\sim 615 \text{ m}$ . Die anhydritische Matrix ist feinkristallin, die kavernen Einschlüsse enthalten Carnallit. Deren Volumenanteil beträgt gemäß einfacher Schnittlängen-Analyse 5 % - 7%.....76

Abb. 30: Dauerstandverhalten von massivem Anhydrit (Go1005, z3HA8) bei wechselnder relativer Luftfeuchte. Unter konstant einwirkender Axialspannung von 20 MPa resultiert nach Abklingen einer Anpassphase eine mittlere Stauchrate von ca.  $1 \mu\text{m}$  pro Woche.....77

Abb. 31: Uniaxial-Kriechversuch an Anhydritmittelsalz ( $T = 22 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Untersuchung zur Spannungskonzentration und Rissentwicklung in der Grenzschicht von Anhydrit zu Steinsalz. Entlastung im spröden Anhydrit durch lokalisierten Rissfortschritt führt zu Spannungskonzentrationen im Steinsalz. Die dort verursachte Auflockerung setzt sich im Gegensatz zur Bildung von Einzelrissen im Anhydrit im Steinsalz in einem diffusen Auflockerungssaum fort (Details in: PLISCHKE & SCHULZE 2003).....78

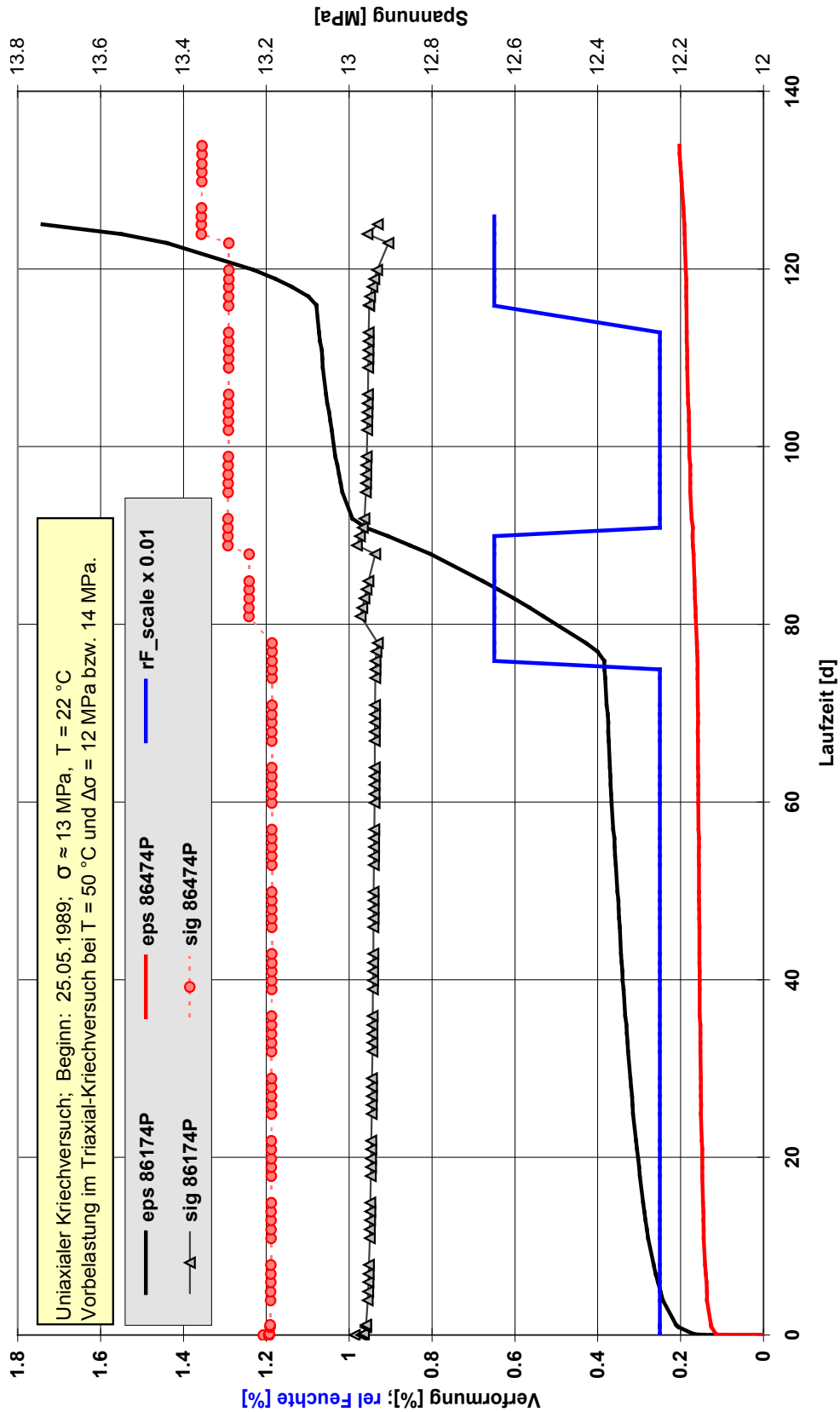


Abb. 1: Uniaxiale Kriechversuche bei ca. 13 MPa mit Wechseln der relativen Luftfeuchte zwischen 25 %rF und 65 %rF. Die beiden Prüfkörper waren in der Klimakammer des Prüfstands gemeinsam eingebaut, bei gleicher Axialkraft resultieren die Unterschiede in der Axialspannung aus unterschiedlichen Durchmessern und Formänderungen während der Verformung. Die beiden Prüfkörper waren zuvor für Triaxial-Kriechversuche genutzt worden. Beim Ausbau aus der Triaxialzelle verölte der Prüfkörper 86474P, daher zeigt er im Kriechverhalten keine Reaktion auf Feuchtwchsel.

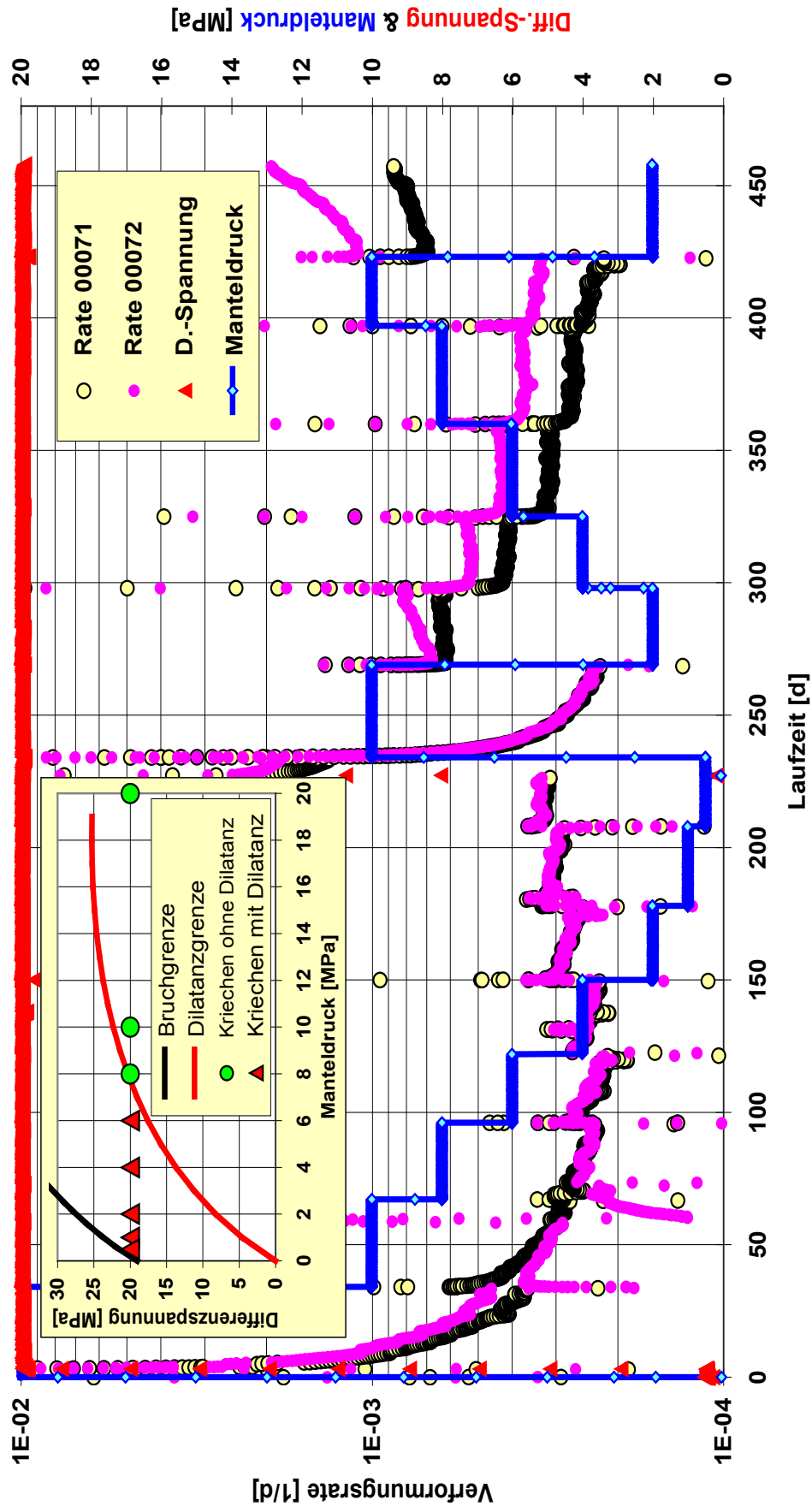


Abb. 2: Zwei Kriechversuche an Steinsalz (z2HS1; GoEB1RB341), konstante Differenzspannung  $\sigma = 20$  MPa, Temperatur  $T = 30$  °C. Die Kriechrate ist abhängig vom Manteldruck ( $p = 0,5 - 20$  MPa), d. h. von der Belastung relativ zur Dilatanzgrenze. Nach Entlastung, Zugabe von NaCl-gesättigter Lösung und Fortsetzung des Versuchs am 230. Tag erfolgte verstärkte Feuchtwirkung im Dilatanz-Regime.



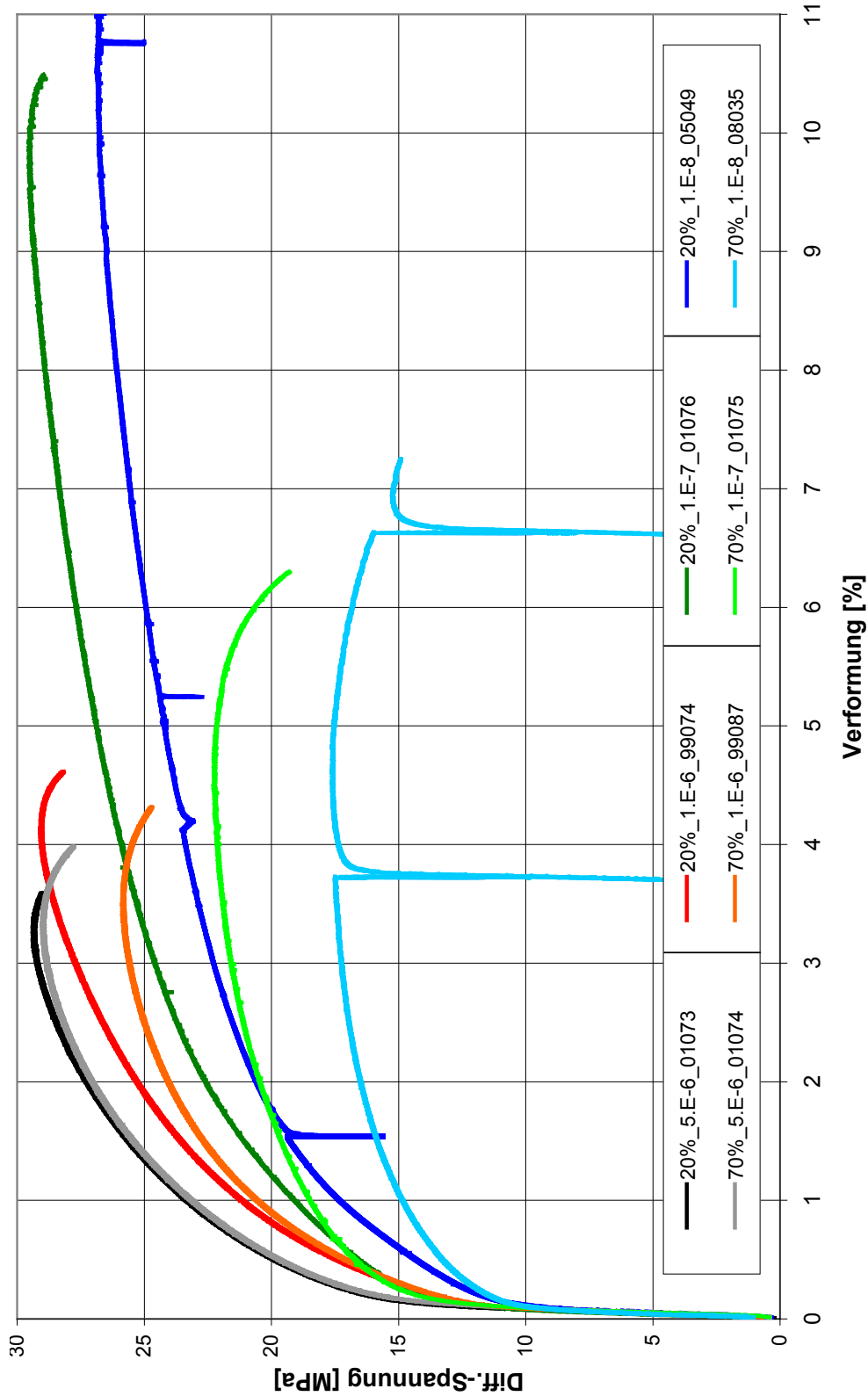


Abb. 3: Uniaxial-Festigkeitsversuche an Asse-Speisesalz (z2SP) bei T = 22 °C. Relative Luftfeuchte bei 20 %rF oder 70 %rF. Stauchraten in [s<sup>-1</sup>]: 5.0·10<sup>-6</sup>; 1.0·10<sup>-7</sup>; 1.0·10<sup>-8</sup>. Einige der Versuche enthalten Haltephasen zur Ermittlung der Spannungsrelaxation. Der Versuche 05049 wurde mit dem Asse-Speisesalz (z2SP+ph) durchgeführt, das leicht lösliche polyhalitische Beimengungen enthält. Wegen der geringen relativen Luftfeuchte von nur 20 %rF bleiben diese ohne Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten (vgl. Verlauf in Abb. 4).

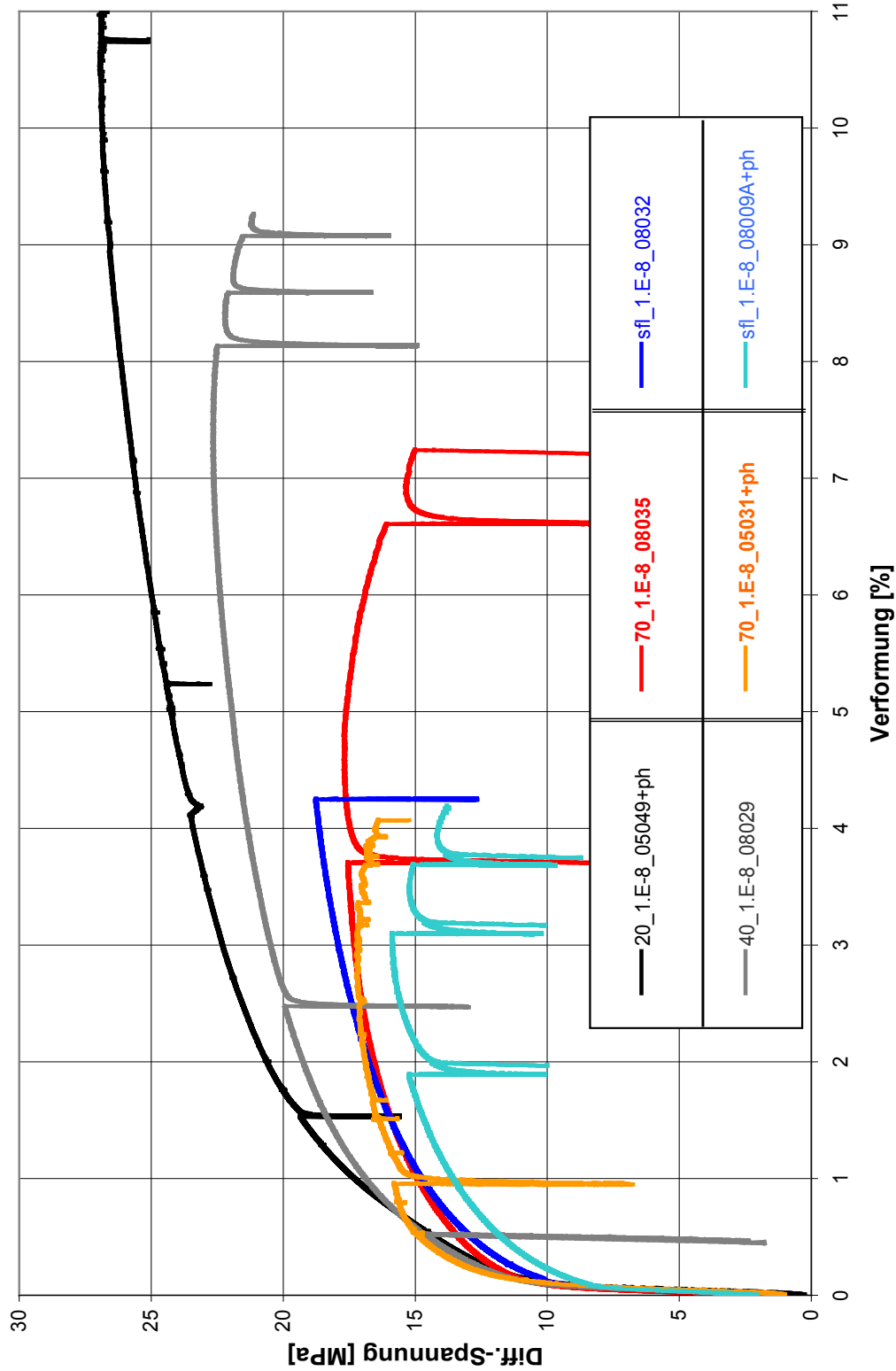


Abb. 4: Vergleich der Feuchtwirkung auf das Asse-Speisesalz (z2SP) und das mit polyhalitischen Beimengungen (z2SP+ph) und das mit polyhalitischen Beimengungen (z2SP+ph) bei relativen Luftfeuchte von 70 %rF wie auch bei Flutung mit der Mg<sup>2+</sup>-reichen Lösung (sfl) sind die max. Fließspannung und die Verformung bis zum Maximum für beide Salztypen reduziert, wobei das (z2SP+ph)-Steinsalz empfindlicher reagiert.

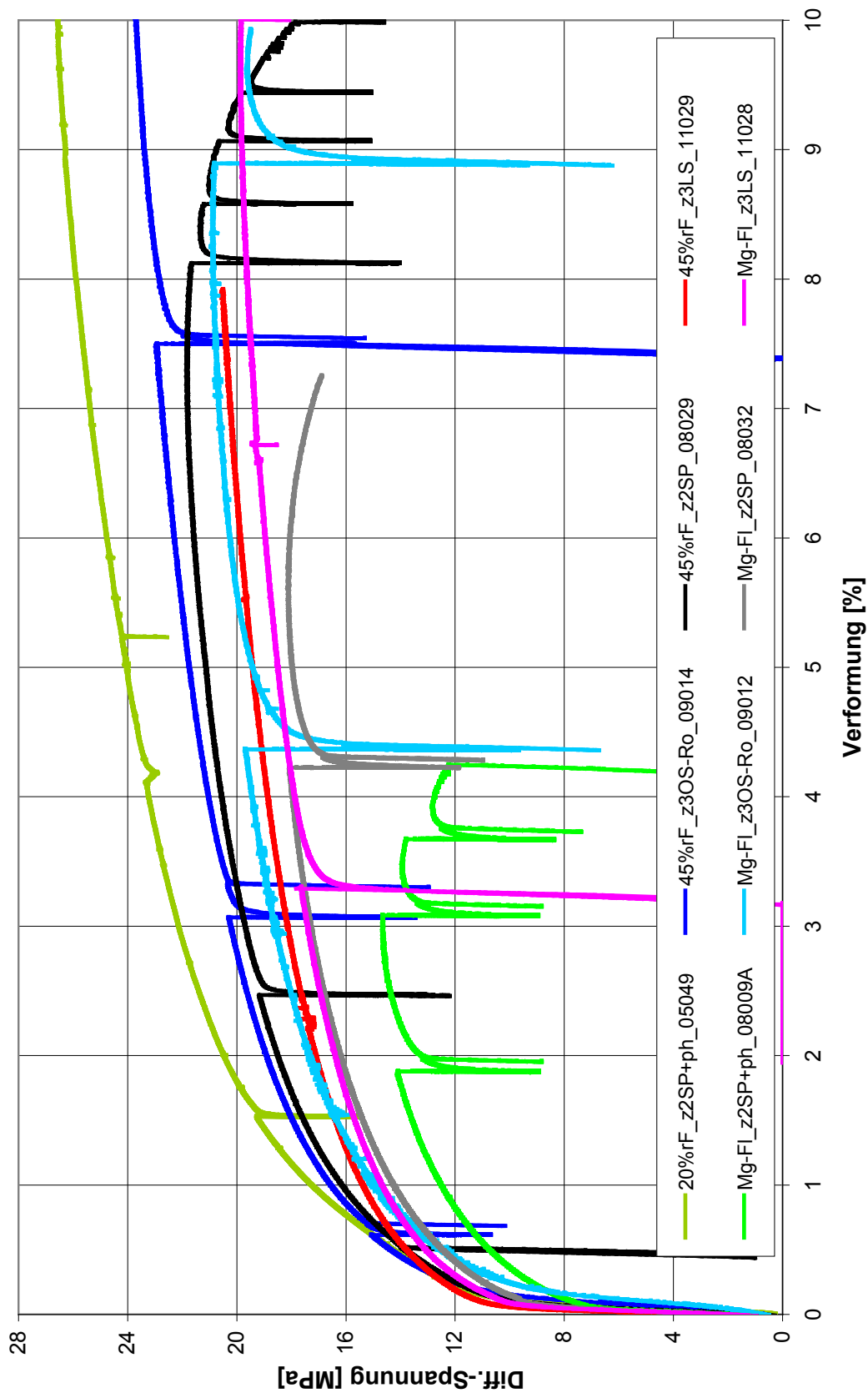


Abb. 5: Festigkeitsverhalten der Steinsalztypen z2SP, z3OS-Ro und z3LS bei 45 %rF und Einwirken der Mg<sup>2+</sup>-reichen Lösung. Zum Vergleich sind die Versuchspuren für das Steinsalz z2SP+ph bei nur 20 %rF und unter Einwirken der Lösung dargestellt  $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-8} \text{ d}^{-1}$ .

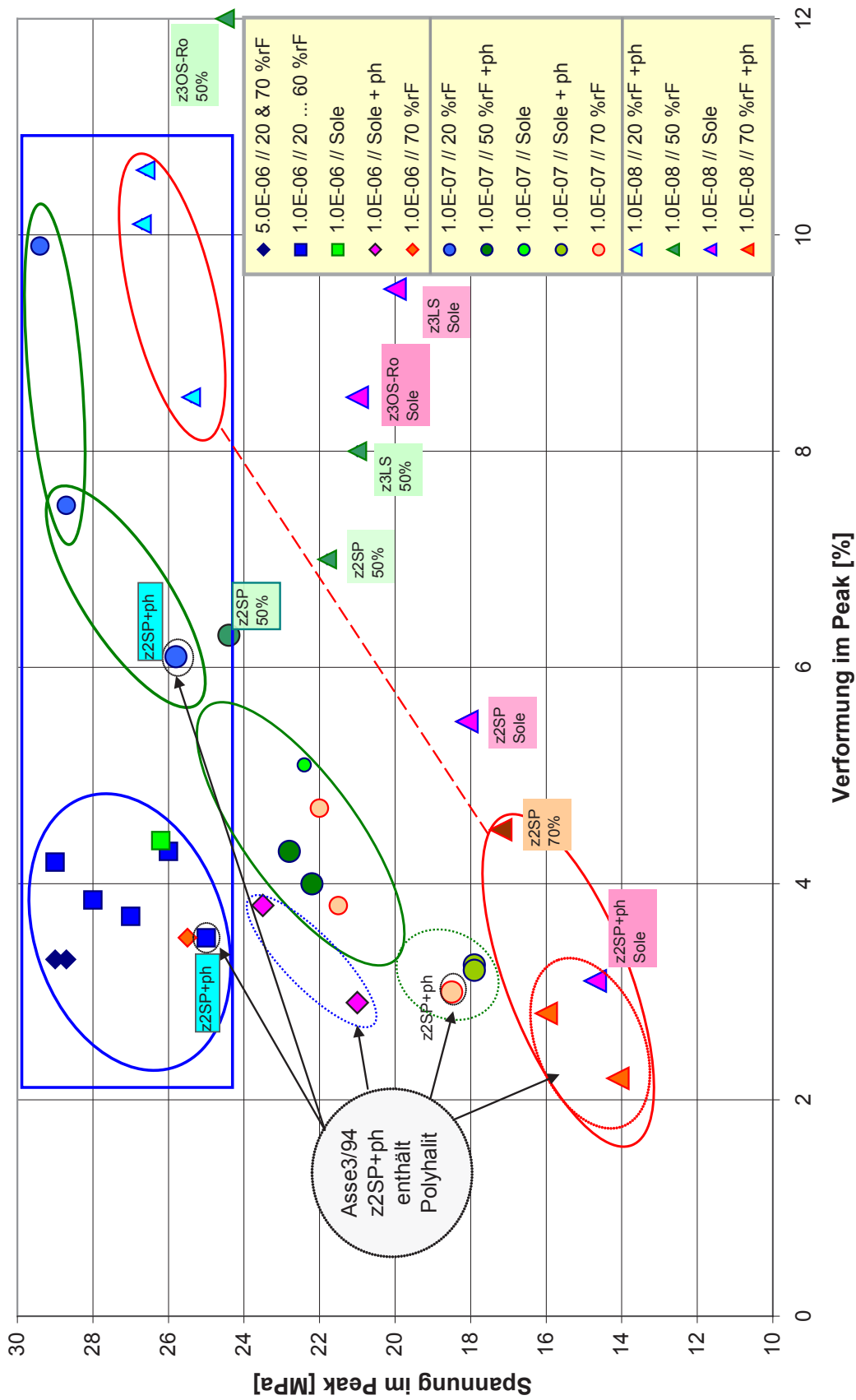


Abb. 6: Axialspannung und Axialverformung im Festigkeitsmaximum in Abhängigkeit von der Stauchrate und dem Feuchteangebot. Polyhalitisches Speisesalz (z2SP+ph; in punktierten Kreisen) zeigt die systematisch stärkere Reaktion auf ein erhöhtes Feuchteangebot.

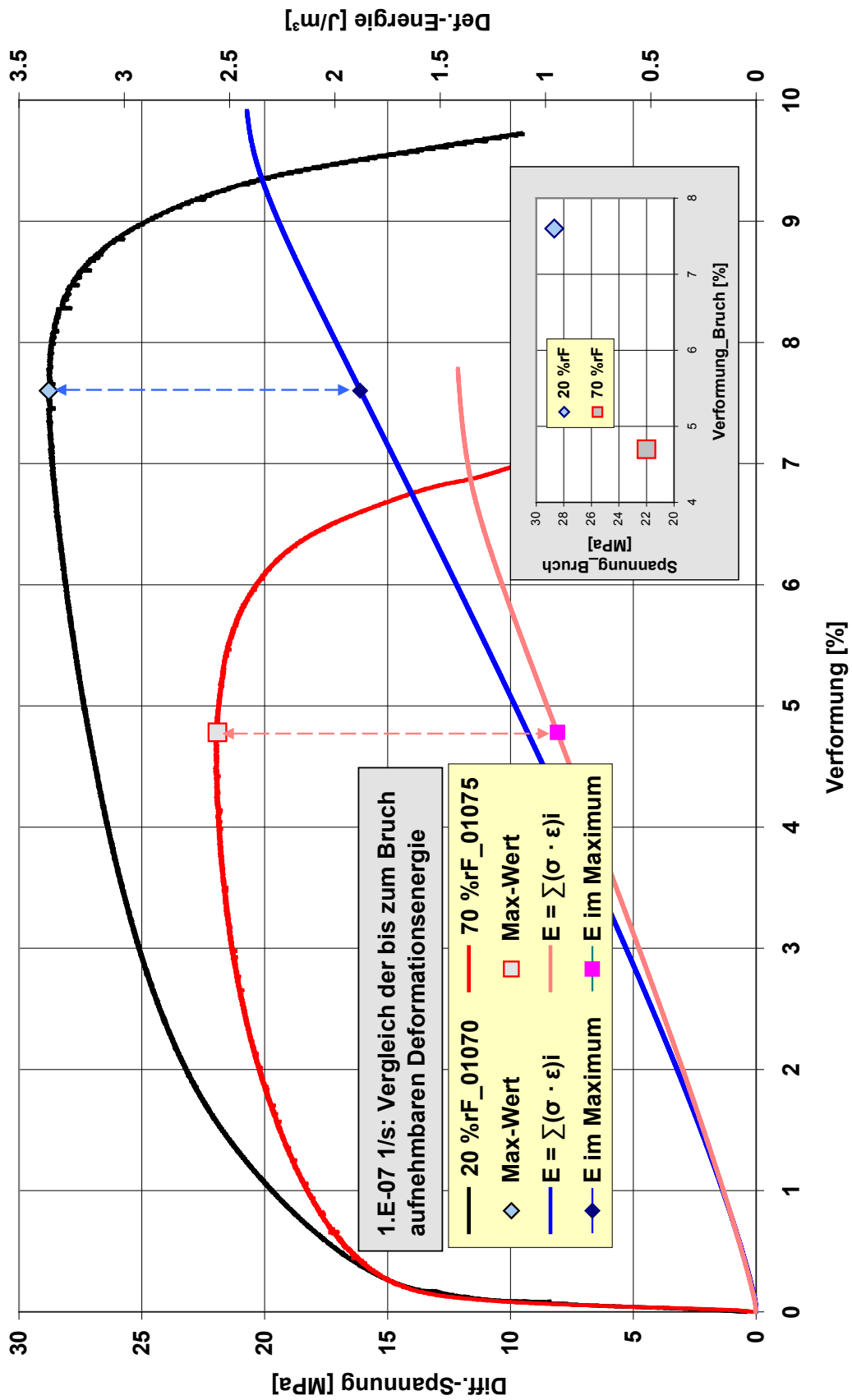


Abb. 7.1: Uniaxiale Festigkeitsversuche ( $\dot{\epsilon} = 1,0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ ) bei unterschiedlicher relativer Luftfeuchte (20 %rF und 70 %rF). Vergleich der Axialspannung im Festigkeitsmaximum und der Axialverformung mit der bis zum Maximum jeweils aufnehmbaren Deformationsenergie.

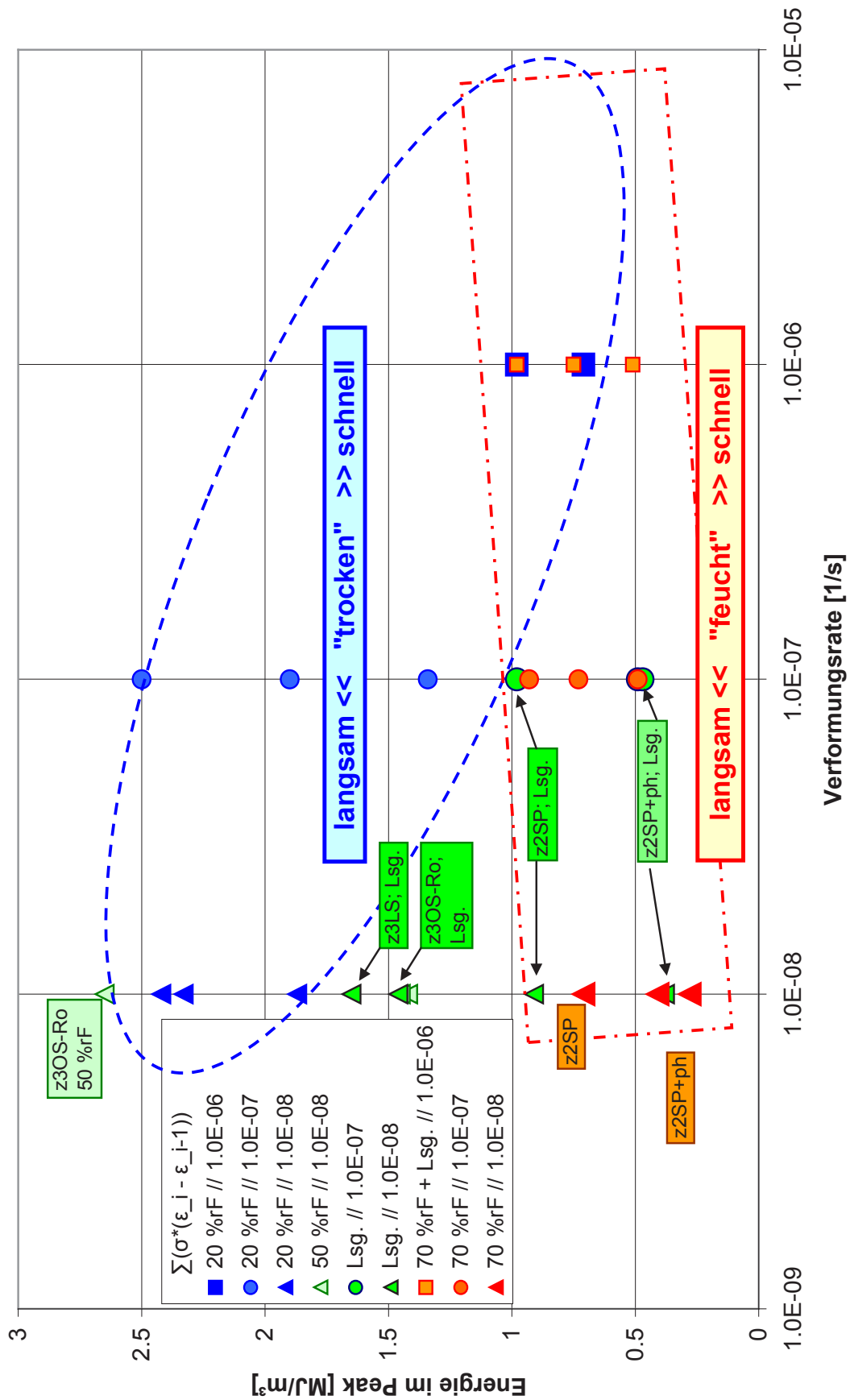


Abb. 7.2: Deformationsenergie, die bis zum Festigkeitsmaximum aufgenommen wird, als Funktion des Feuchteangebotes und der Stauchrate.

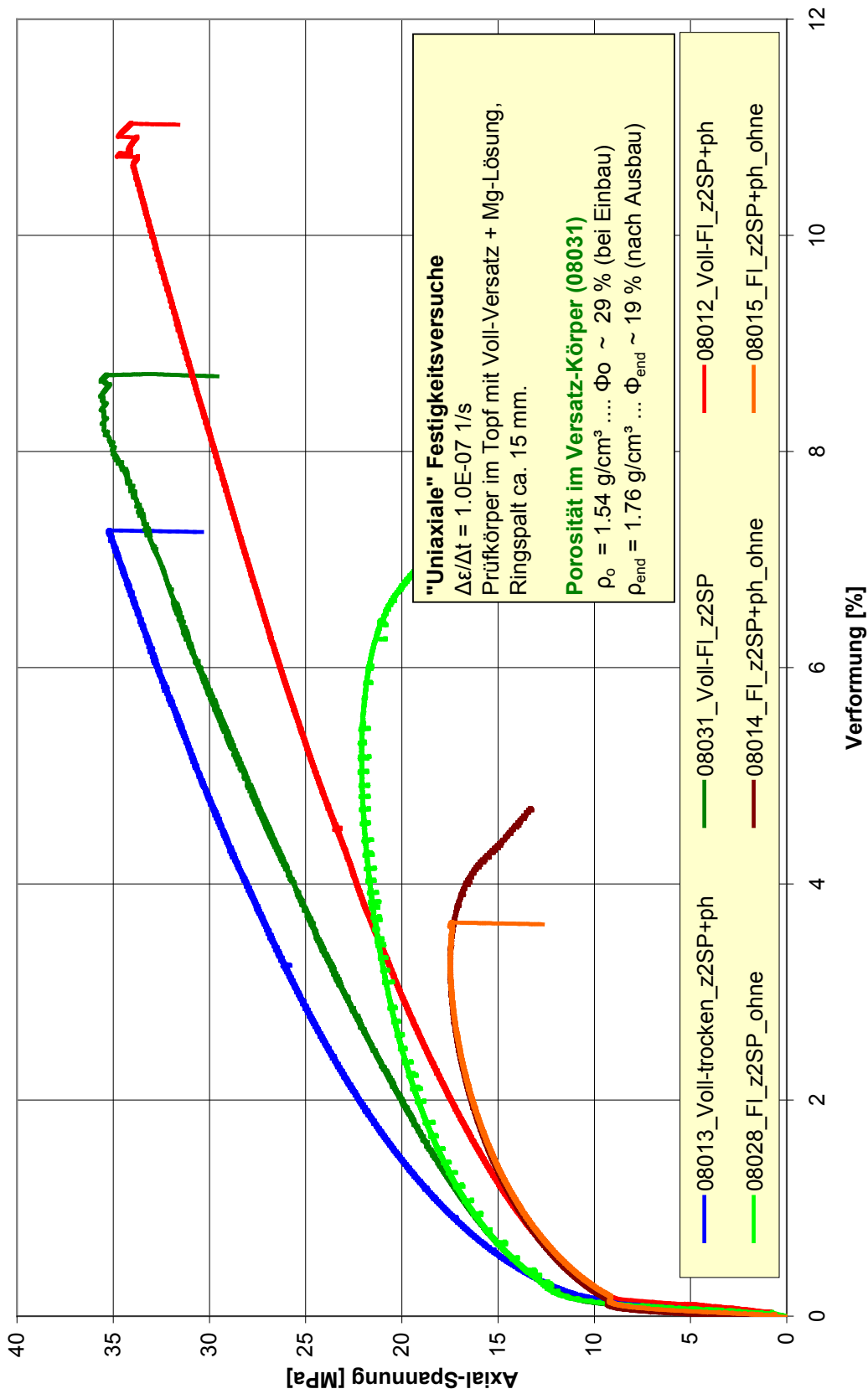


Abb. 8: Wirkung eines seitlichen Stützdrucks durch Vollversatz aus Steinsalz-Pulver (Körnung  $\leq 2$  mm) nach Zugabe der Mg<sup>2+</sup>-reichen Lösung (FI = Fluid) und ohne Flutung. Im Falle von Vollversatz enden die Versuche bei der im Prüfstand maximal aufbringbaren Axialkraft.

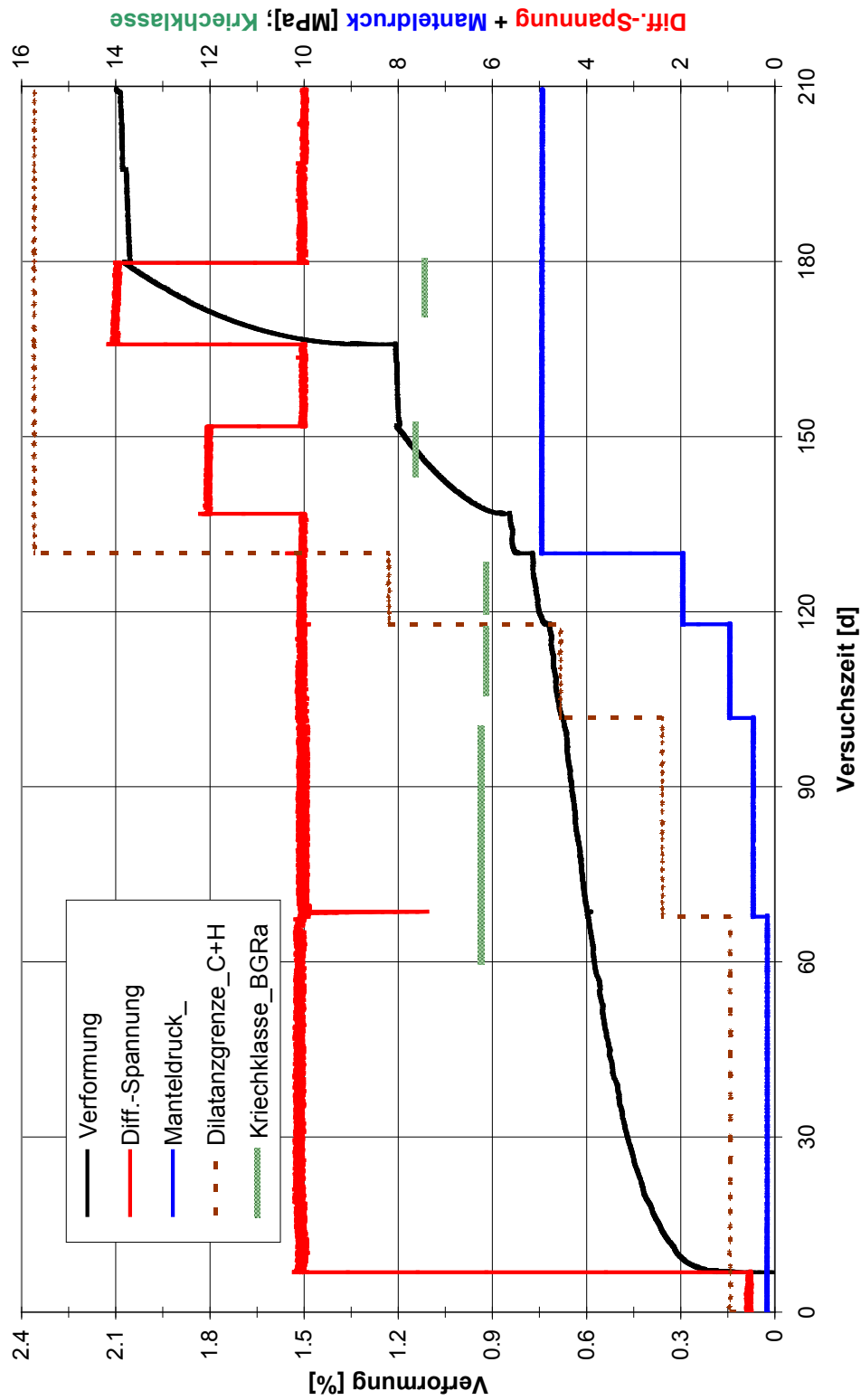


Abb. 9.1: Triaxial-Kriechversuch\_08036 an Asse-Speisesalz (zZSP) bei  $T = 30^\circ\text{C}$  nach Flutung mit  $\text{Mg}^{2+}$ -reicher Lösung in einem Salzgrus-Ringspalt. Zu Beginn lag die Spannung oberhalb der Dilatanzgrenze. In Abschnitten mit nahezu stationärem Kriechen wurde die Kriechklasse gemäß BGRa bestimmt, d. h. „Klasse 5“. Die ermittelten Kriechklassen bleiben im für Speisesalz üblichen Bereich, d. h. „Klasse  $< 8$ “. Aus den annähernd stationären Kriechraten in den Spannungsstufen bei 12 MPa und 14 MPa folgt als Spannungsexponent  $n = 4.2$ . Eine durch Feuchte-Wirkung erhöhte Duktilität und eine Reduktion der Spannungsempfindlichkeit auf den Exponenten  $n = 1$  werden nicht gefunden.





Abb. 9.2: Triaxial-Kriechversuch an Steinsalz (Asse2/94/08036, zZSP): Offene Druckzelle mit Prüfkörper im Schutzschlauch und nach Entfernen der Ummantelung für den mit Mg<sup>2+</sup>-reicher Lösung getränkten Voll-Versatz.

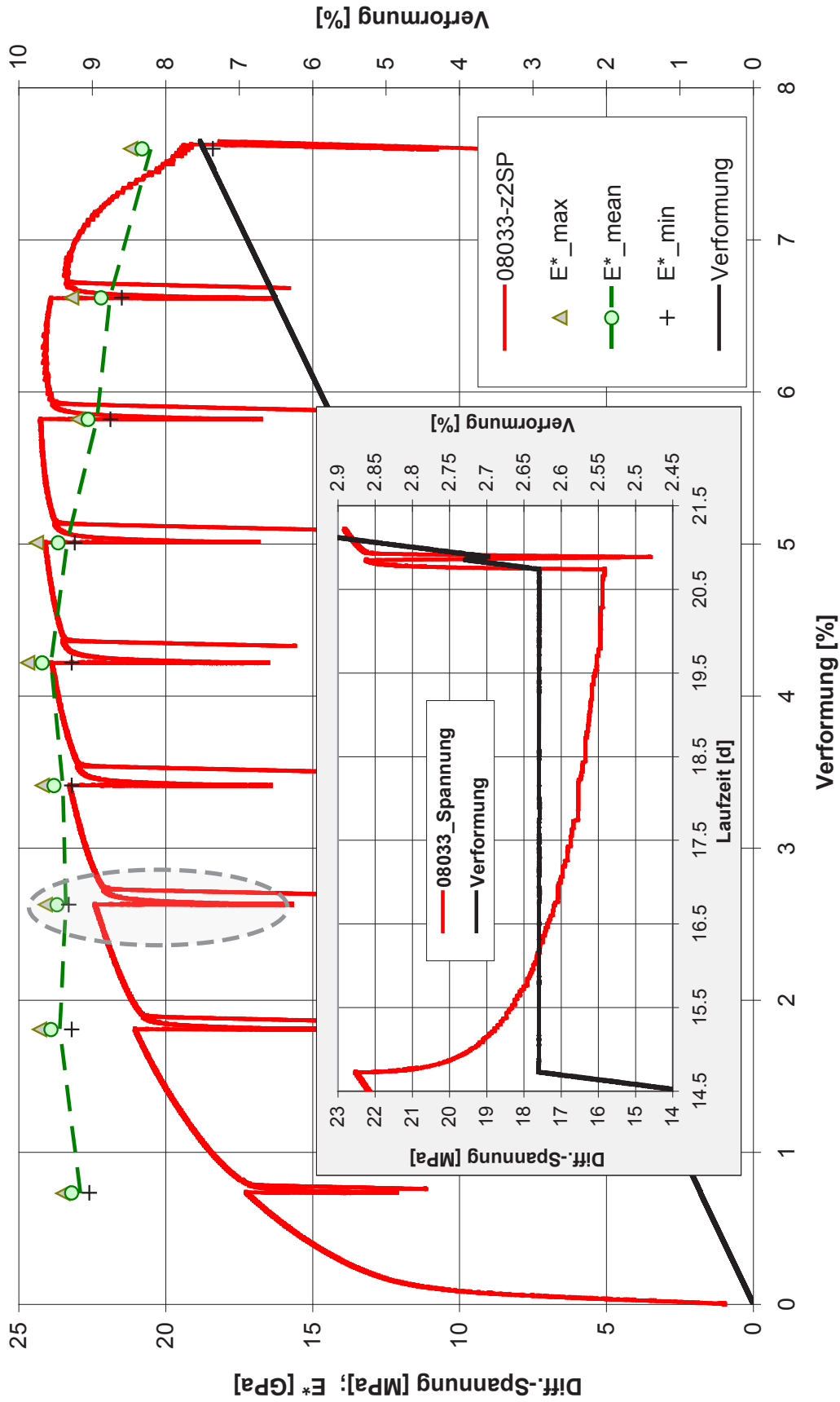


Abb. 10: Uniaxial-Festigkeitsversuch (08033-z2SP; 1,0-107 s1, 50 %rF;  $T = 22^\circ\text{C}$ ) mit Spannungsrelaxation ( $\varepsilon = \text{const}$ ) und mit Schleifen für Entlastung und Wiederbelastung zur Ermittlung des Steifemoduls  $E^*$  im quasi-linearen Versuchsabschnitt. Versuchsdauer: 62 Tage.

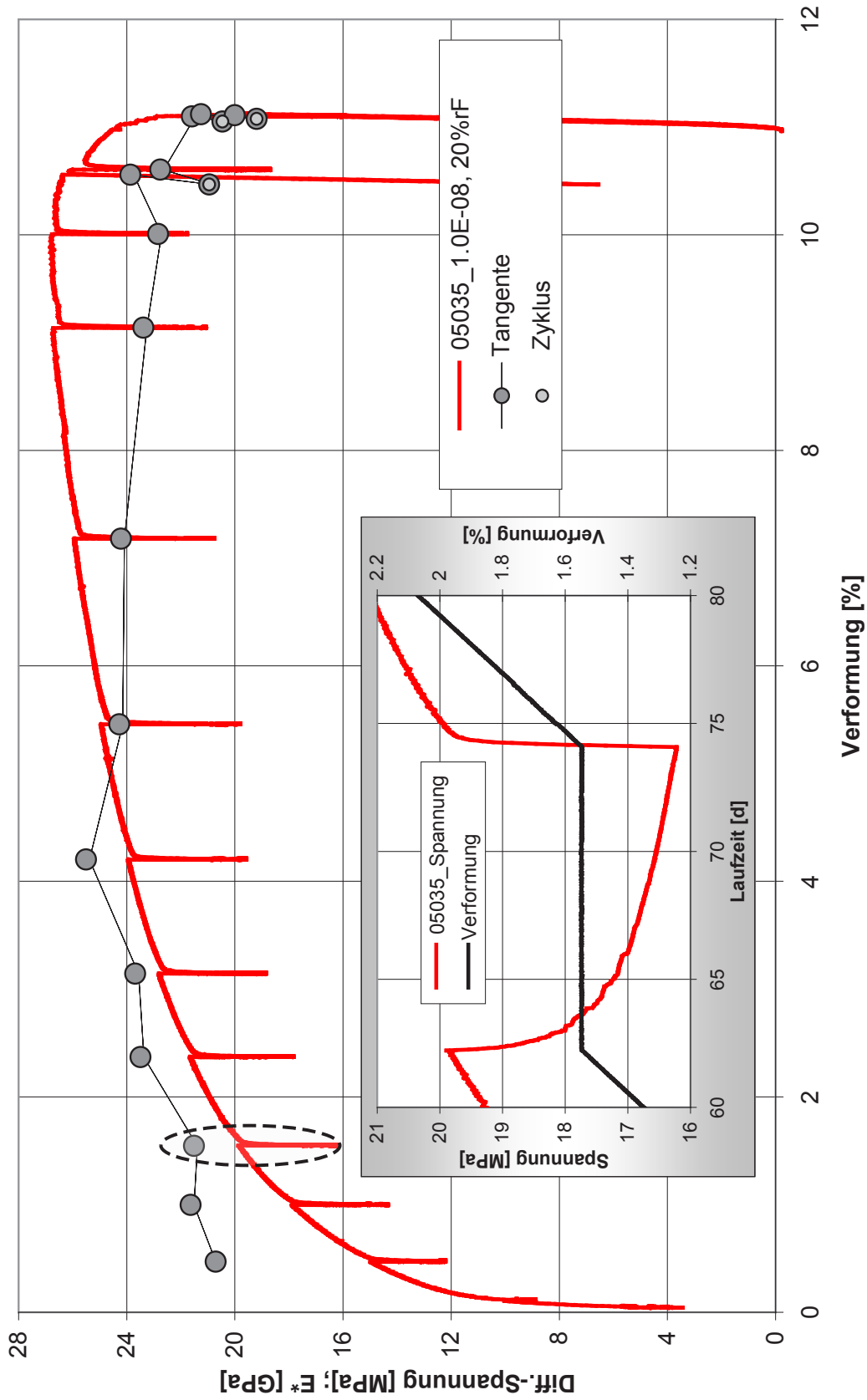


Abb. 11: Uniaxial-Festigkeitsversuch (05035-z2SP+ph; 1,0·108 s1, 20 %rF; T = 22 °C) mit Spannungsrelaxation ( $\epsilon = \text{const.}$ ) und mit Wiederbelastung zur Ermittlung des Steifemoduls  $E^*$  im quasi-linearen Versuchsabschnitt. Gesamtdauer des Versuchs: ca. 450 Tage.

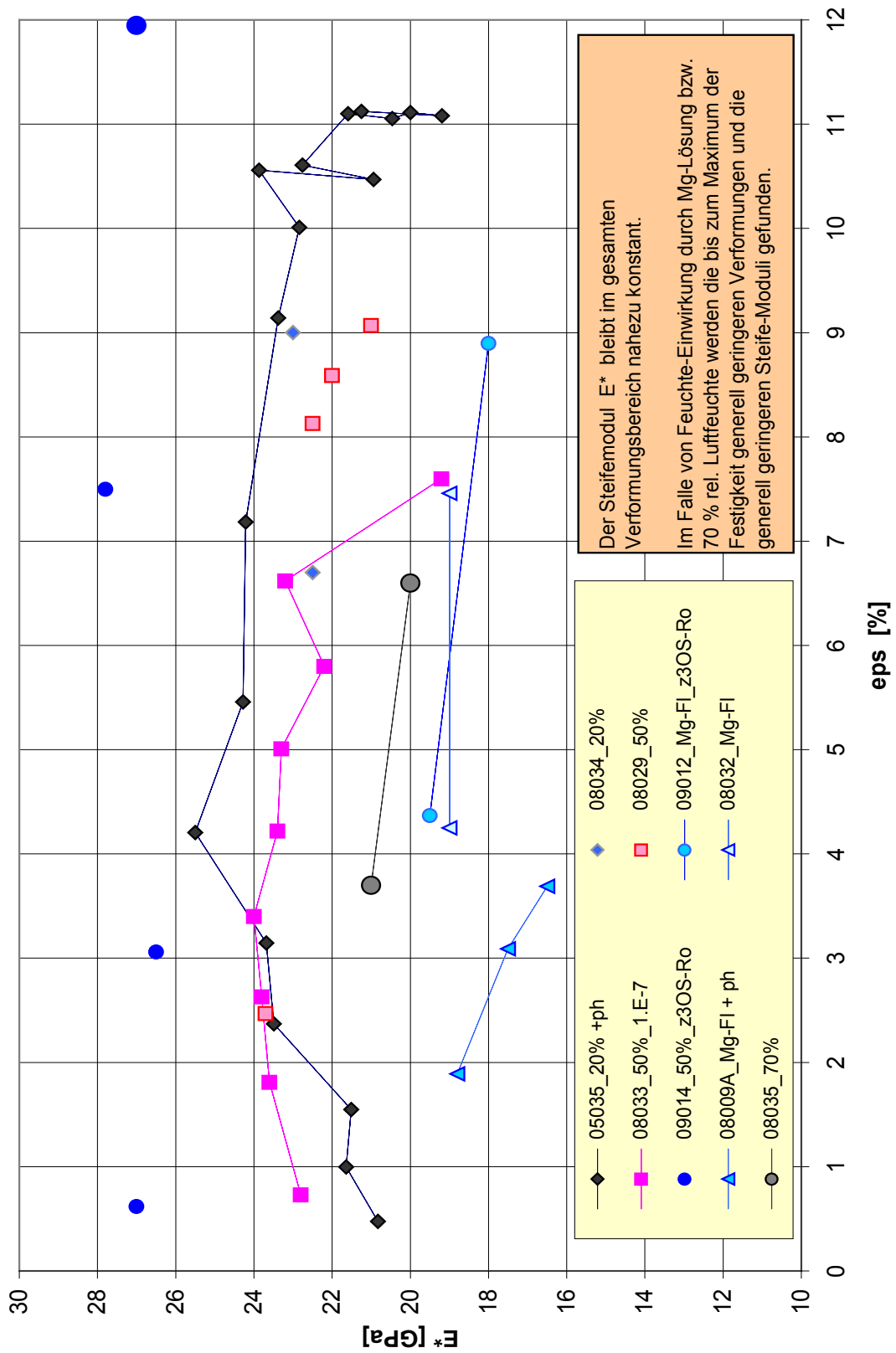


Abb. 12: Der Steifemodul  $E^* = d\sigma/d\varepsilon$  in Abhängigkeit von der Axialverformung  $\varepsilon$ .

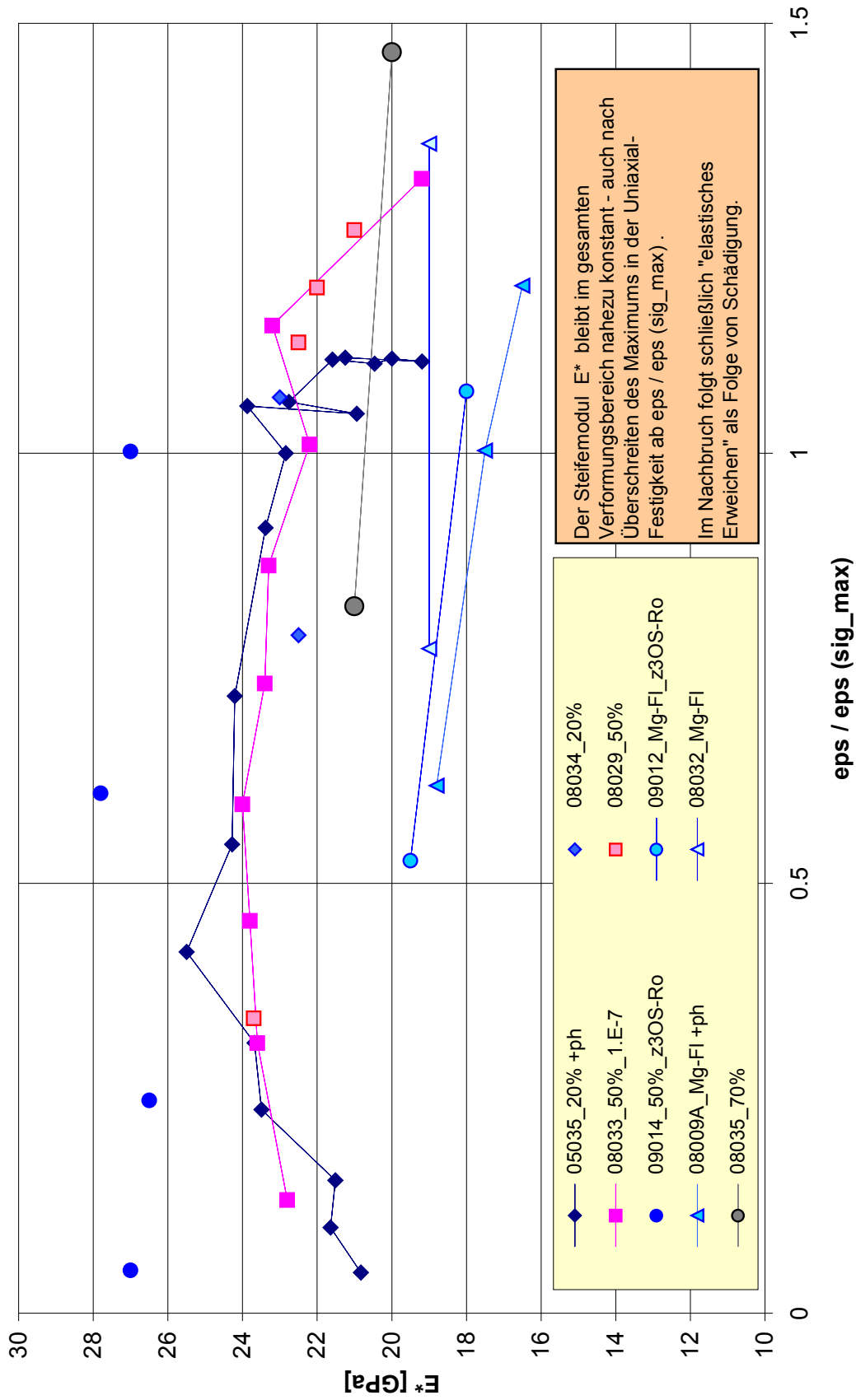


Abb. 13: Der Steifemodul  $E^* = d\sigma/d\epsilon$  in Abhängigkeit von der relativen Axialverformung  $\epsilon/\epsilon(\sigma_{max})$ .

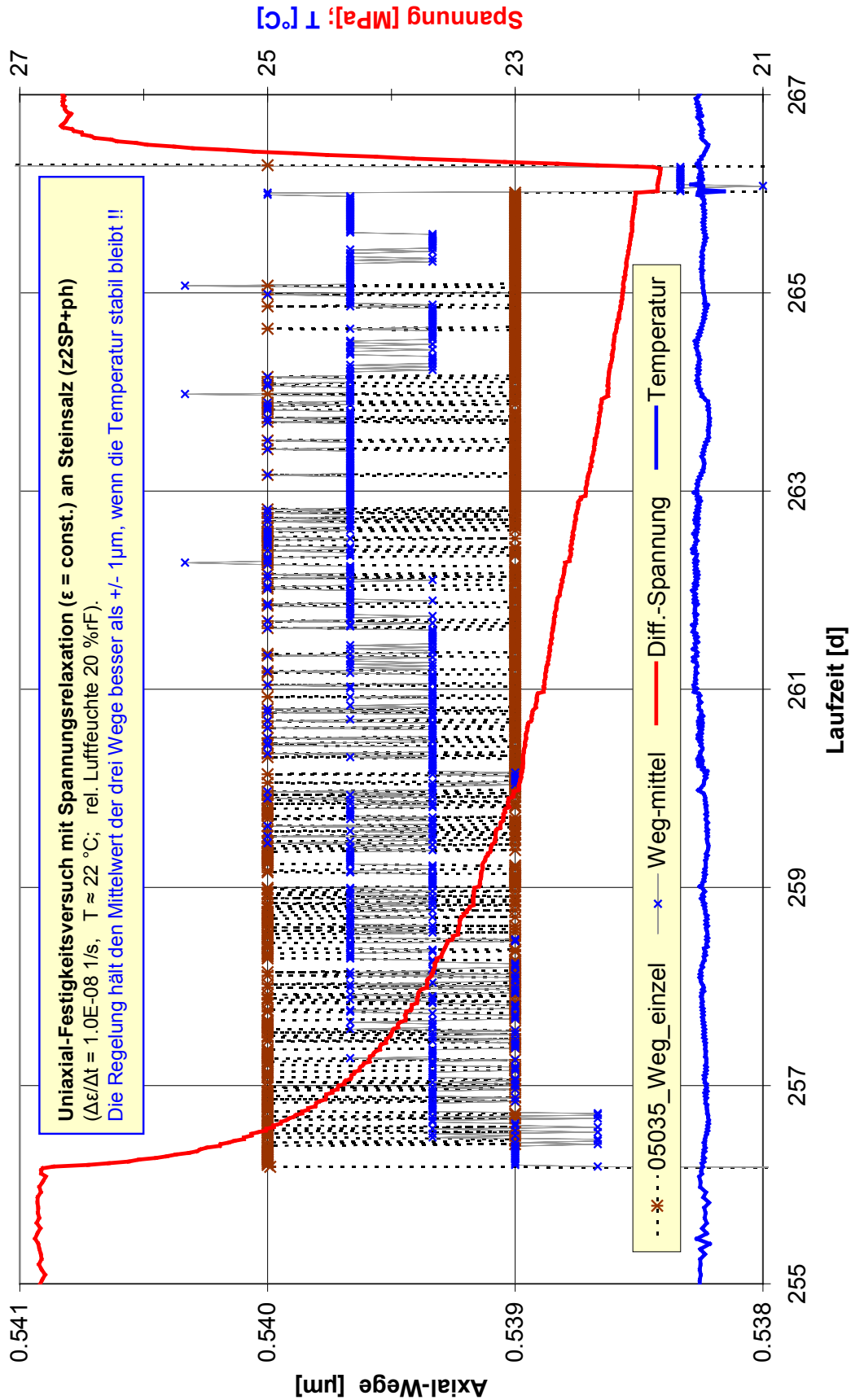


Abb. 14: Nachweis zur Güte der Wegregelung während einer Versuchsphase mit Spannungsrelaxation. Die Störung mit einem Weg-Sprung von  $\Delta L \approx 1\mu\text{m}$  bewirkt den Spannungsabfall von  $\Delta\sigma \approx 0.2\text{MPa}$  - in Übereinstimmung mit  $\Delta\sigma = E^* \cdot \Delta L / L_0$  für  $E^* = 36\text{GPa}$  und  $L_0 = 200\text{mm}$ .

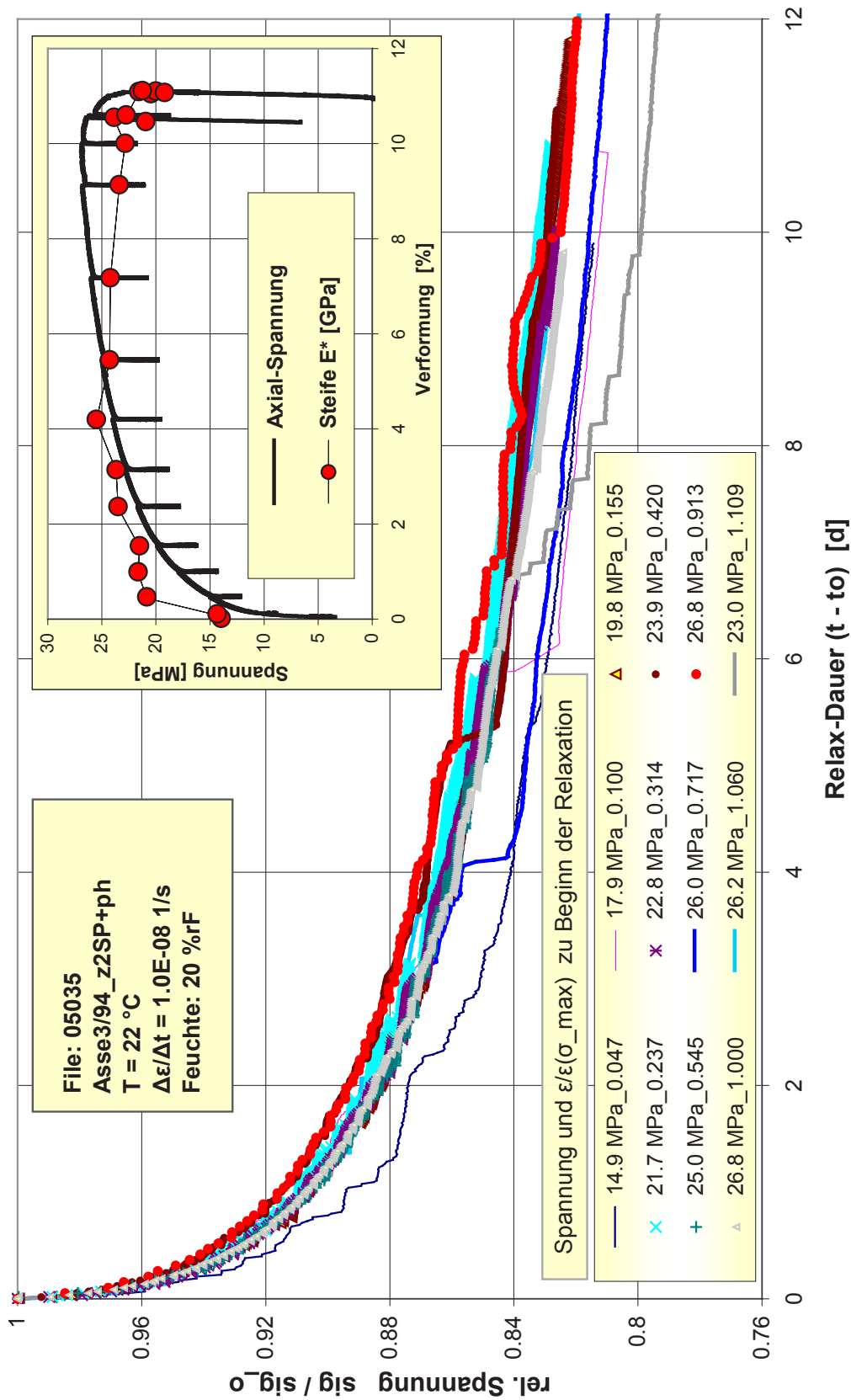


Abb. 15: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit 12 Relaxationsphasen. Die Legende nennt die Spannung und die relative Verformung  $\epsilon/\epsilon(\sigma_{max})$  bei Beginn der Relaxationsphase. Ohne Feuchtwirkung (20 %rF) bleibt der Verlauf der Spannungsabnahme während einer Relaxationsphase (wie schon der Steifemodul  $E^*$ ) bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu unverändert.

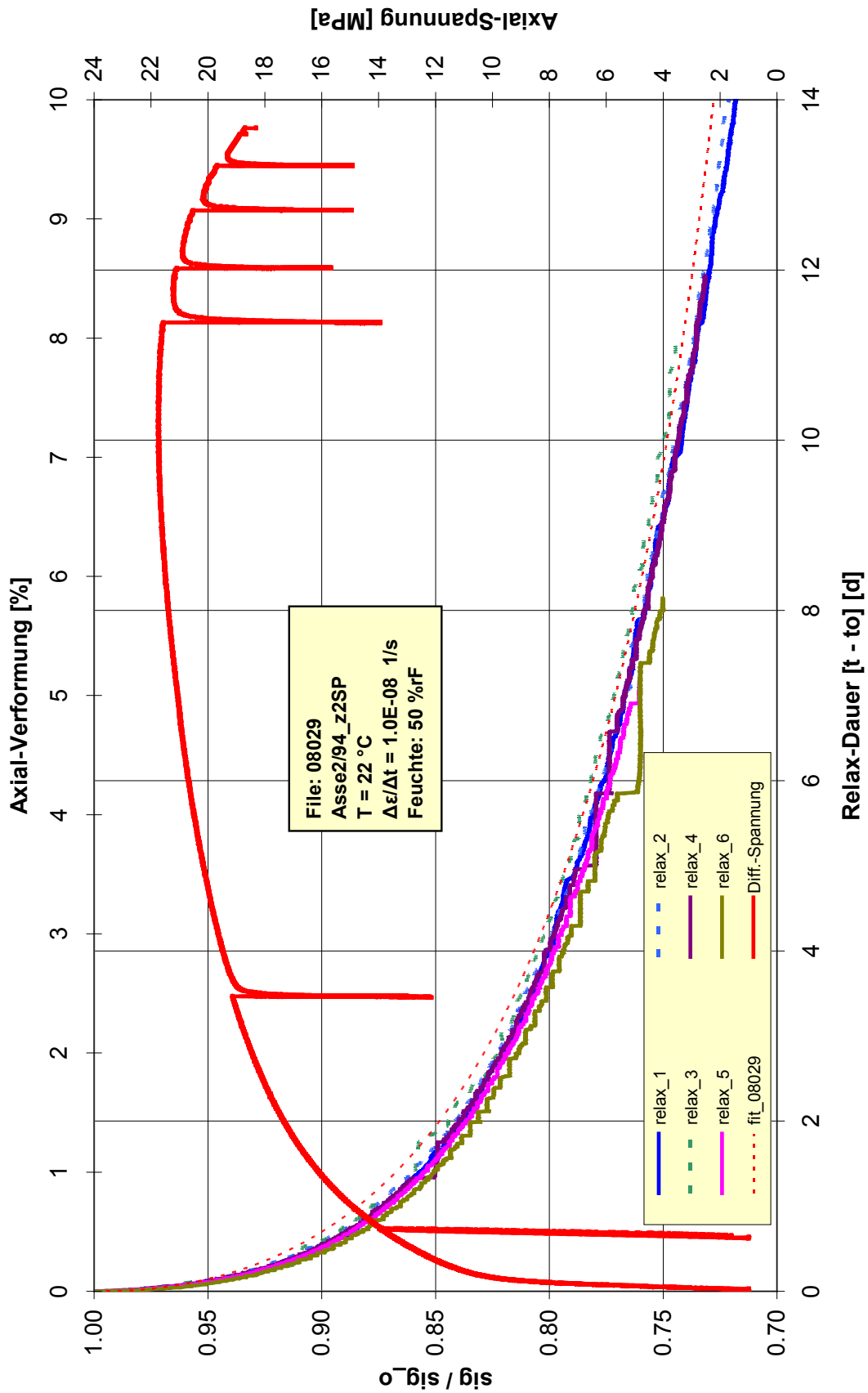


Abb. 16: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit sechs Relaxationsphasen. Das Relaxationsverhalten bleibt bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu unverändert.



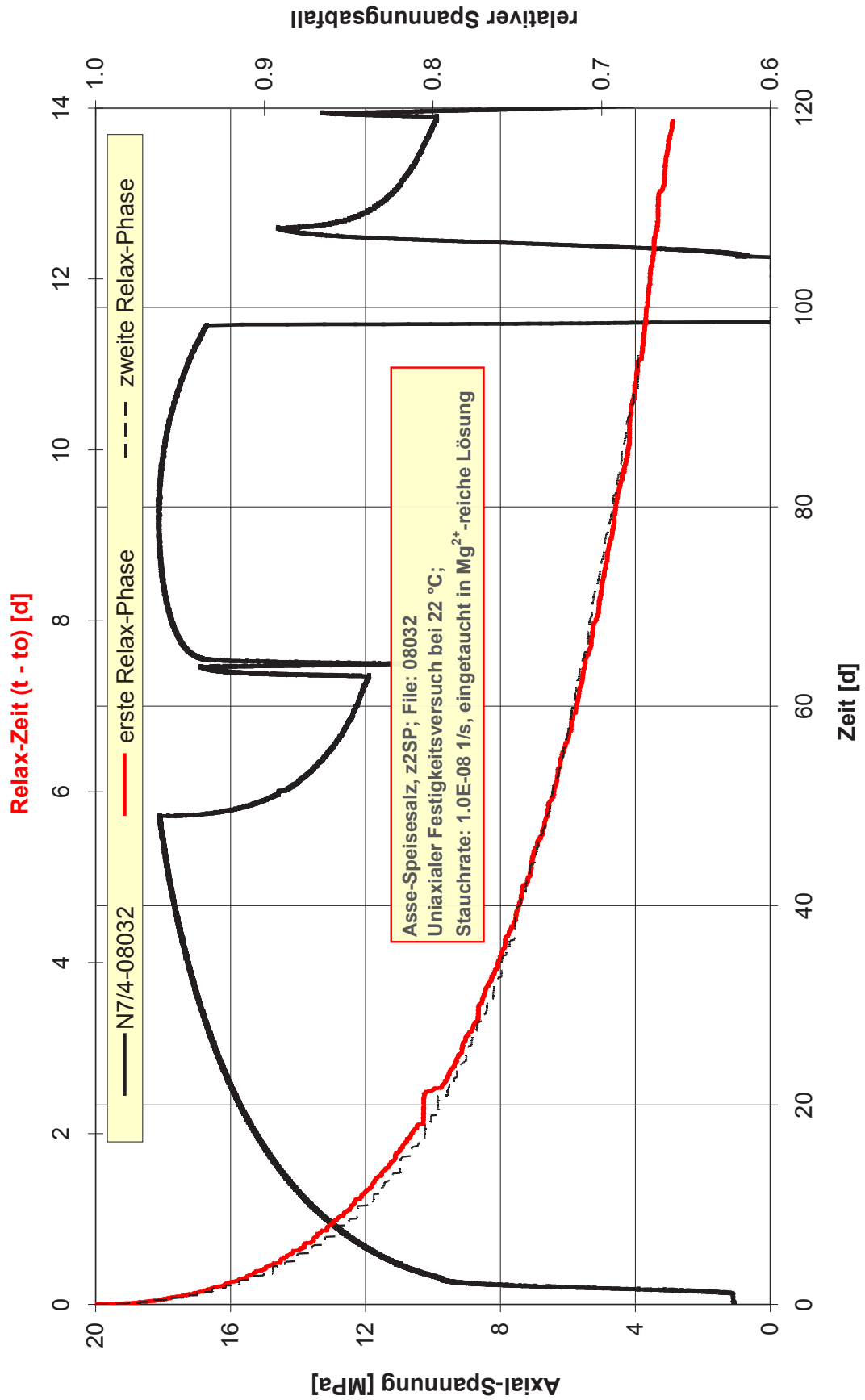


Abb. 17: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit zwei Relaxationsphasen. Das Relaxationsverhalten bleibt bis über das Festigkeitsmaximum hinaus nahezu unverändert.

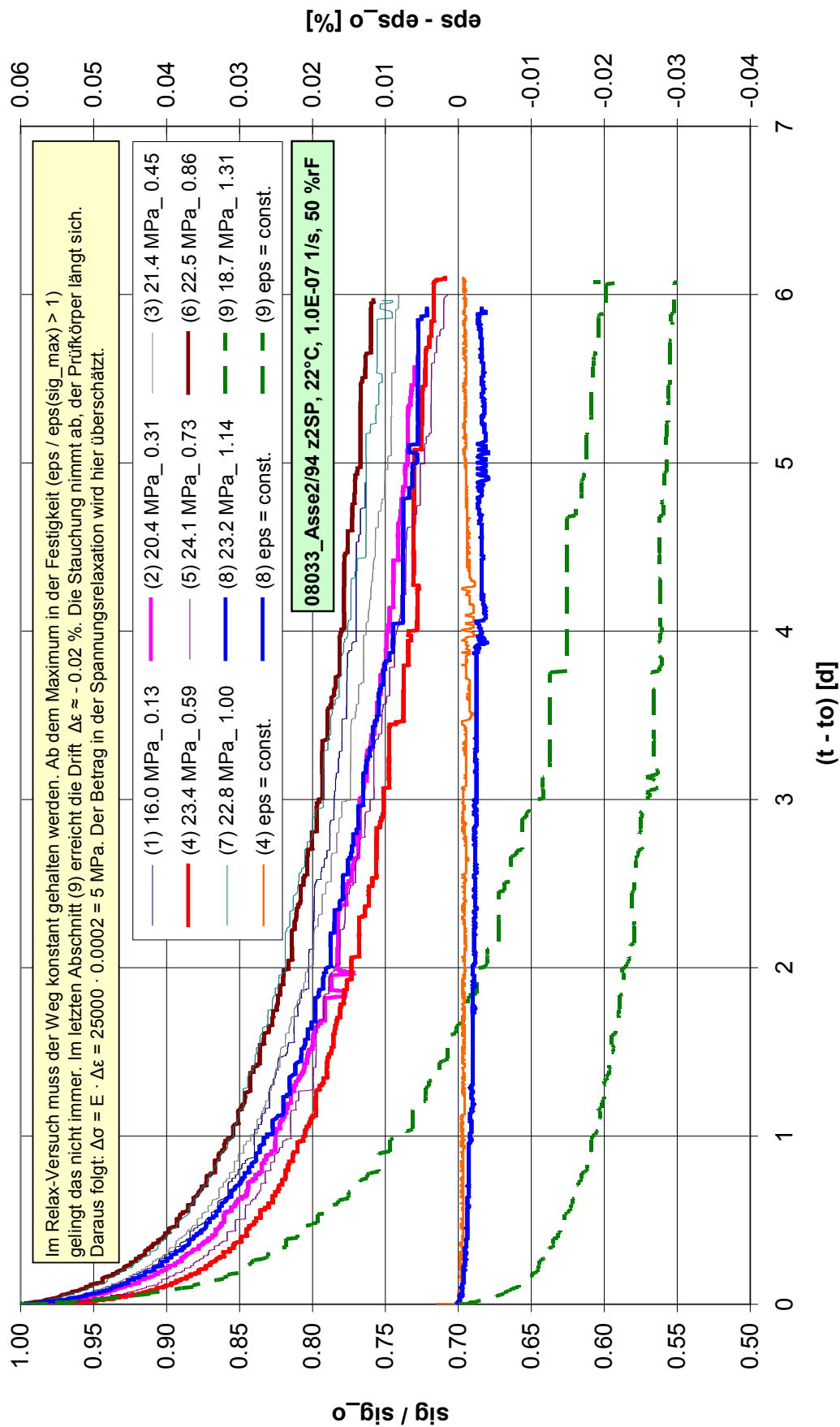


Abb. 18: Uniaxial-Festigkeits-Versuch mit Relaxationsphasen. Die Ziffern in der Legende verweisen auf die Spannung und die Verformung bei Start einer Relaxationsphase. Exemplarisch ist für Relaxationsphasen (4), (8) und (9) anhand „ $\epsilon - \epsilon_{0}$ “ ablesbar, wo die Bedingung  $\epsilon = const$  eingehalten wurde.

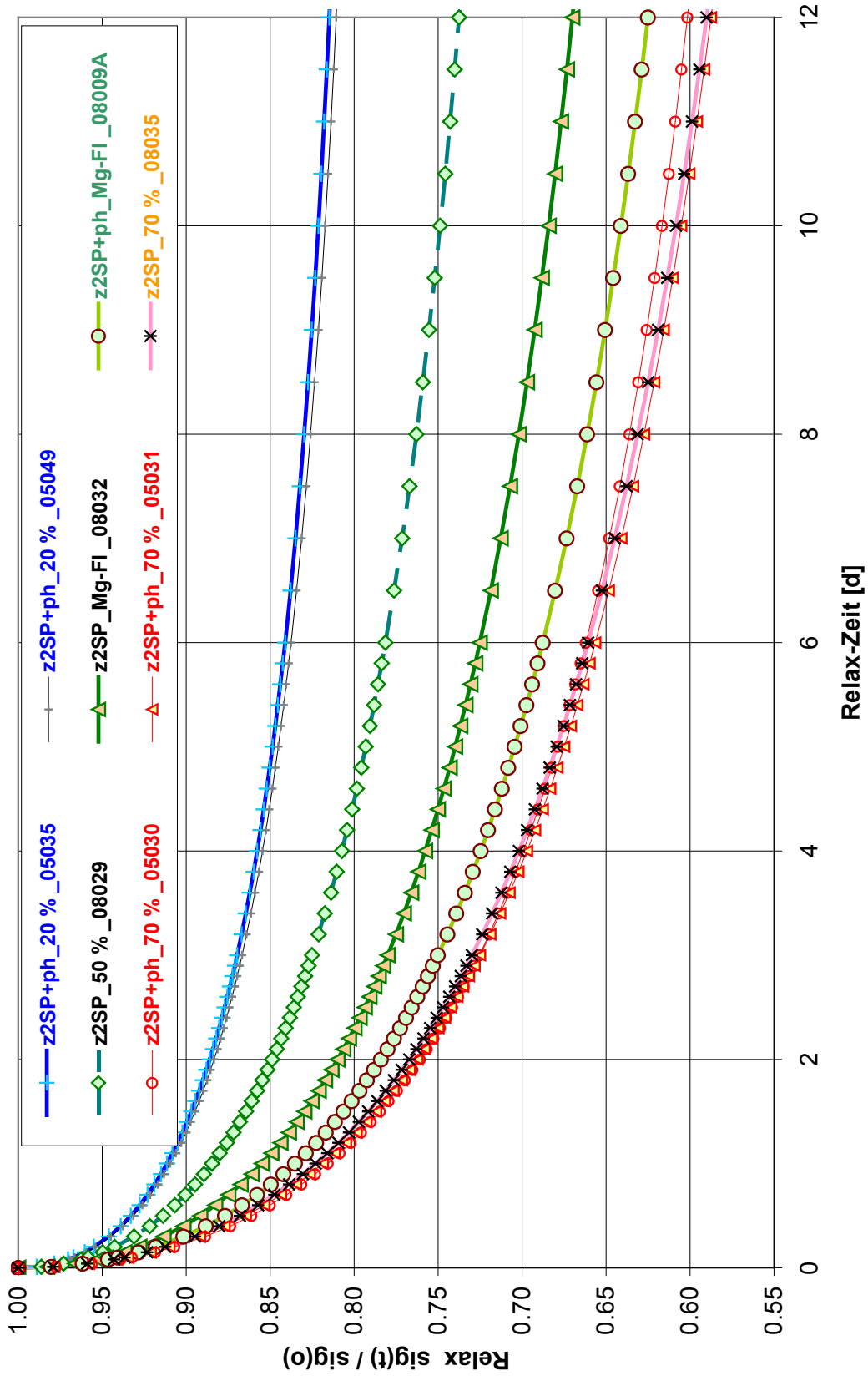


Abb. 19: Spannungsrelaxation in Abhängigkeit vom Feuchteangebot. Vergleich der repräsentativen Modellkurven zu deckungsgleichen Einzelergebnissen für Steinsalz (z2SP gegenüber z2SP+ph).

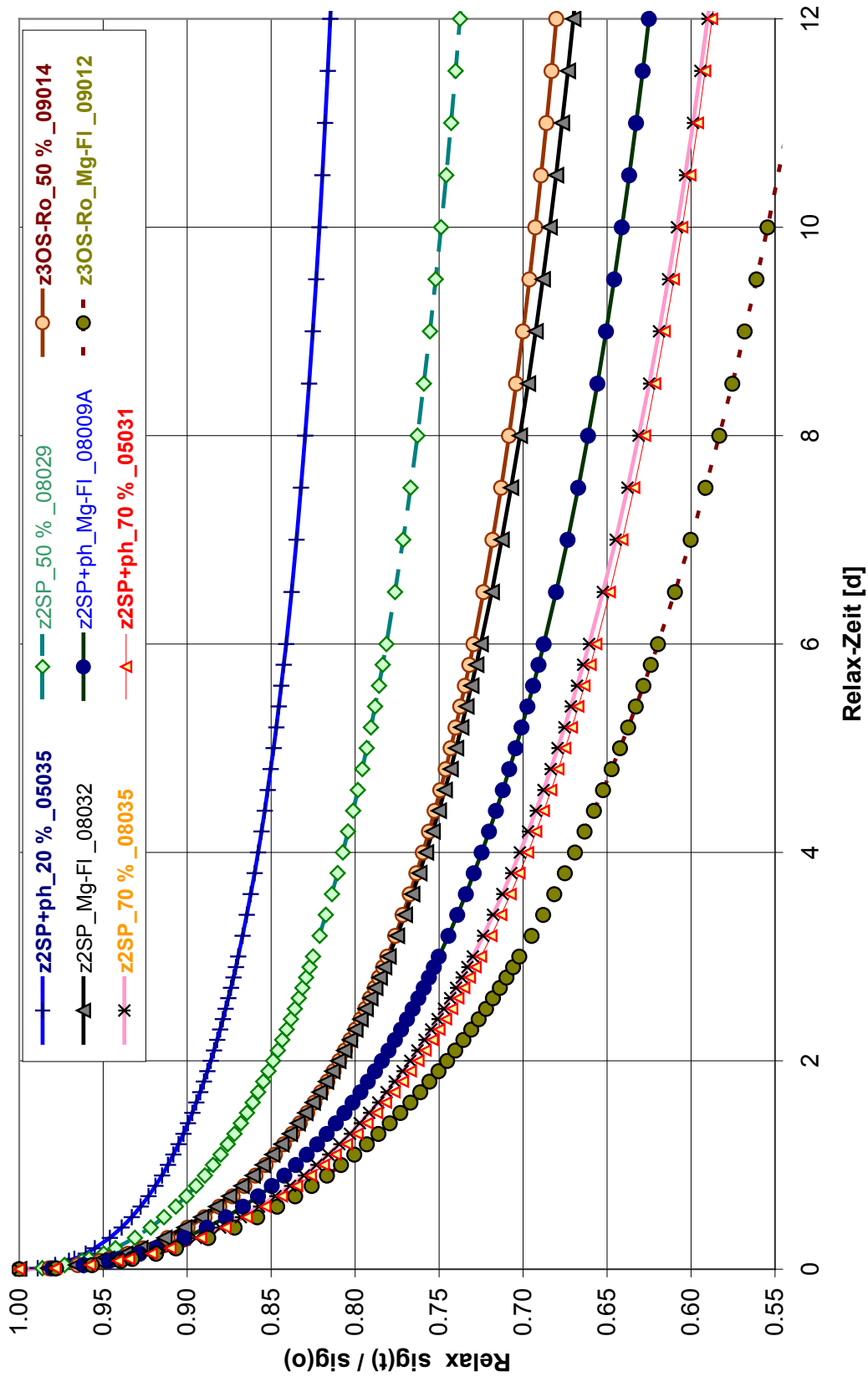


Abb. 20: Spannungsrelaxation in Abhängigkeit vom Feuchteangebot. Vergleich der repräsentativen Modellkurven zu deckungsgleichen Einzelergebnissen für Steinsalz (z2SP und z2SP+ph) gegenüber dem z3OS-Ro mit carnallitischen Beimengungen.

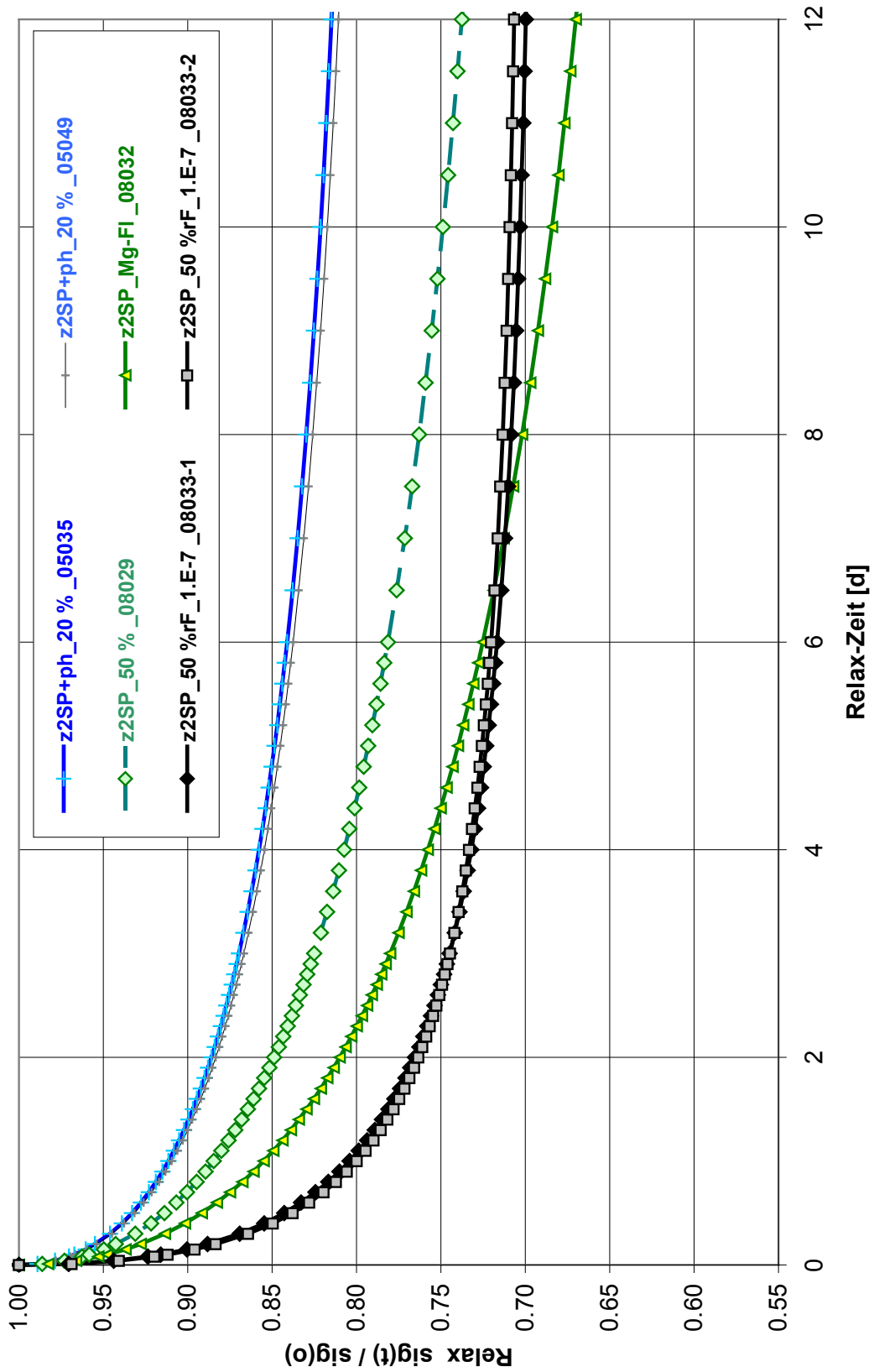


Abb. 21: Spannungsrelaxation. Vergleich der repräsentativen Modellkurven zu deckungsgleichen Einzelergebnissen für Steinsalz (z2SP und z2SP+ph) in Abhängigkeit vom Feuchteangebot und der Verformungsrate im Uniaxial-Festigkeitsversuch.

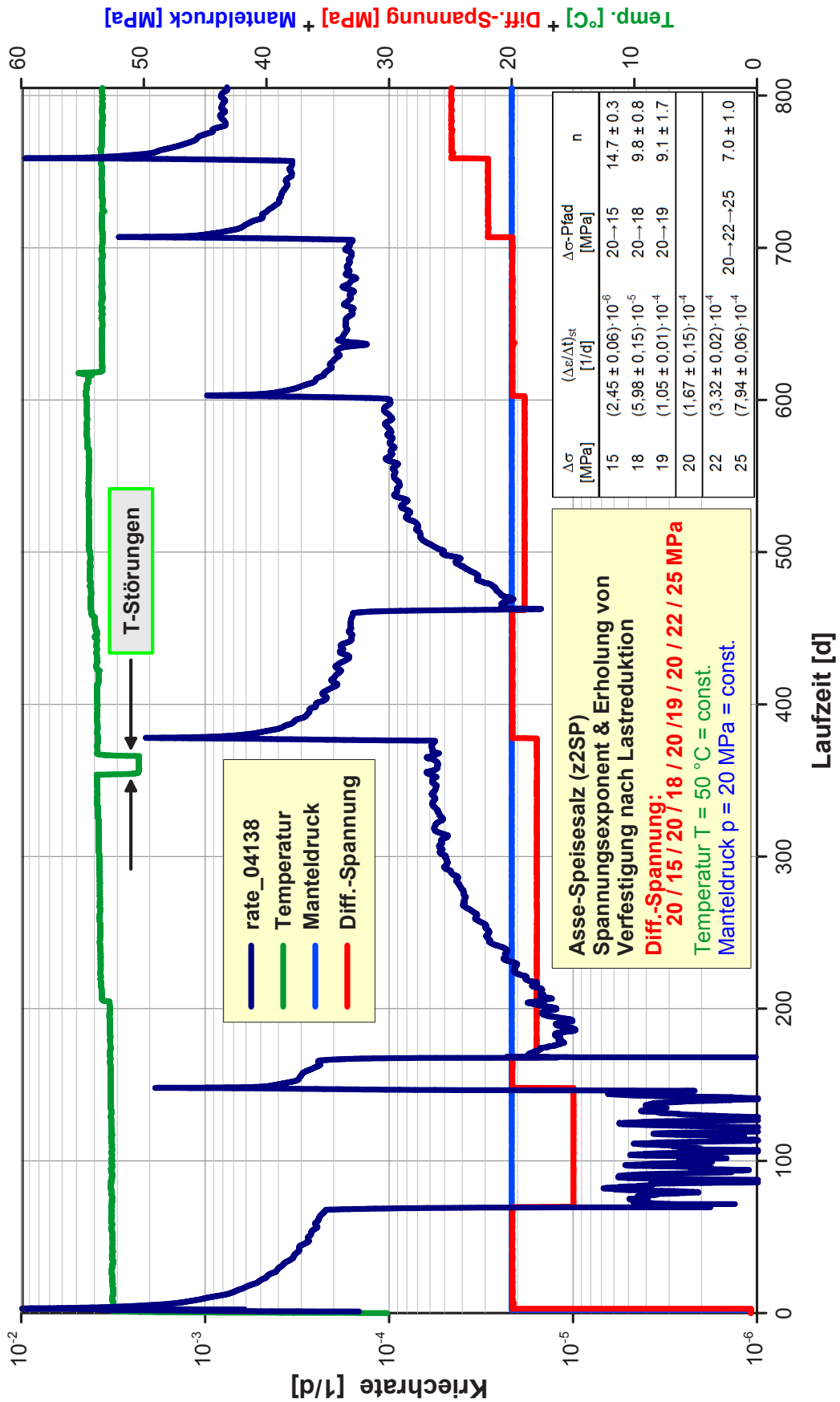


Abb. 22: Triaxial-Kriechversuch Asse2/94/04138 (z2SP). Beispiel zum Bedarf für Zeit bzw. Verformung zum Wiedererlangen stationären Kriechens.

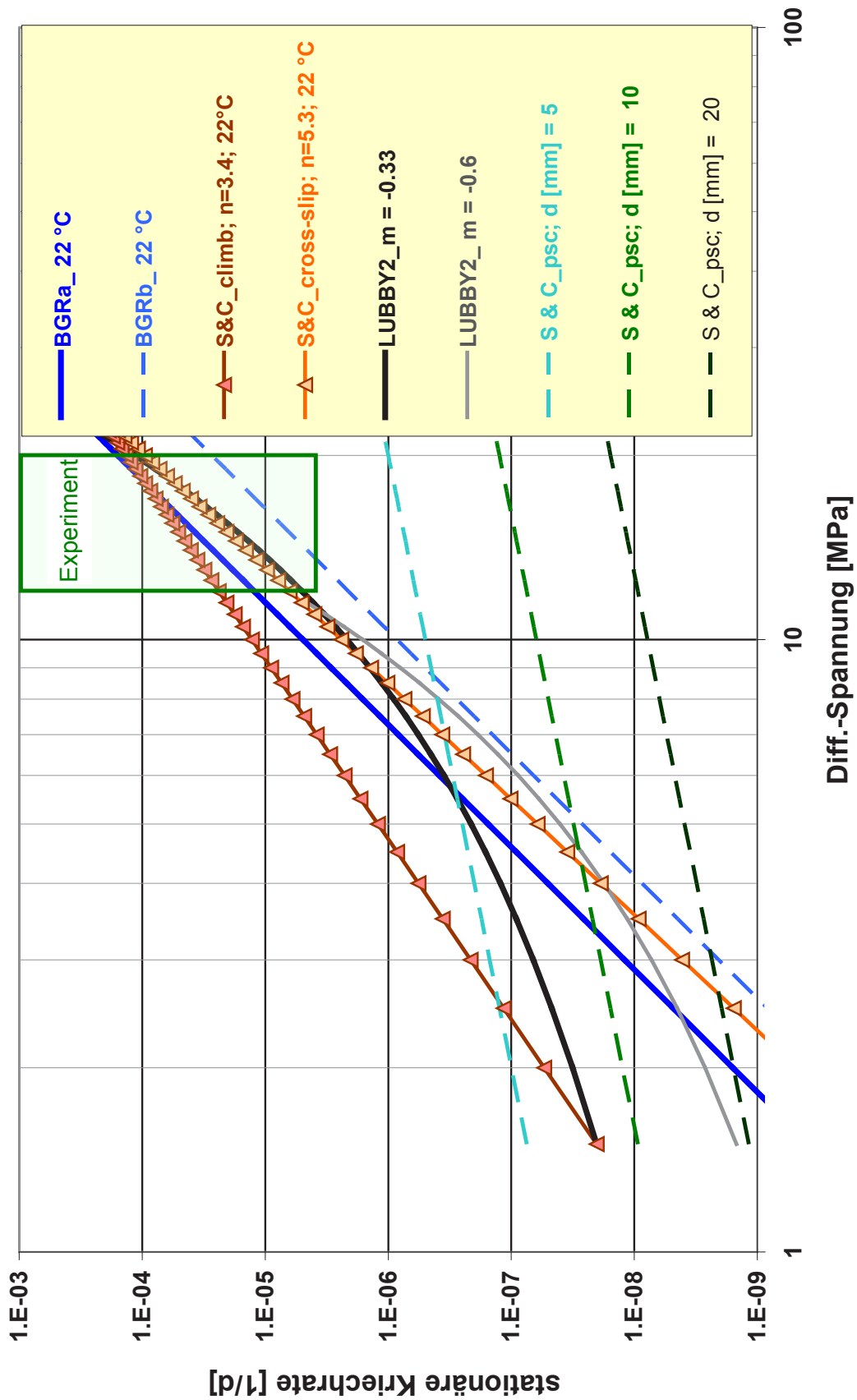


Abb. 23: Extrapolation von Stoffgesetzen zum stationären Kriechen aus dem experimentell zugänglichen Nachweisbereich zu geringen Spannungen für  $T = 22\text{ °C}$  (295 K). Das S&C\_psc-Gesetz (vgl. Tab. 3) wurde aus Befunden bei Korngrößen ( $d < 5\text{ mm}$ ) abgeleitet.

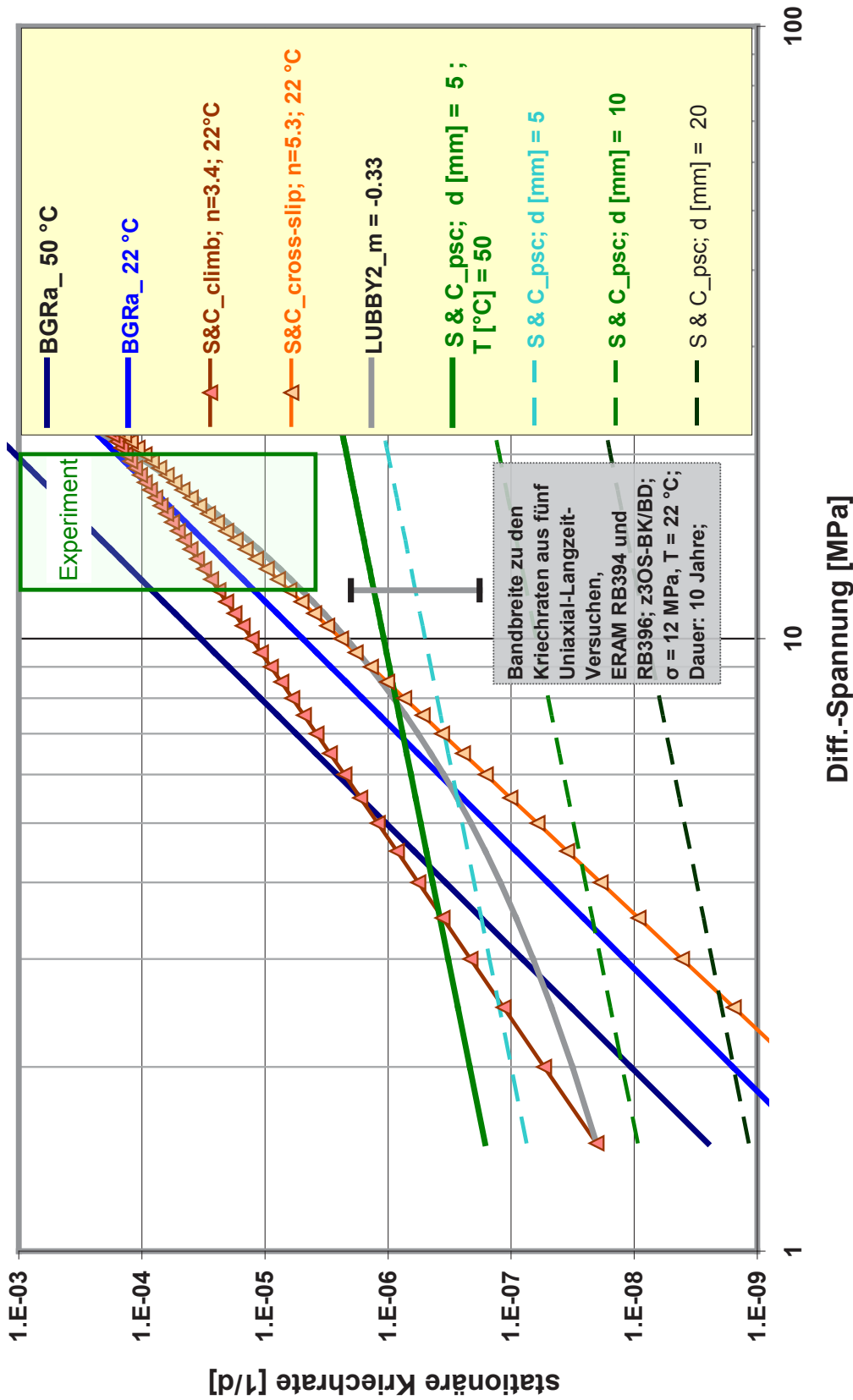


Abb. 24: Extrapolation von Stoffgesetzen zum stationären Kriechen aus dem experimentell zugänglichen Nachweisbereich für  $T = 22\text{ °C}$  (295 K). Zu BGRa und S&C\_psc ( $d = 5\text{ mm}$ ) wurden die Graphen für  $T = 50\text{ °C}$  hinzugefügt. Der Befund aus fünf Uniaxial-Langzeit-Kriechversuchen an Steinsalz (z3OS-BK/BD) dient als Beispiel für die Bandbreite im Kriechvermögen von natürlichem Steinsalz.



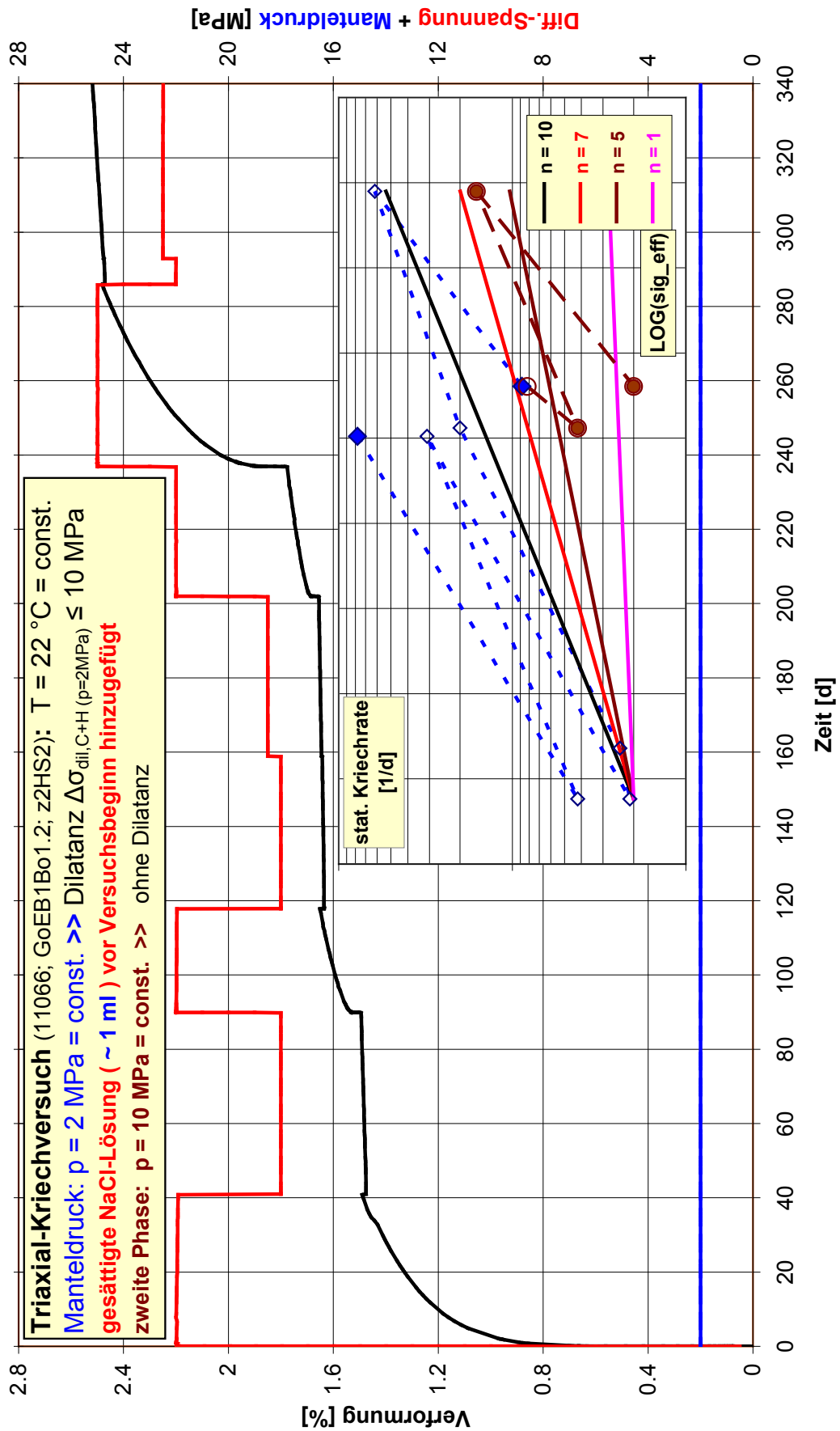


Abb. 25: Triaxial-Kriechversuch mit einem Spannungszustand im Dilatanz-Regime zum Nachweis der Spannungsempfindlichkeit unter Feuchtwirkung.

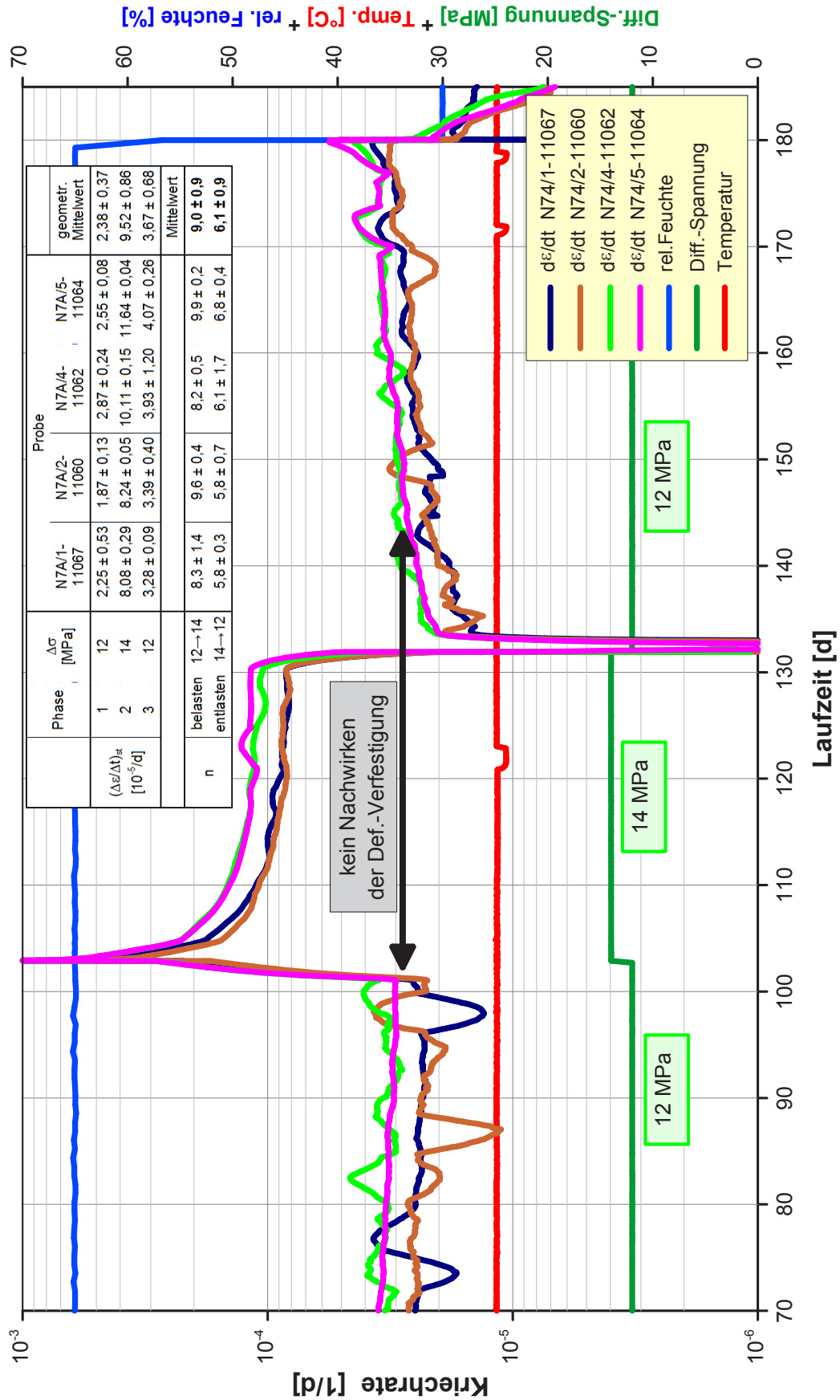


Abb. 26: Uniaxial-Kriechversuch an Steinsalz, GoEB1Bo1.2, z2HS2. Ausschnitt mit Lastwechsel bei hoher relativer Luftfeuchte (65 %rF).

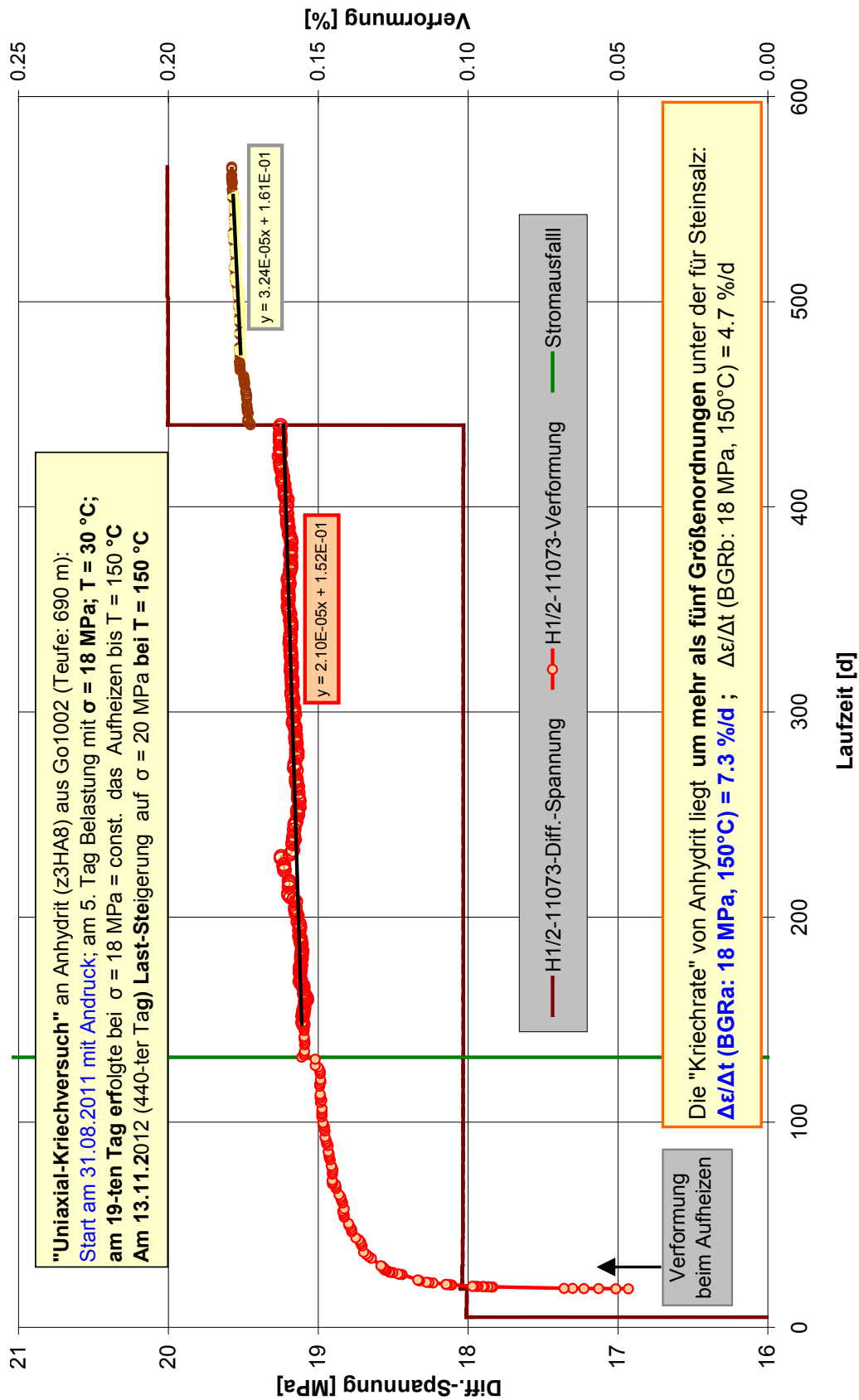


Abb. 27: Dauerstandversuch zum Deformationsverhalten von Anhydrit (Go1002; z3HA8; Teufe: 690 m) bei  $T = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ .

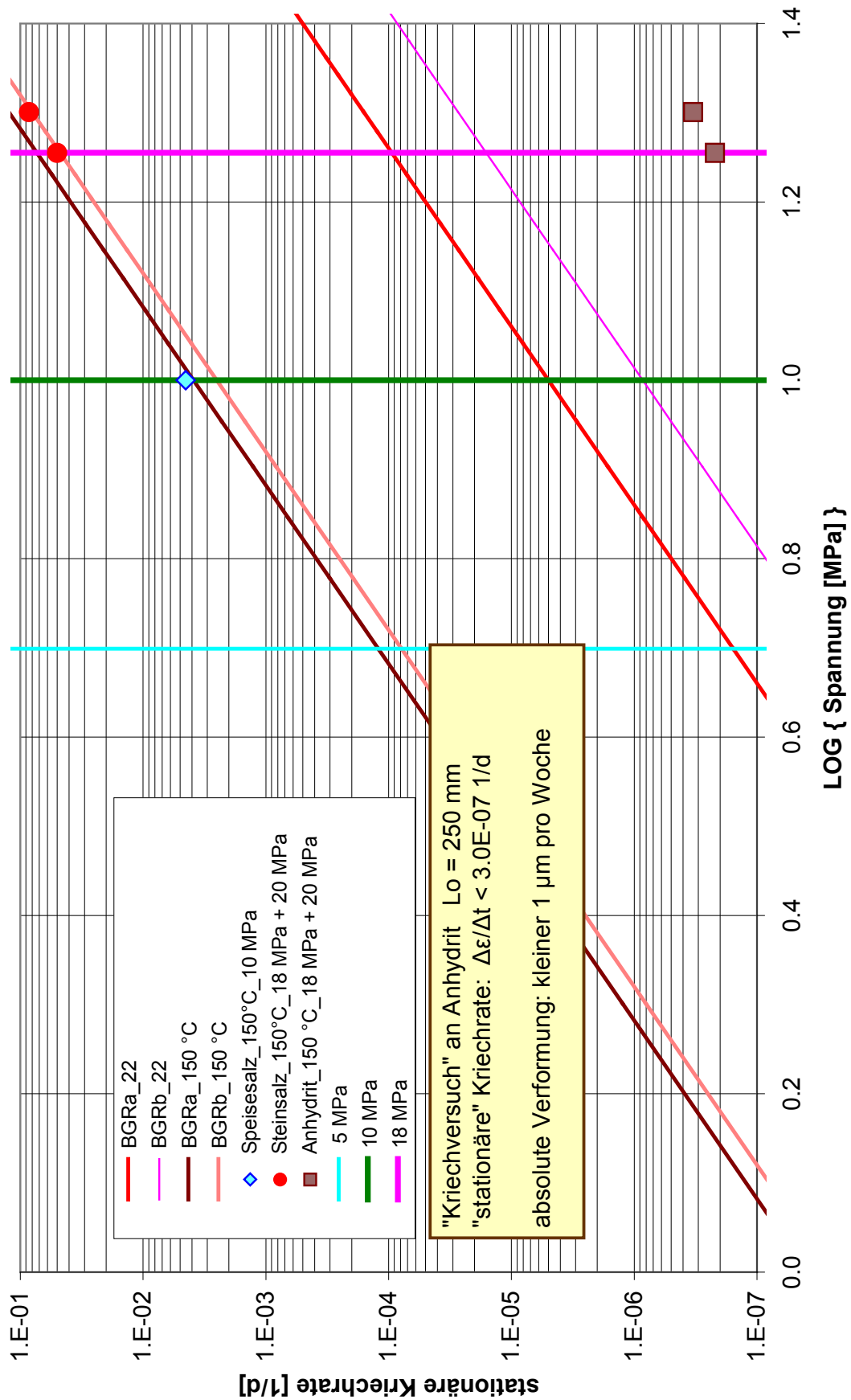


Abb. 28: Vergleich der stationären Kriechrate für Steinsalz (BGR-Modellkurven) mit den Daten für Anhydrit bei  $T = 150 \text{ °C}$ ; vergl. Abb. 27.

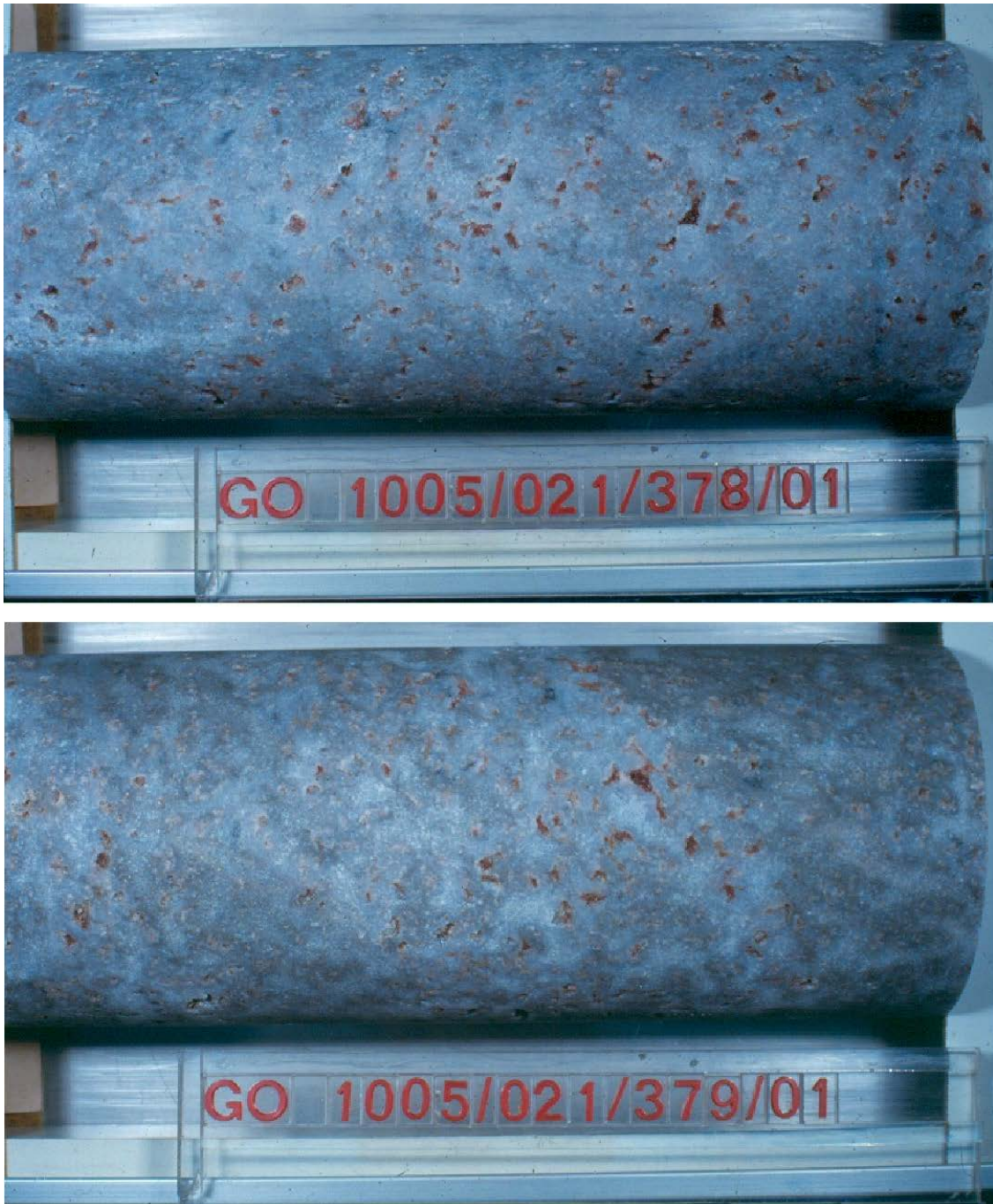


Abb. 29: Anhydrit-Prüfkörper ( $L_0 \approx 248$  mm ;  $D_0 \approx 99$  mm ) aus der Bohrung Go1005, Teufe: ~ 615 m. Die anhydritische Matrix ist feinkristallin, die kavernenösen Einschlüsse enthalten Carnallit. Deren Volumenanteil beträgt gemäß einfacher Schnittlängen-Analyse 5 % - 7%.

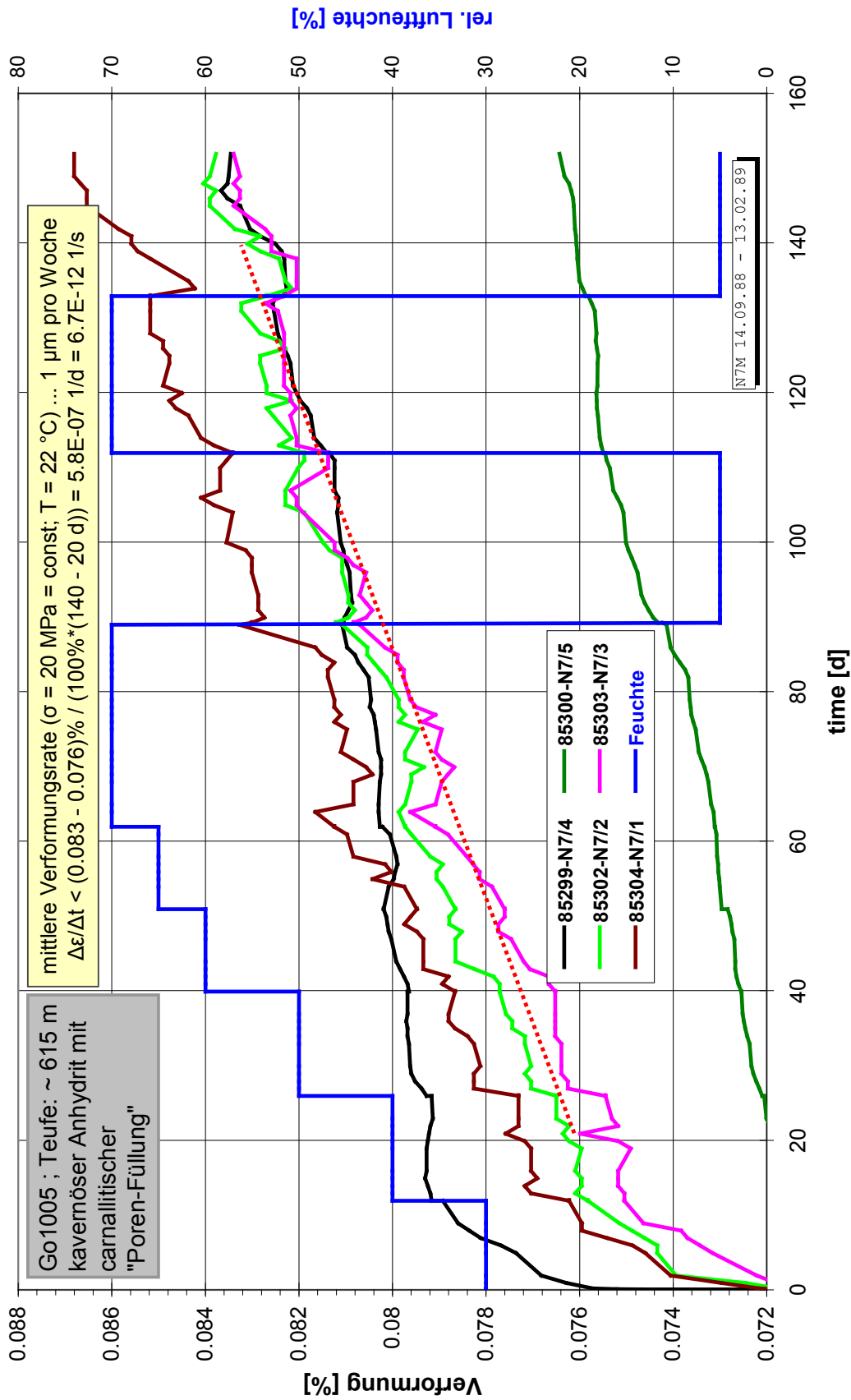


Abb. 30: Dauerstandverhalten von massivem Anhydrit (Go1005, z3HA8) bei wechselnder relativer Luftfeuchte. Unter konstant einwirkender Axialspannung von 20 MPa resultiert nach Abklingen einer Anpassphase eine mittlere Stauchrate von ca.  $1 \text{ } \mu\text{m}$  pro Woche.

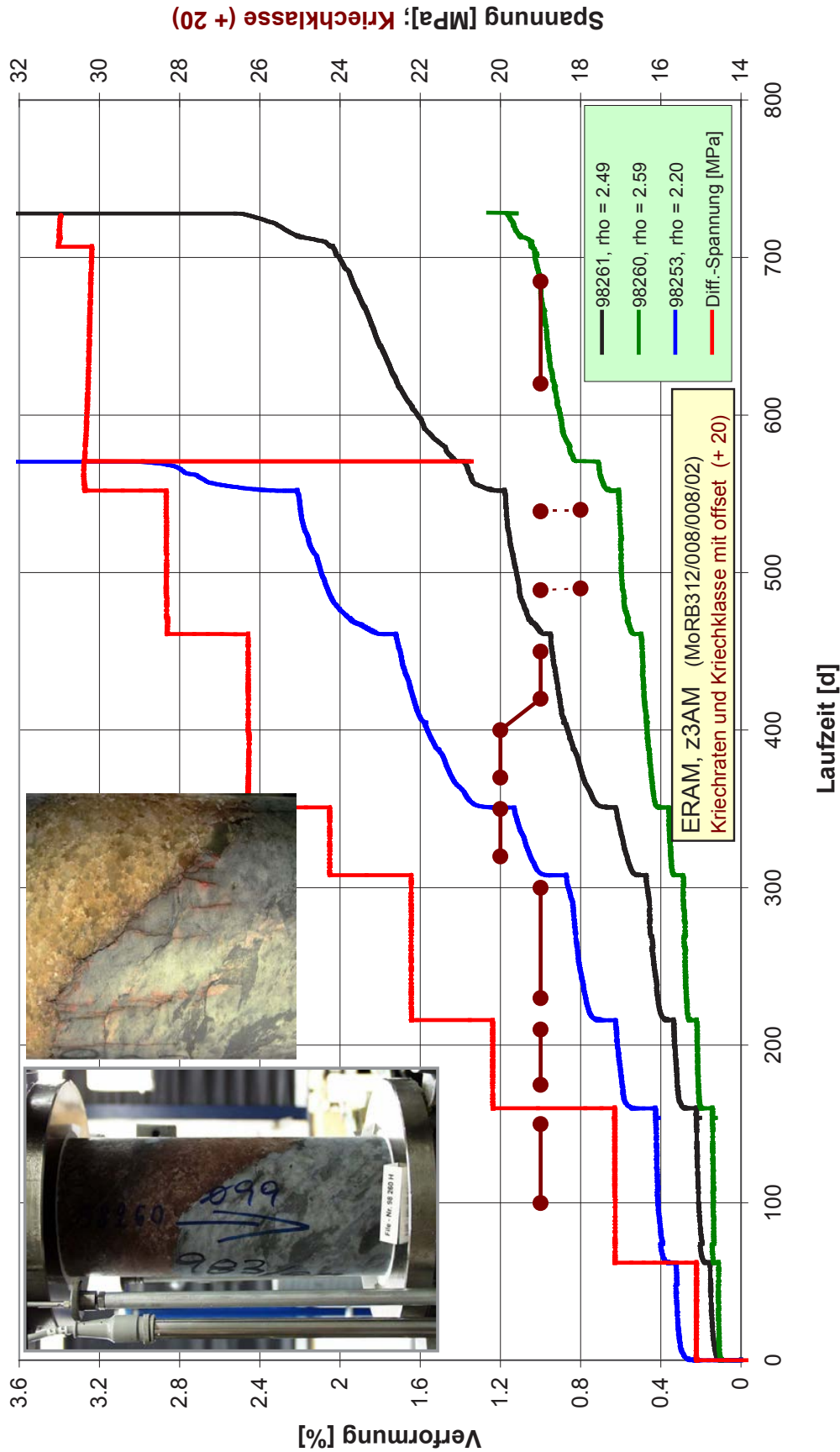


Abb. 31: Uniaxial-Kriechversuch an Anhydritmittelsalz ( $T = 22^\circ\text{C}$ ). Untersuchung zur Spannungskonzentration und Rissentwicklung in der Grenzschicht von Anhydrit zu Steinsalz. Entlastung im spröden Anhydrit durch lokalisierten Rissfortschritt führt zu Spannungskonzentrationen im Steinsalz. Die dort verursachte Auflockerung setzt sich im Gegensatz zur Bildung von Einzelrissen im Anhydrit in einem diffusen Auflockerungssaum fort (Details in: PLISCHKE & SCHULZE 2003).

Tab. 1: Prüfplan zur Untersuchung der Feuchtwirkung auf die Festigkeitseigenschaften von Steinsalz.

Rate	Feuchte: 20%rF	45 - 50 %rF	70 %rF	Mg-fluid + halit. Bodensatz	Mg-fluid + halit. Vollversatz
5.0·10 <sup>-6</sup>	01073_z2SP; ohne Teflon		01074_z2SP; ohne Teflon		
1.0·10 <sup>-6</sup>	99074_z2SP ohne Teflon	99072_z2SP ohne Teflon	99087_z2SP ohne Teflon	05043_z2SP+ph	05040_z2SP+ph 1 relax & Steifemodul
	08008_z2SP+ph	08030_z2SP	99075_z2SP ohne Teflon, 60 %rF	05057_z2SP+ph 01071_z2SP	08003_z2SP+ph 45 - 50 %, ohne Fluid
1.0·10 <sup>-7</sup>	01070_z2SP ohne Teflon	08004_z2SP+ph 1 Relax	01072_z2SP ohne Teflon	08014_z2SP+ph	08013_z2SP+ph 45 - 50 %, ohne Fluid
	01076_z2SP	08016_z2SP+ph	01075_z2SP	08015_z2SP+ph	08012_z2SP+ph
	08010_z2SP+ph	08033_z2SP 9 Relax & Steifemodul	08017_z2SP+ph	08028_z2SP	08031_z2SP
1.0·10 <sup>-8</sup>	05034_z2SP+ph	08029_z2SP 6 Relax	05030_z2SP+ph 1 Relax	08032_z2SP 3 Relax ... auch im Peak	08036_z2SP triaxialer Kriechversuch
	05035_z2SP+ph 12 Relax & Steifemodul		05031_z2SP+ph 1 Relax	08009A_z2SP+ph 2 Relax ... auch im Peak	
	05049_z2SP+ph 1 relax	09014_z3OS-Ro_490 m 6 Relax & Steifemodul	08035_z2SP 2 Relax	09012_z3OS-Ro_490m 2 Relax	
	08034_z2SP	11029_z3LS_574 m Asse 574/11029		11028_z3LS_574 m Asse 574/11028	



Tab. 2: Zusammensetzung der Mg<sup>2+</sup>-reichen Salzlösung (Schutzfluid) zur Simulation der Feuchte-Wirkung nach Flutung (Quelle: persönliche Mitteilungen von DEUSA, Bleicherode, und. IfG, Leipzig.).

MgCl <sub>2</sub>	371,9 g/l
KCl	18,4 g/l
NaCl	16,6 g/l
MgSO <sub>4</sub>	31,4 g/l
CaSO <sub>4</sub>	0,4 g/l
Dichte	1,309 g/cm <sup>3</sup>

Tab. 3: Stoffgesetze zum stationären Kriechen von Steinsalz als Funktion der Differenzspannung.

<b>BGRa</b>	$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = A \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp\left( \frac{-Q}{R \cdot T} \right)$	HUNSCHE ET AL. (2003)
mit:	$A = 0,18 \text{ d}^{-1}; \quad Q = 54 \text{ kJ/mol}; \quad n = 5$	
<b>BGRb</b>	$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \cdot \left\{ A_1 \cdot \exp\left( \frac{-Q_1}{R \cdot T} \right) + A_2 \cdot \exp\left( \frac{-Q_2}{R \cdot T} \right) \right\}$	HUNSCHE ET AL. (2003)
mit:	$A_1 = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ d}^{-1}; \quad A_2 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ d}^{-1};$ $Q_1 = 42 \text{ kJ/mol}; \quad Q_2 = 113 \text{ kJ/mol}; \quad n = 5$	
<b>LUBBY2</b>	$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\sigma}{\eta_0 \cdot \exp(m \cdot \sigma)}$	LUX ET AL. (1984)
mit:	$\eta_0 = 1,21 \cdot 10^8 \text{ MPa} \cdot \text{d}; \quad m = -0,327 \text{ MPa}^{-1}$ $\eta_0 = 2,34 \cdot 10^8 \text{ MPa} \cdot \text{d}; \quad m = -0,44 \text{ MPa}^{-1}$ $\eta_0 = 2,50 \cdot 10^9 \text{ MPa} \cdot \text{d}; \quad m = -0,6 \text{ MPa}^{-1}$	
<b>S&amp;C_cross slip</b>	$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1} \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp\left( \frac{-Q_{cs}}{R \cdot T} \right)$	SPIERS & CARTER (1998)
mit:	$Q_{cs} = 68,1 \text{ kJ/mol}; \quad n = 5,3$	
<b>S&amp;C_climb</b>	$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = 8,1 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \cdot \exp\left( \frac{-Q_{cl}}{R \cdot T} \right)$	SPIERS & CARTER (1998)
mit:	$Q_{cl} = 51,6 \text{ kJ/mol}; \quad n = 3,4$	
<b>S&amp;C_psc</b>	$\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = 4,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{K mm}^3}{\text{MPa s}} \cdot \frac{\sigma}{T \cdot d^3} \cdot \exp\left( \frac{-Q_{psc}}{R \cdot T} \right)$	SPIERS & CARTER (1998)
mit:	$Q_{psc} = 24,53 \text{ kJ/mol}$	
$\Delta \varepsilon / \Delta t = \text{Kriechrate}; \quad \sigma = \text{Differenzspannung}; \quad T = \text{Temperatur}; \quad d = \text{Korngröße};$ $\sigma_0 = 1 \text{ MPa} = \text{Dimensionsfaktor}; \quad R = 8,31446 \text{ kJ/mol} = \text{Gaskonstante}$		

Tab. 4: Eigenschaften von Prüfkörpern aus dem Anhydrit (z3HA) und dem Anhydritmittelsalz (z3AM).

Kernbezeichnung	File Nr.	Stratigraphie	Kristallinität	Nebengemenge	Teufe [m]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	D <sub>0</sub> [mm]	L <sub>0</sub> [mm]	V <sub>p</sub> [m/s]	Stand	Versuchsart	Kenntnisprüfauftrag
Go1002/024/0434/03	11071	z3HA	f	C7	652.77	2.926	99.98	249.97	6020	H1	TKriech1	20110823_H1_OS_01_Anhydrit
Go1002/026/0474/03	11073	z3HA	f	C7	689.20	2.870	99.98	250.00	5912	H1	TKriech1	20110823_H1_OS_01_Anhydrit
Go1002/026/0477/01	11074	z3HA	f	C7	691.50	2.873	99.97	249.97	5957	H1	TKriech1	20110823_H1_OS_01_Anhydrit
Go1005/021/0376/01	85299	z3HA8	f	H4	611.93	2.880	99.15	247.60	5818	N7	FTKriech1	19880909_N_OS_1_N7-Anhydrit
Go1005/021/0376/02	85300	z3HA8	f	H4	612.21	2.860	99.20	247.50	5818	N7	FTKriech1	19880909_N_OS_1_N7-Anhydrit
Go1005/021/0378/01	85302	z3HA8	f	H4	613.85	2.830	99.10	247.60	5758	N7	FTKriech1	19880909_N_OS_1_N7-Anhydrit
Go1005/021/0379/01	85303	z3HA8	f	H4	614.75	2.820	99.10	247.65	5758	N7	FTKriech1	19880909_N_OS_1_N7-Anhydrit
Go1005/022/0383/01	85304	z3HA8	f	H4	616.28	2.850	98.10	246.05	5772	N7	FTKriech1	19880909_N_OS_1_N7-Anhydrit
MoRB303/012/012/04	98253	z3AM	m, f, 2g	A4/5	506.00	2.196	98.98	247.48	4572	N4	Kriech1	19990305_N_IP_1_Mo-Anhydritübergänge
MoRB312/008/008/02	98260	z3AM	f	A5	506.00	2.586	98.91	247.47	5189	N4	Kriech1	19990305_N_IP_1_Mo-Anhydritübergänge
MoRB322/010/010/01	98261	z3AM	f	A4	506.00	2.489	97.95	244.93	5083	N4	Kriech1	19990305_N_IP_1_Mo-Anhydritübergänge

Kristallinität: f = fein  
 m = mittel  
 2g = gelegentlich grob

Nebengemenge: A = Anhydrit  
 C = Carnallit  
 H = Halit

4 = kompakte Knauern und Brocken  
 5 = Flocken, unregelmäßig verteilt  
 7 = Spots, "Staub" dispers verteilt

Kernbezeichnung	File Nr.	Probenbeschreibung
Go1002/024/0434/03	11071	Anhydrit, blau-blaugrau, feinkristallin, über den Kern verteilt mm-große Löcher mit Carnallit und Steinsalz verteilt, Einfallen 35° Geochemie: Anhydrit mit Spuren von Carnallit, Halit
Go1002/026/0474/03	11073	Anhydrit, blau - grau laminiert, über den Kern unregelmäßig verteilt sehr viele mm - 0,5 cm große Löcher, die überwiegend mit Carnallit gefüllt sind, Einfallen 35° Geochemie: Anhydrit mit Spuren von Carnallit, Halit
Go1002/026/0477/01	11074	Anhydrit, blau - grau laminiert, über den Kern unregelmäßig verteilt sehr viele mm - 0,5 cm große Löcher, die überwiegend mit Carnallit gefüllt sind, Einfallen 45° Geochemie: Anhydrit mit Spuren von Carnallit, Halit
Go1005/021/0376/01	85299	Anhydrit, kompakt, hellgrau, leicht kavermös, mit bis zu 5 mm großen Löchern, z.T mit Steinsalz gefüllt
Go1005/021/0376/02	85300	Anhydrit, kompakt, hellgrau, leicht kavermös, mit bis zu 5 mm großen Löchern, z.T mit Steinsalz gefüllt
Go1005/021/0378/01	85302	Anhydrit, kompakt, hellgrau, leicht kavermös, mit bis zu 5 mm großen Löchern, z.T mit Steinsalz gefüllt
Go1005/021/0379/01	85303	Anhydrit, kompakt, hellgrau, leicht kavermös, mit bis zu 5 mm großen Löchern, z.T mit Steinsalz gefüllt
Go1005/022/0383/01	85304	Anhydrit, kompakt, hellgrau, leicht kavermös, mit bis zu 5 mm großen Löchern, z.T mit Steinsalz gefüllt
MoRB303/012/012/04	98253	Steinsalz, hellorange, mittel-fein- gelegentlich grobkristallin, untere Probenhälfte durch Anhydrit stark verunreinigt, z.T. fein laminiert, im Übergangsbereich (ca. 2 cm stark) flockig ausgebildet, Einfallen 35°
MoRB312/008/008/02	98260	Anhydrit, hellgrau, feinkristallin, in oberer Probenhälfte scharf abgegrenzt von dunkelorange-farbenem Halit, fein- gelegentlich mittelkristallin, durchsetzt von Anhydritflocken, Einfallen 50°
MoRB322/010/010/01	98261	Steinsalz, orange, feinkristallin, nach unten begrenzt von am Übergang angelöstem massiven Anhydrit mit einer feingeschichteten Zone, Einfallen 25°