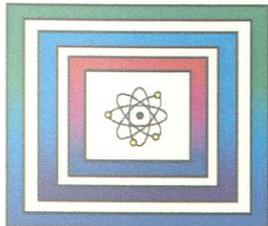


# Projekt Gorleben

9GE331400000

Laboruntersuchungen zu  
den thermo-mechanischen  
Eigenschaften von Steinsalz  
mit KW-Imprägnationen



Ergebnisbericht

Hannover, Oktober 2013

Geozentrum Hannover Hv112

10 156 092



0132332

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE  
HANNOVER

Verkürzte Zusammenfassung

1 Vorgang

2 Einleitung

3 Wirkung von KW-Präzipitationen auf Spannungs- und Verformung

4 Untersuchungen zur Reaktion von Zement mit dem Feststoff (ZFS)

Die Dilatanzgrenze

Projekt Gorleben

Geotechnische Laborarbeiten im Rahmen der Erkundung Gorleben

Laboruntersuchungen zu den thermo-mechanischen Eigenschaften  
von Steinsalz mit KW-Imprägnationen

Ergebnisbericht

Bundesanstalt  
für Geowissenschaften und Rohstoffe

Archiv

0132332

Autor:

Schulze, Otto, Dr.

Auftraggeber:

BfS, Salzgitter

Auftragsnummer:

9GE331400000

Geschäftszeichen:

B3.4/B50123-15/2014-0006/001

Datum:

01.10.2013

Im Auftrag:

*I. V. Grosse*

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

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung .....	3
1 Vorgang .....	4
2 Einleitung .....	4
3 Wirkung von KW-Einschlüssen auf Spannung und Verformung .....	7
4 Untersuchungen zum Kriechen von Steinsalz aus dem Hauptsalz (z2HS) .....	8
5 Die Dilatanzgrenze .....	10
6 Zum Einfluss von KW-Einschlüssen auf den Spannungszustand .....	12
7 Triaxial-Kriechversuche zur Porendruck-Wirkung bei Dilatanz .....	13
8 Temperatur-Einwirkung .....	15
9 Transport-Eigenschaften .....	20
10 Wirkung ionisierender Strahlung .....	22
11 Zusammenfassung .....	23
Literaturverzeichnis .....	25
Tabellenverzeichnis .....	28
Abbildungsverzeichnis .....	29
Anhangverzeichnis .....	32

Gesamtblattzahl: 69

## 1 Vorgang Verkürzte Zusammenfassung

Autor: Schulze, Otto, Dr.

Titel: Laboruntersuchungen zu den thermo-  
mechanischen Eigenschaften von Steinsalz  
mit KW-Imprägnationen

Stichwörter: Dilatanz, KW-Einschlüsse, Porendruck,  
Salzlösung

Steinsalz wird als Wirtsgestein für ein Endlager mit radioaktiven Stoffen eine thermo-  
mechanische Belastung durch die thermisch induzierte Volumenänderung erfahren. Im Falle  
von Steinsalz, das Kohlenwasserstoff-Einschlüsse (KW) enthält, kann diese durch eine  
von den KW-Einschlüssen ausgehende Porendruck-Wirkung zusätzlich beeinflusst sein.  
Das Langzeit-Deformationsverhalten von Steinsalz (Kriechen), welches KW-Einschlüsse  
enthält, wird mit dem von Steinsalz verglichen, das derartige Einschlüsse nicht enthält. Die  
Ergebnisse werden im Hinblick auf die Beeinflussung von Dilatanz-Effekten durch eine  
mögliche Porendruckwirkung aus den KW-Einschlüssen diskutiert. Die thermisch induzierte  
Längenänderung von Steinsalz aus einer Bohrung, die KW-Einschlüsse enthält, ist mit  
der von Steinsalz ohne KW-Einschlüsse verglichen worden. Die Transporteigenschaften  
(Porosität und Permeabilität) von Steinsalz-Prüfkörpern mit KW-Einschlüssen sind  
untersucht worden. Obwohl die zuletzt vorgenommene Probennahme in einem Bereich  
mit augenscheinlich besonders hohem KW-Gehalt erfolgte - nämlich Salzgestein aus der  
Bohrung GoEB1RB793 (02YEQ02/RB793; Querschlag 1 West, 840 m-Sohle, z2HS1),  
wird bezüglich der möglicherweise durch KW-Einschlüsse auslösbaren Prozesse kein  
signifikant abweichendes Materialverhalten gefunden.

## 1 Vorgang

Im Zuge der Weitererkundung des Salzstocks Gorleben hat das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Bearbeitung des Arbeitspaketes 9GE331400000 „Geotechnische Laborarbeiten im Rahmen der Erkundung Gorleben“ übertragen. Dieses Arbeitspaket endet zum 31.12.2013.

Nachfolgend werden die für den Zeitraum vom 01.11.2010 bis 31.12.2013 geplanten und durchgeführten geowissenschaftlichen Arbeiten sowie die erzielten Ergebnisse berichtet, soweit sie die Untersuchung der thermo-mechanischen Eigenschaften von Steinsalz mit KW-Imprägnationen betreffen.

Das für die diesbezüglichen Laboruntersuchungen zuletzt verfügbar gemachte Material stammt aus der Bohrung GoEB1RB793 (02YEQ02/RB793). Die Ergebnisse sind mit denen zu vergleichen, die bei früheren Untersuchungen erzielt wurden.

## 2 Einleitung

Im Salzstock Gorleben sind während der untertägigen Erkundungsarbeiten innerhalb des Hauptsattels der Staßfurtfolge Gesteinsbereiche mit KW-Einschlüssen angetroffen worden. Hier entstand die Frage, ob im vornehmlich betroffenen Knäuelsalz (z2HS1) dessen thermo-mechanische Eigenschaften durch die KW-Einschlüsse signifikant beeinflusst sind und ob dies dann auch bezüglich der Barriere-Eigenschaften des Salzgesteins der Fall sein kann. Bei den hier berichteten Laboruntersuchungen soll es konkret um die in-situ relevante Stimulation einer Porendruckwirkung auf den Spannungszustand in einem betroffenen Gesteinsbereich gehen und um die Entwicklung der Gesteinseigenschaften bei einem durch KW-Einschlüsse gegebenenfalls beeinflussten Dilatanz-Verhalten.

Zur Beschreibung des thermo-mechanischen und hydraulischen Verhaltens von Steinsalz liegen fundierte Stoffgesetzformulierungen vor, welche die das Gesteinsverhalten determinierenden Material-Eigenschaften und Deformationsprozesse miteinander verbinden. Eine allgemeine Übersicht vermittelt der Tagungsband zur sechsten Salzkonferenz (WALLNER et al. 2007).

Die bei der BGR zur Standorterkundung genutzten THM-Stoffgesetze, wie sie insbesondere zum Ausweisen von Homogenbereichen erforderlich sind, dokumentieren u.a. die BGR-Berichte von HUNSCHE et al. (2003) sowie von SCHULZE & PLISCHKE (2010).

Für Gesteinsbereiche mit fein-dispers verteilten KW-Vorkommen (das heißt hier mit KW-Einschlüssen, die in der Gesteinsmatrix fein-dispers verteilt sind) muss ein Stoffgesetz bei

Daneben werden intrakristalline Einschlüsse gefunden - allerdings mit erheblich geringerem Volumenanteil. Anders als bei den sogenannten Negativ-Kristallen mit rechteckiger Berandung (ROEDDER 1984), die dann Salzlösung enthalten - auch gemeinsam mit Gasblasen und KW-Fluiden -, haben die wasserfreien KW-Einschlüsse eine überwiegend abgerundete Oberfläche, teilweise sphärische Form (POPP et al. 2002; HERRMANN 1996). Die Form der Einschlüsse ist durch das jeweils geringst-mögliche Oberfläche-Volumen-Verhältnis bestimmt.

Bei den Gefügeuntersuchungen an Steinsalz aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben hat sich gezeigt, dass in den Gesteinsbereichen mit „vielen“ KW-Einschlüssen deren Anteil im Mittel nur bis zu 1 mg KW / 1 kg Salzgestein beträgt. In seltenen Fällen treten Anreicherungen auf, wo der Gehalt 500 mg KW / 1 kg Salzgestein erreicht. Das für die neueren Laboruntersuchungen zuletzt verfügbar gemachte Material stammt aus der Bohrung GoEB1RB793 (vgl. Tab. 3). Sie steht im Knäuelsalz (z2HS1).

Zum Vergleich der nachfolgend berichteten neuen Ergebnissen mit denen aus Untersuchungen an Steinsalz aus anderen Gesteinsbereichen wurden Material und Befunde genutzt, die in Tab. 1 und Tab. 2 nachgewiesen sind. Das Material stammt sowohl aus dem z2HS1 als auch aus dem z2HS2 und z2HS3. Die Auswahl ist nach Ausweis der geologischen Beschreibung erfolgt, wonach im Kernmaterial KW-Einschlüsse enthalten sein können. Eine über Augenschein und Geruch hinausgehende Analyse wurde nach dem Kerngewinn als Folge des Erkundungs-Moratoriums nicht mehr vorgenommen.

Selbst wenn die Einschlüsse neben KW-Material noch Salzlösung, Zweitphasen-Partikel und andere Gase enthalten, bleiben die inneren Oberflächen der Einschlüsse wegen der Entmischung der eingeschlossenen Phasen nur anteilig von Salzlösung benetzt (vgl. Abb. 2 und Abb. 3). Dieser Sachverhalt muss erinnert werden, wenn bei einer Belastung und Verformung mit Dilatanz das Verformungsverhalten mit bzw. ohne zusätzliche Feuchte-Einwirkung sowie mit bzw. ohne Porendruck-Wirkung aus KW-Einschlüsse zu analysieren ist.

Die KW-Einschlüsse im Salzstock Gorleben enthalten ein breites Spektrum von KW-Verbindungen (HAMMER et al. 2012), das sich im Einlagerungsbereich von HAW-Gebinden in seiner chemischen Zusammensetzung und seinen physikalischen Eigenschaften noch verändern kann (z. B.: Entgasung, Cracken, Radiolyse, ...). Allerdings wird auf der Grundlage von Untersuchungen zur Wirkung von verschiedenen Substanzen, sofern diese sich wie die KW-Einschlüsse gegenüber Steinsalz chemisch neutral verhalten, die chemisch induzierte Einwirkung auf die THM-Gesteinseigenschaften stets als vernachlässigbar ermittelt. Als zuverlässiger Beleg seien die Untersuchungen und Ergebnisse von PHARR & ASHBY (1983) sowie die von ZHANG et al. (2007) genannt.

Mit diesen Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass im Gegensatz zu wässrigen Lösungen, die beim natürlichen Steinsalz in Bereichen mit inhärenten Lösungseinschlüssen bei Dilatanz mobilisiert und wirksam werden können, entsprechend mobilisierbare KW-Einschlüsse wie auch andere gegenüber Steinsalz chemisch inerte Stoffe keine Wirkung auf die Duktilität haben. Eine Duktilitätssteigerung wie im Falle der Feuchte-Wirkung bei Dilatanz wird demnach weder erwartet noch beobachtet. Das Erfordernis, eine Wechselwirkung zwischen Salzgestein und KW-Einschlüssen aufgrund chemisch induzierter Prozesse einbeziehen zu müssen, wird nicht gesehen.

Die Laboruntersuchungen an Steinsalz mit KW-Einschlüssen sind daher schwerpunktmäßig auf die integrale Wirkung des Porendrucks ausgerichtet, die von fein-dispers verteilten KW-Einschlüssen auf den Spannungszustand ausgeht und die gegebenenfalls dann das Auslösen von Dilatanz-Effekten auf das Deformationsverhalten beeinflussen wird.

Die KW-Einschlüsse in den Gesteinsporen stehen unter lithostatischem Druck. Daher ist konkret der Frage nachgegangen worden, ob Dilatanz bei einer kontinuierlichen Erhöhung der Differenz-Spannung früher einsetzt als bei Steinsalz ohne derartige Einschlüsse, und in einer zweiten Versuchsserie, wie sich das Salzgestein mit KW-Einschlüssen bei einer thermischen Belastung unter in-situ relevanter isostatischer Einspannung verhält.

### 3 Wirkung von KW-Einschlüssen auf Spannung und Verformung

Bei einem Spannungszustand unterhalb der Dilatanzgrenze dominiert das von transkristalliner Versetzungsbewegung getragene Kriechen. Andere Deformationsprozesse, wie beispielsweise das Korngrenzengleiten oder das Diffusionskriechen, bleiben nach Ausweis der Untersuchungen bei BGR stets von nachrangiger Bedeutung. Stoffgesetze zum Langzeit-Kriechen beschreiben die nicht-lineare Abhängigkeit der Kriechrate von der Spannung, welche die Versetzungsbewegung treibt (HAMPEL & SCHULZE 2007; HAMPEL 2012a, b).

Im Falle eines im Salzgestein vorhandenen Porendrucks ( $p_{\text{pore}}$ ) gilt für die Deviator-Spannung (hier in der Oktaederebenen- bzw. Invarianten-Formulierung) Gleichung (1)

$$\tau_o = 1/3 \cdot [((\sigma_1 - p_{\text{pore}}) - (\sigma_2 - p_{\text{pore}}))^2 + ((\sigma_2 - p_{\text{pore}}) - (\sigma_3 - p_{\text{pore}}))^2 + ((\sigma_3 - p_{\text{pore}}) - (\sigma_1 - p_{\text{pore}}))^2]^{1/2}$$

$$\tau_o = 1/3 \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} = \tau_o(p_{\text{pore}}) \quad (1)$$

Mit  $\tau_o$ , Oktaeder-Schubspannung ;  $\sigma_o = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ , Oktaeder-Normal-Spannung.

Hierbei ist  $p_{\text{pore}} = \alpha \cdot p_{\text{fluid}}$

mit  $p_{\text{pore}}$  effektiv auf den Spannungszustand wirkender Porendruck,

$p_{\text{fluid}}$  Druck in Einschlüssen, der in der Regel gleichzusetzen ist mit dem in einem  
zuvor ungestörten Gesteinsbereich vorliegenden mittleren Gebirgsdruck,

$\alpha$  hydraulischer Wirkfaktor, Biot-Parameter ( $\alpha = [0; 1]$ , vgl. Kap. 4).

Das heißt: Der Porendruck  $p_{\text{pore}}$  bleibt ohne Wirkung auf den Deviator; Gas und Fluid können keine Scherkräfte übertragen.

Zu bedenken ist jedoch, dass jede Art von Einschluss eine Störung im Aufbau des Gefüges verursacht. Intrakristalline Einschlüsse, seien es Gas-Poren (auch solche ohne nennenswerten Innendruck) oder Teilchen einer zweiten Phase, bilden „Härtlinge“ für die transkristalline Versetzungsbewegung. Im Falle eines Gesteinsbereichs, in dem die Kriech-Duktilität durch KW-Einschlüsse allein schon in diesem Sinne wesentlich beeinflusst ist, muss dieser als eigener Homogenbereich ausgewiesen werden. Verfahrensbeschreibung und Ergebnisse dazu sind in mehreren BGR-Berichten dokumentiert (HUNSCHKE et al. 2003; SCHULZE & PLISCHKE 2010).

Wenn der Spannungszustand in einem Gebirgsbereich nach Auffahren eines Hohlraums unterhalb der Dilatanzgrenze bleibt, muss für das Kriechen eine über die Homogenbereichsanalyse hinausgehende Berücksichtigung der KW-Einschlüsse (als Gefügestörung im Sinne von „Härtlingen“) also nicht mehr erfolgen. Als Voraussetzung dafür muss die Porendruck-Wirkung auf den Spannungszustand vernachlässigbar bleiben (vgl. hierzu die Diskussion in Kap. 4 und Abb. 7). Nur wenn der Spannungszustand durch die Porendruck-Wirkung  $p_{\text{pore}}$  nicht in das Dilatanzregime verschoben wird, bleibt die Kriech-Verformung ohne Schädigung und Auflockerung. Beschleunigtes Kriechen und (Kriech-)Bruch treten als Prozesse neben dem stationären Kriechen nicht auf. Die Langzeit-Kriechverformung bleibt stationär, also im dynamischen Gleichgewicht zwischen Deformationsverfestigung und Erholung der Verfestigung.

#### 4 Untersuchungen zum Kriechen von Steinsalz aus dem Hauptsalz (z2HS)

Zum Kriechen von Steinsalz aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben, das nach Ausweis von Augenschein und Geruch KW-Einschlüsse enthält bzw. enthalten kann, wurden an Prüfkörpern, die vor dem Erkundungs-Moratorium gewonnen wurden, sowohl uniaxiale als auch triaxiale Kriech-Versuche durchgeführt. Das Material stammt sowohl aus dem

z2HS1 wie auch aus dem z2HS2 und z2HS3 - und noch nicht aus der zuletzt verfügbar gemachten Bohrung GoEB1RB793 (02YEQ02/RB793). Die Übersicht zur Herkunft der für frühere Untersuchungen ausgewählten Prüfkörper und zu den Ergebnissen aus den Uniaxial-Kriechversuchen liefert Tab. 1.

Hier geht es um die Frage, ob für das Hauptsalz Homogenbereiche zusätzlich auszuweisen sind, weil die gegebenenfalls vorhandenen KW-Einschlüsse ein signifikant abweichendes Kriechvermögen bewirken. Für die Bearbeitung dieser Frage wurde als ausreichend gefunden, die weniger aufwendigen Uniaxial-Kriechversuche zu nutzen. Zur Ergänzung des Standardprogramms für die Identifizierung von Homogenbereichen sind auch einige Triaxial-Kriechversuche durchgeführt worden. Das Verfahren ist im Bericht von SCHULZE & PLISCHKE (2010) ausführlich erläutert (vgl. dort Abb. 3.4). Die Angaben zur das Kriechvermögen kennzeichnenden „Kriechklasse“ folgen aus der in einem Prüfabschnitt ermittelten stationären Kriechrate oder aus der Kriechrate, die vor Wechsel in den nächsten Prüfabschnitt abgelesen wird.

Auch bei den Befunden, die in Tab. 1 zusammengestellt sind, bestätigt sich, dass das Kriechvermögen mit der stratigraphischen Stellung des Materials korreliert ist. Steinsalz aus dem liegenden Teil des Staßfurt-Hauptsalzes (z2HS1) ist generell duktiler als das stratigraphisch jüngere. Im Hauptsalz (z2HS) nimmt das Kriechvermögen bis zu den Hangendpartien im z2HS3 systematisch ab. Diese Zusammenhänge wurden im Abschlussbericht zum AP 9G213811 (HUNSCHKE et al. 2003) diskutiert (siehe dort Abb. 4.3.5) und unabhängig vom Standort Gorleben auch für Steinsalz aus dem ERAM mit gleicher Systematik bestätigt (SCHULZE & PLISCHKE 2010).

Nach Ausweis von Tab. 1 wird für das Knäuelsalz (z2HS1) im Mittel gefunden: BGRa\_Klasse: 6. Bis zum Kristallbrockensalz (z2HS3) folgt: BGRa\_Klasse: 3. Bezüglich des (stationären) Langzeitkriechens ist bei gleichen Belastungsbedingungen das Verhältnis der Kriechrate:  $2^6 : 2^3 = 8 : 1$  (BGRa). Gefügebereiche, die nach Ausweis der Standorterkundung KW-Einschlüsse enthalten, machen sich beim generellen Trend im von der stratigraphischen Stellung abhängigen Kriechvermögen nicht bemerkbar. Ein Einwirken von KW-Poren im Sinne von „Härtlingen“ (Störung des Kristall-Gitters durch Poren und Einschlüsse mit Fremdmineralen) auf das Kriechvermögen wird nicht gefunden.

In Tab. 1 werden nur die Kriechklassen gemäß BGRa nachgewiesen - also nur die, die aus den stationären Kriechraten der uniaxialen Versuche abgeleitet wurden. Die Ergebnisse aus den Triaxial-Versuchen werden im Kap. 5 eingehender betrachtet. Dort soll es um die Frage gehen, ob aus dem Kriechverhalten bei Wechsel der Belastung vom nicht-dilatanten Belastungszustand in das Dilatanzregime - und auch wieder zurück - eine signifikante Einwirkung von KW-Einschlüssen abgelesen werden kann.

## 5 Die Dilatanzgrenze

Da das Verformungsverhalten neben dem volumentreuen Kriechen Beiträge enthalten kann, die aus Dilatanz-Prozessen folgen, wird zunächst die Voraussetzung für das Einsetzen von Dilatanz diskutiert.

Ein Spannungszustand oberhalb der Dilatanzgrenze löst neben dem volumentreuen Kriechen durch die dominante transkristalline Versetzungsbewegung weitere Deformationsprozesse aus, die mit Auflockerung und Schädigung des Materialgefüges verbunden sind. Die aus der Literatur in Abb. 4 dargestellten Gleichungen zur Dilatanzgrenze sind allein in Abhängigkeit vom Spannungszustand formuliert und enthalten keine explizite Berücksichtigung von der Belastungsgeometrie (Lastpfad) - und auch keine anderen Variablen und Parameter (SCHULZE 2007).

Die bisher in BGR-Modellberechnungen in der Regel genutzten Formulierungen zur Dilatanzgrenze sind mit den daraus resultierenden Graphen in Abb. 5 sowie für die Oktaederebenen-Form in Abb. 7 dargestellt.

Bei der BGR wurden zwei verschiedene Formulierungen entwickelt (Oktaederebenen-Form):

HUNSCHÉ et al. (2003):

$$\tau_{\text{eff,Dil}(1)} = 2,61248 \cdot \sigma_o^{0,78093} \quad (2)$$

mit  $\tau_{\text{eff,Dil}(1)} = \tau_{o,\text{Dil}(1)} \cdot \sqrt{3}$

CRISTESCU & HUNSCHÉ (1998):

$$\tau_{o,\text{Dil}(2)} = -1,697\text{E} - 02 \cdot \sigma_o^2 + 0,8996 \cdot \sigma_o \quad (3)$$

Beide Formulierungen zur Dilatanzgrenze resultieren aus der empirischen Anpassung an experimentelle Daten und decken im Mittel die aus den experimentellen Befunden erhaltene Bandbreite ab, wobei Gleichung (3) die „untere Einhüllende“ repräsentiert (vgl. Abb. 5 und Abb. 7). In der Regel wird wie in Gleichung (2) und (3) die Schreibweise mit Invarianten verwendet (Oktaederebenen-Form), obwohl der Ermittlung der Dilatanzfestigkeit überwiegend Versuche im Lastpfad „Kompression“ zu Grunde liegen (Abb. 5). Streng genommen können diese empirisch ermittelten Dilatanzgrenzen daher nur in dem Spannungsbereich zuverlässig genutzt werden, aus dem die experimentellen Daten stammen. Dieser Vorbehalt wird bestätigt bei der Extrapolation der empirischen Formulierungen in extreme Spannungsbereiche, die zum Erhalt der Übersichtlichkeit in Abb. 5 nicht mehr dargestellt sind. Dann folgt, dass die Kennlinien für die Formulierung (2) und (3) divergieren. Um die beiden Formulierungen im Spannungsbereich, der für die Abb. 5 gewählt ist, gemeinsam darzustellen, wurde Gleichung (2) entsprechend umgestellt:  $\tau_{o,\text{Dil}(1)} = \tau_{\text{eff,Dil}(1)} / \sqrt{3}$

In der Regel kann für eine zu beurteilende Untertage-Situation der relevante Spannungsbereich durch Laborversuche gut abgedeckt werden. Zu überprüfen bleibt dennoch, ob die Übertragbarkeit der aus Kompressionsversuchen ermittelten Dilatanzgrenze ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ) auf andere Lastgeometrien (z.B. Extension:  $\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$ ) zutreffend bleibt (Abb. 6).

Dieser Hinweis soll nachstehend erläutert werden.

Der für die Dilatanzgrenze gemäß Gleichung (3) nach Transformation auf  $\Delta\sigma_{\text{Dil}} = f(\sigma_{\text{min}})$  resultierende Verlauf für die Lastpfade „Kompression“ und „Extension“ ist aus Abb. 6 abzulesen. Danach setzt im Falle von „Kompression“ ( $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{\text{min}}$ ) bei Absenkung der minimalen Hauptspannung gegen Null (bei Versuchen nach dem Kármán-Prinzip ist das der Manteldruck  $p = \sigma_2 = \sigma_3$ ) eine Dilatanz-Wirkung bereits ab einer von Null verschiedenen Differenz-Spannung ein.

Für die Formulierung gemäß Gleichung (2) folgt für den Lastpfad „Kompression“  $\Delta\sigma_{\text{Dil}(1)} = f(\sigma_{\text{min}}) \approx 4,1 \text{ MPa}$  (deren Kurvenverlauf ist zum Erhalt der Übersichtlichkeit hier nicht mehr dargestellt).

Dagegen folgt im Falle von „Extension“ ( $\sigma_{\text{min}} = \sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$ ) bei Absenkung der minimalen Hauptspannung gegen Null (bei Versuchen nach dem Kármán-Prinzip ist das die Axial-Spannung  $\sigma_1$ ), dass für Gleichung (3) eine Dilatanz-Wirkung erst ab einer Differenz-Spannung von  $\Delta\sigma_{\text{Dil}(2)} = (\sigma_{1,2} - \sigma_3)_{\text{Dil}(2)} \approx 17 \text{ MPa}$  einsetzt.

Bei der Dilatanzgrenze gemäß Gleichung (2) liefert die Transformation auf den Lastpfad „Extension“ eine so hohe Dilatanz-Festigkeit, dass diese unter realistischen In-situ-Bedingungen - also auch am Rand eines Hohlrums - nicht mehr erreicht oder gar übertroffen werden könnte. Die Formulierung für die Dilatanzgrenze nach Gleichung (2) ist für diesen Lastpfad also nicht mehr plausibel und muss anhand von Extensionsversuchen erneut überprüft werden.

Das gilt bei Gleichung (2) auch für den Lastpfad „Kompression“, wenn zu sehr hoher Minimalspannung extrapoliert wird. Die Dilatanz-Kurve erreicht die Festigkeitsgrenze - allerdings erst für einen Manteldruck von  $\sigma_{\text{min}} > 25 \text{ MPa}$ . Dieser Sachverhalt ist auch bei anderen in der Literatur berichteten Formulierungen zur Dilatanzgrenze zu finden. Dies dokumentiert Abb. 4 in der Darstellung der Differenz-Spannung über der kleinsten Hauptspannung (confining pressure), wenn die Dilatanzgrenze beispielsweise als lineare Funktion der kleinsten Hauptspannung (d.h. des Manteldrucks) formuliert wurde.

Bei der Formulierung nach Gleichung (3) bleibt die Dilatanzgrenze generell unterhalb der Grenze für die Bruch-Festigkeit. Doch führt die Extrapolation zu hoher Minimalspannung zu einer konstant bleibenden Dilatanzgrenze (in ersten Formulierungen sogar zu einer

abnehmenden Kurve für das Einsetzen von Dilatanz, CRISTESCU & HUNSCHKE 1998). Hier ist nicht plausibel, dass sich die Spanne zwischen Dilatanzgrenze und Bruch-Festigkeit aufweitet. Daher ist darauf hinzuweisen, dass die aus experimentellen Befunden lediglich empirisch abgeleiteten Dilatanzgrenzen nur in dem durch die Datenlage abgedeckten Spannungsbereich zutreffen können und entsprechend begrenzt anwendbar sind.

Wenn Bedarf entsteht, die in der Regel im Lastpfad „Kompression“ empirisch ermittelten Interpolationsgleichungen (2) und (3) über den experimentell gut belegten Datenbereich hinaus nutzen zu wollen, muss auf Plausibilität und Übertragbarkeit geprüft werden.

## 6 Zum Einfluss von KW-Einschlüssen auf den Spannungszustand

Bezüglich der Porendruckwirkung in Gesteinsbereichen mit KW-Imprägnationen war mit Gleichung (1) festgehalten worden, dass ein Porendruck ohne Wirkung auf den Deviator (die Differenz-Spannung) bleibt. Gas und Fluid können keine Scherkräfte übertragen.

Aus der Definition für die Oktaeder-Normal-Spannung (d.h. die mittlere Hauptspannung):

$\sigma_o = 1/3 \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$  folgt jedoch:

$$\sigma_o(p_{\text{pore}}) = 1/3 \cdot ((\sigma_1 - p_{\text{pore}}) + (\sigma_2 - p_{\text{pore}}) + (\sigma_3 - p_{\text{pore}})) = \sigma_o - p_{\text{pore}} = \sigma_o - \alpha \cdot p_{\text{fluid}} \quad (4)$$

In Abhängigkeit vom hydraulischen Wirkfaktor  $\alpha = [0 ; 1]$  verschiebt sich der Spannungszustand in den Dilatanzbereich. Dieser Zusammenhang wurde u.a. bei SCHULZE et al. (2001) eingehend erörtert. Die mögliche Porendruckwirkung wird mit Abb. 7 veranschaulicht. Zur Illustration wurde ein wirksamer Porendruck  $p_{\text{pore}} = 3 \text{ MPa}$  vorgegeben:

$$p_{\text{pore}} = \alpha \cdot p_{\text{fluid}}$$

Da davon ausgegangen wird, dass die KW-Einschlüsse gegenüber Steinsalz chemisch neutral bleiben, gelten für eine gegebenenfalls vorhandene Porendruck-Wirkung auf den Spannungszustand mit effektiver „Verschiebung“ der Dilatanzgrenze die Ausführungen zur Dilatanz-Wirkung auf die Entwicklung der Duktilität, Auflockerung und Schädigung (vgl. Kap. 1).

Die Bestimmung des hydraulischen Wirkfaktors ist durch Kriechversuche möglich, bei denen beispielsweise gemäß Abb. 7 im nicht-dilatanten Spannungsbereich beginnend die minimale Hauptspannung (beim Lastpfad „Kompression“ also der Manteldruck) unter Konstanthaltung der Differenz-Spannung abschnittsweise abgesenkt wird. Mit Einsetzen einer Duktilitätssteigerung im Kriechverhalten kann über Vergleich mit der Dilatanzgrenze

von Steinsalz ohne KW-Imprägnation der hydraulische Wirkfaktor aus einer Darstellung gemäß Abb. 7 abgelesen werden. Die Ergebnisse zu diesbezüglichen Untersuchungen werden bei HUNSCHKE et al. (2003) berichtet (vgl. dort Kap. 6.2, Seite 53, und die zugehörige Abb. 6.2.2 für trocken belassenes bzw. für zwischenzeitlich befeuchtetes Steinsalz im Kap 6.3, Seite 61, die zugehörige Abb. 6.3.3).

Angemerkt sei, dass der hydraulische Wirkfaktor als skalare Größe betrachtet wird. Für Steinsalz wird davon ausgegangen, dass eine richtungsabhängige Porendruckwirkung trotz einer Vorzugsregelung (Anisotropie) in der Porenstruktur nicht vorhanden ist. Im Falle von Dilatanz-Wirkung längen sich die Riss-Poren im Mittel immer in Richtung der größten Haupt-Spannung.

Außerdem ist zu berücksichtigen, dass in einem versetzten Grubengebäude in der dilatanten Auflockerungszone (ALZ bzw. EDZ) am zuvor freien Hohlraumrand mit Aufbau eines Versatzwiderstands und entsprechendem Anstieg der minimalen Hauptspannung der Spannungszustand wieder unter die Dilatanzgrenze wandern wird. Von Dilatanz getragene Verformbarkeit klingt entsprechend ab. Ein in der ALZ während der Betriebsphase gegebenenfalls verbliebener Porendruck verliert dann ebenso seine Wirkung auf das Verformungsverhalten - damit auch auf die daraus sich folgernde Spannungsumlagerung und Konvergenz.

## 7 Triaxial-Kriechversuche zur Porendruck-Wirkung bei Dilatanz

In Abb. 8 bis Abb. 15 sind die Kriechkurven der Triaxial-Versuche mit z2HS-Steinsalzprüfkörpern aus Tab. 2 dokumentiert. Für dieses Material aus den älteren Untersuchungen liegen ebenfalls keine Analysen zur Bestimmung des KW-Gehaltes vor. In der Legende zu den Abbildungen ist farblich gekennzeichnet, ob der Spannungszustand im Dilatanzregime liegt (rot) oder ob er unterhalb der Dilatanzgrenze bleibt (blau). Nur die Versuchsabschnitte ohne Dilatanz-Einwirkung dürfen für die Ermittlung des Kriechvermögens zum stationären Kriechen genutzt werden.

In den Abbildungen zu den Versuchen 98224 (Abb. 9b); 98237 (Abb. 11); 00071 (Abb. 12); 00072 (Abb. 14); 00073 (Abb. 15) ist bei der konstant gehaltenen Differenz-Spannung von  $\Delta\sigma = 20$  MPa der Manteldruck  $p$  abschnittsweise so verändert worden, dass von Dilatanz beeinflusstes Kriechen wirksam wird. Die Spannungszustände, bei denen von Dilatanz-Effekten zusätzlich getragenes Kriechen einsetzt, bestätigen die Dilatanzgrenze nach CRISTESCU & HUNSCHKE (1998). Dieser Befund wird in Abb. 16 illustriert. Damit wird auch bei den Triaxial-Versuchen, bei denen gegebenenfalls vorhandene KW-Einschlüsse nicht so einfach haben entweichen können wie bei den Uniaxial-Versuchen, keine Porendruck-Wirkung auf das Kriechen und die Lage der Dilatanzgrenze im Spannungsraum detektiert.

Die Zusammenstellung der Ergebnisse zu den Kriechklassen aus Triaxial-Versuchen liefert Tab. 2. Im Gegensatz zu den einfachen Uniaxial-Versuchen, die im Standardfall zur Ermittlung des bereichsweise gegebenenfalls unterschiedlichen Kriechvermögens und der diesbezüglichen Kartierung von Homogenbereichen dienen, wird bei Triaxial-Versuchen das Stoffgesetz BGRb zur Klassifizierung des Kriechvermögens genutzt. Das Verwenden von zwei verschiedenen Referenz-Stoffgesetzen wird im Abschlussbericht zum AP 9G213811 (HUNSCHE et al. 2003) begründet. Auch nach Ausweis der Ergebnisse aus den Triaxial-Versuchen wird bestätigt gefunden, dass in der Regel das Knäuelsalz (z2HS1) im Mittel duktiler ist als das Streifensalz (z2HS2) und dass das Kristallbrockensalz (z2HS3) das vergleichsweise geringste Kriechvermögen aufweist.

Mit Bezug auf die Befunde zum Einfluss von Dilatanz auf das Kriechen, wie er in Abb. 16 für die Versuche 00071 und 00072 dokumentiert ist, Versuchsbeginn war im Juni 2001, wurden an vier Prüfkörpern (11075; 11076; 11077; 11081) aus der Bohrung GoEB1RB793 ab März 2012 identische Wiederholungen durchgeführt (so gut dies arbeits- und ablauf-technisch möglich war). Die Eigenschaften der aus dem „neuen“ Material verfügbaren Prüfkörper sind in Tab. 3 zusammengestellt. Hier handelt es sich wieder um Kernstücke aus dem Knäuelsalz (z2HS1), allerdings wurde nach Wiederaufnahme der Erkundungsarbeiten darauf geachtet, Kern-Material aus einem der mit KW-Einschlüssen am intensivsten imprägnierten Gesteinsbereiche zu erhalten.

Wie bei den Versuchen 00071 und 00072 in Abb. 16 wurde wieder mit der konstant gehaltenen Differenz-Spannung  $\Delta\sigma = 20$  MPa bei konstanter Temperatur  $T = 30^\circ\text{C}$  gearbeitet. Das Einsetzen der Dilatanz-Wirkung auf die Kriechrate ist auch in Abb. 17 für die vier wieder zeitgleich durchgeführten Versuche im Bereich der Reduktion des Manteldrucks von  $p = 8$  MPa auf  $p = 6$  MPa abzulesen. Die Kriechrate ist nach ca. 100 Tagen bis in die Prüfphase mit dem Manteldruck  $p = 8$  MPa, also vor Einsetzen der Dilatanz-Wirkung und immerhin ca. 10 % Axial-Verformung, nahezu vollständig zur stationären Kriechrate abgeklungen. Für die Versuche 00071 und 00072 folgt  $\Delta\varepsilon / \Delta t \approx 2,0\text{E-}04$  1/d, für die Kerne aus der RB793 folgt  $\Delta\varepsilon / \Delta t \approx 3,0\text{E-}04$  1/d. Durch Dilatanz kommt es zu erhöhter Duktilität, die selbst bei  $p = 0,5$  MPa mit einem Faktor kleiner zwei jedoch sehr moderat ausfällt. Nach Rückkehr zum Manteldruck  $p = 8$  MPa liegt gemäß CRISTESCU & HUNSCHE (1998) wieder ein Spannungszustand unterhalb der Dilatanzgrenze vor. Die im Dilatanz-Regime bei  $p = 0,5$  MPa zuvor erhöhte Duktilität nimmt wieder entsprechend ab. Nach ca. 300 Tagen Versuchszeit und dem Manteldruck von wieder  $p = 8$  MPa resultiert für die Kerne aus der Bohrung GoEB1RB793 die wenig geringere Kriechrate von  $\Delta\varepsilon / \Delta t \approx 1,5\text{E-}04$  1/d gegenüber zuvor  $\Delta\varepsilon / \Delta t \approx 3,0\text{E-}04$  1/d nach 100 Tagen.

Die zweite Versuchsphase in Abb. 16, für welche die Versuche erst nach zwischenzeitlicher Versuchsunterbrechung zwecks Zugabe von gesättigter NaCl-Lösung fortgesetzt wurden,

ist bei den vier Versuchen an KW-Kernen nicht mehr durchgeführt worden, um die Vermischung von Einwirk-Ursachen zu vermeiden. Durch die Zugabe der NaCl-Lösung verstärkte sich der Duktilitätsanstieg bei Erreichen des Spannungszustands im Dilatanz-Regime, die Dilatanzgrenze zwischen  $p = 8 \text{ MPa}$  und  $p = 6 \text{ MPa}$  wurde dadurch aber nur besser erkennbar bestätigt. Ein derartiger Duktilitätsanstieg, der auch schon allein auf die Wirkung der KW-Einschlüsse zurückgeführt werden könnte, tritt bei den KW-Prüfkörpern aus der Bohrung GoEB1RB793 nicht auf.

## 8 Temperatur-Einwirkung

Neben der unmittelbaren Veränderung des Spannungszustands durch das Auffahren eines Hohlraums wird nach Einbringen von HAW-Abfall das umgebende Salzgestein aufgeheizt. Mögliche Ursachen für die KW-Wirkung resultieren also sowohl aus mechanisch als auch thermisch induzierten Prozessen. Allerdings ist für eine reale Untertage-Situation davon auszugehen, dass die im Falle von Dilatanz mechanisch induzierten Prozesse abgeklungen sind - auch in den Gesteinsbereichen mit KW-Imprägnationen, bevor das Gestein sich merklich aufheizt. Demzufolge soll hier die thermische Einwirkung als eigenständiger, weil nachlaufender Prozess betrachtet werden, also unter der Randbedingung, dass der Kontakt zwischen anstehendem Gebirge und Wärmequellen durch Konvergenz in den zur Einlagerung von HAW-Gebinden genutzten Strecken bzw. Bohrlöchern hergestellt wurde, wobei die Differenz-Spannung und damit die Dilatanz-Wirkung bereits gegen Null gehen.

Bezüglich der thermo-mechanischen Wirkung ist ferner davon auszugehen, dass auch in den Bereichen mit KW-Imprägnationen der Porenanteil im Salzgestein gering ist. Als typischer Wert war für möglichst sorgsam erbohrtes Material bereits  $1 \text{ mg KW} / 1 \text{ kg Steinsalz}$  genannt worden (HAMMER et al. 2012). Mit Anstieg der Temperatur wird der relative Volumenbruchteil, der von KW-Einschlüssen im Salzgestein eingenommen wird, sich während der thermischen Ausdehnung im Hinblick auf die Wirkung von „Härtlingen“ und anderen Störungen im Gefüge nicht ändern.

Im Falle von Methan kann mit einem Verhalten gerechnet werden, das dem eines idealen Gases nahekommt. Im Falle von höheren oder lang-kettigen KW bleibt die thermisch bedingte Expansion geringer. Eine überschlägige Rechnung für ein ideales Gas liefert bei einem Temperaturanstieg von  $\Delta T = 50 \text{ K}$  einen Druckanstieg im rigiden Porenraum von ca. 15 %. Dagegen bleibt die absolute thermische Ausdehnung des Porenraums im Speichergestein vernachlässigbar gering, sie kann den thermisch induzierten Druckanstieg im Gas nicht ausgleichen. Sobald der Gasdruck in den Bereich der kleinsten Hauptspannung ansteigt, wird das Gas in dem vernetzten Porensystem der gegebenenfalls noch nicht re-kompaktierten EDZ abströmen - oder über Normaldruck-Wirkung die minimale Hauptspannung bis zum

im re-kompaktierten Salzgestein wieder annähernd isotropen Teufendruck anheben und dann diffus verteilte Wegsamkeiten im Korngefüge schaffen (LUX 2006; SCHULZE 2002, dort Kap. 4).

Einen Indikator für die Wirkung einer thermisch bewirkten Expansion der KW-Einschlüsse und des Druckaufbaus in den KW-Poren auf das Gesteinsverhalten kann der Vergleich des thermisch induzierten Ausdehnungsverhaltens eines Steinsalzprüfkörpers mit KW-Einschlüssen gegenüber dem eines Prüfkörpers ohne KW-Einschlüsse liefern.

Erste Untersuchungen wurden mit dem vor dem Moratorium gewonnenen Prüfkörper 99181 durchgeführt (vgl. Tab. 1), der aus dem Bohrkern mit der Bezeichnung GoEB1\_840m/Q1W(9) stammt, welcher nach Augenschein und Geruch KW-Einschlüsse enthalten kann. Der Prüfkörper hatte einen Durchmesser von  $D_0 \approx 70$  mm und eine Länge von  $L_0 \approx 97,48$  mm. Die Dichte-Bestimmung aus Vermessen und Wiegen ergab  $\rho \approx 2,2$  g / cm<sup>3</sup>. Die geologische Ansprache zwecks Gefügebeschreibung fand zum Zeitpunkt der Untersuchung (im Jahre 1999) nicht mehr statt, sie wurde an dem auf seine thermo-mechanischen Eigenschaften geprüften Material jetzt nachgeholt (d.h. in 2011, vgl. Tab. 1). Der Prüfkörper zeigt die für das Knäuelsalz z2HS1 charakteristischen Merkmale. Nicht nachgegangen wurde der Frage, ob bei dem Ausgangsmaterial für den Prüfkörper GoEB1\_840m/Q1W(9) auch KW-Einschlüsse nennenswert vorhanden waren. Nach unserem Kenntnisstand ist seinerzeit keine Untersuchung zum KW-Gehalt, dem Poren-Raum und zu eventuellen Wegsamkeiten an diesem Material mehr erfolgt.

Der Prüfkörper 99181 wurde in einem Dauerstandversuch uniaxial bei lediglich  $\sigma_1 = 1,8$  MPa belastet, wobei nach ca. wöchentlichen bis ca. 14-tägigen Prüfabschnitten die Temperatur von zu Beginn bei  $T = 80^\circ\text{C}$  in Stufen von ca.  $10^\circ\text{C}$  bis auf  $180^\circ\text{C}$  erhöht wurde. Die bei Temperatur-Erhöhung unmittelbar folgende thermische Ausdehnung des Prüfkörpers bestätigt stets den für Steinsalz repräsentativen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von  $\alpha_{\text{th,halit}} \approx 40,0\text{E-}06$  1/K. Dies folgt in Abb. 18 aus der nahezu horizontalen grünen Linie „(L - 1)\_T-komp(Salz+Al)“, welche für die bleibende Längenänderung berechnet wird, wenn für das Distanzstück im Messaufbau der thermische Ausdehnungskoeffizient von Aluminium ( $\alpha_{\text{th,alu}} = 28,0\text{E-}06$  1/K) zu Grunde gelegt wird und die für den Alu-Dorn und den Steinsalz-Prüfkörper berechneten Beträge gegen den integralen Messwert zum Abzug gebracht werden.

Signifikante Abweichungen, die bei Schädigung des Gefüges durch Druckaufbau in den KW-Einschlüssen oder durch deren Freisetzen zu erwarten wären, werden weder bei der thermischen Expansion noch anhand der gering bleibenden Kriechverformung in jeder Temperatur-Haltstufe registriert. Allerdings ist bei diesen Befunden darauf hinzuweisen, dass wegen der lediglich uniaxialen Einspannung die Möglichkeit bestanden hat, dass

Einschlüsse haben „abdampfen“ können und daher zuvor gegebenenfalls vorhandene KW-Einschlüsse ohne Zusatz-Wirkung auf das „Normal-Verhalten“ beim Kriechen von z2HS1-Steinsalz und in der thermischen Ausdehnung geblieben sind. Eine belastbare Prüfung der KW-Wirkung auf die thermische Ausdehnung kann zuverlässig nur bei triaxialer Einspannung ohne unmittelbare Dilatanzwirkung, Auflockerung und Öffnung von (Korngrenzen-)Wegsamkeiten erfolgen.

Nach diesem ersten Befund sind diesbezüglich geeignetere Untersuchungen an Kernmaterial aus der Bohrung GoEB1RB793 an den Prüfkörpern 11079 und 11080 durchgeführt worden (vgl. Tab. 3).

Zur Untersuchung der thermisch induzierten Längenänderung eines Prüfkörpers wird dieser in eine Triaxial-Druckzelle eingebaut. Zum Einsatz kommen stets zylindrische Prüfkörper (Kármán-Prinzip). Durch die allseitige Einspannung mit  $p_{iso} = 20 \text{ MPa}$  wird sichergestellt, dass die Wirkung von Artefakten wie ein Nachwirken auf die Längenänderung aus dem Ausgleich der Oberflächenrauigkeit und Setzung von Maschinen-Komponenten ausgeschlossen wird.

Die Wegmessung erfolgt mit drei Induktiv-Wegaufnehmern, die direkt am oberen und unteren Druckstempel angebracht sind. Der Versuch, die Volumenänderung über die Position des Druckstempels im Druckübersetzer für die Konstanthaltung des Manteldrucks zu messen, bleibt wegen der für den Messaufbau zu geringen Änderungen ohne Erfolg. Für die Fragestellung steht also nur die Messung der axialen Längenänderung zur Verfügung.

Sofern die thermisch induzierte Längenänderung  $\Delta L(\Delta T)$  eines Materialkörpers der Länge  $L_o$  mit dem linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{th}$  beschrieben werden kann, gilt generell:

$$\Delta L(\Delta T) = L_o(T1) \cdot \alpha_{th} \cdot (T1 - T2) = L_o \cdot \alpha_{th} \cdot \Delta T \quad (5)$$

Da in den Messwerten die Beiträge aus der Temperaturempfindlichkeit des gesamten Systems (Mess-Strecken und Mess-Aufbau) mit  $L_{sys} \cdot \alpha_{th,sys}$  und des Prüfkörpers mit  $L_{o,p} \cdot \alpha_{th,p}$  enthalten sind, gilt:

$$\Delta L_{ges}(\Delta T) = L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} \cdot \Delta T = L_{sys} \cdot \alpha_{th,sys} \cdot \Delta T + L_{o,p} \cdot \alpha_{th,p} \cdot \Delta T \quad (6)$$

Zur Berücksichtigung des Systembeitrags ist dieser zu ermitteln und in Abzug zu bringen:

$$L_{sys} \cdot \alpha_{th,sys} = (\Delta L_{ges}(\Delta T) - L_{o,p} \cdot \alpha_{th,p} \cdot \Delta T) / \Delta T = L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} - L_{o,p} \cdot \alpha_{th,p} \quad (7)$$

Zur Ermittlung der Systemempfindlichkeit  $L_{\text{sys}} \cdot \alpha_{\text{th,sys}}$  sind Messungen an Referenz-Prüfkörpern mit bekanntem thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{\text{th,p}}$  durchgeführt worden - und zwar mit einem Prüfkörper aus Aluminium ( $L_o = 250 \text{ mm}$ ;  $\alpha_{\text{th,p}} = \alpha_{\text{th,alu}} = 2,3\text{E-}05 \text{ 1/K}$ ) und einem aus dem reinen z2SP-Asse-Speisesalz ( $L_o = 250 \text{ mm}$ ;  $\alpha_{\text{th,p}} = \alpha_{\text{th,halit}} = 4,0\text{E-}05 \text{ 1/K}$ ).

Beim Messaufbau für Kriech- und Festigkeitsversuche im Lastpfad „Kompression“ erhalten die Wege und die Verformung bei Stauchung ein positives Vorzeichen. Da dieser Messaufbau auch hier verwendet wird, folgt im Falle der thermisch induzierten Ausdehnung ein negatives Vorzeichen für Wege und Verformung.

Die Ergebnisse aus den Messungen an den beiden Referenz-Prüfkörpern, Alu-Dorn bzw. Asse-Speisesalz (08039), werden in Abb. 19 bis Abb. 22 dokumentiert. Aus den Messpunkten, die während einer Temperatur-Haltstufe aufgezeichnet wurden (Abb. 20 bzw. Abb. 22), ist der in guter Näherung lineare thermische Systemkennwert ableitbar - und auf dieser Grundlage dann der thermische Ausdehnungskoeffizient von anderen Prüfkörpern. Die Messwerte, welche im Übergangsbereich während eines Temperaturwechsels aufgezeichnet werden, wurden mit einem Datenfilter herausgerechnet und bleiben unberücksichtigt.

Aus den Messungen mit dem Referenz-Prüfkörper aus Aluminium (Abb. 19 und Abb. 20) folgt gemäß Gleichung (5) die Steigung (Temperaturempfindlichkeit des gesamten Aufbaus):

$L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = -0,0030 \text{ mm/K}$  und mit  $L_{o,Alu} \cdot \alpha_{th,alu} = -0,0058\text{mm/K}$  gemäß Gleichung (7) und dann für das System:

$$L_{\text{sys}} \cdot \alpha_{\text{th,sys}} = -0,0030 \text{ mm/K} + 0,0058 \text{ mm/K} = + 0,0028 \text{ mm/K.}$$

Aus den Messungen mit dem Steinsalz-Prüfkörper (Asse, z2SP; 08039; Abb. 21 und Abb. 22) folgt gemäß Gleichung (5) die Steigung:

$L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = -0,0071 \text{ mm/K}$  und mit  $L_{o,Salz} \cdot \alpha_{th,halit} = -0,01\text{mm/K}$  gemäß Gleichung (7) dann für das System:

$$L_{\text{sys}} \cdot \alpha_{\text{th,sys}} = -0,0071\text{mm/K} + 0,01\text{mm/K} = + 0,0029 \text{ mm/K.}$$

Nach dieser mit Hilfe der beiden Referenz-Prüfkörper nahezu als identisch bestätigten Kalibrierung sind die Versuche an den Prüfkörpern 11079 und 11080 aus der Bohrung GoEB1RB793 mit der auf den Wert  $L_{\text{sys}} \cdot \alpha_{\text{th,sys}} = 0,0029\text{mm/K}$  gesetzten Temperaturempfindlichkeit des Systems durchgeführt worden. Für den direkten Vergleich der Steigungen  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges}$  mit den Messungen an den Referenz-Prüfkörpern hatten diese Prüfkörper ebenfalls die Ausgangslänge von  $L_o = 250 \text{ mm}$  erhalten (Tab. 3). Sowohl beim Versuch 11079 als auch 11080 zeigt sich ein Materialverhalten, das von dem des Asse-Speisesalzes eindeutig abweicht. In Abb. 23 und Abb. 24 ist das Verhalten des

Prüfkörpers 11079 dargestellt. Zu Beginn wird als Steigung  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = 0,0031 \text{ mm/K}$  ermittelt. Erst nach Wiederholung des thermischen Belastungszyklus steigt der Wert bis auf  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = 0,0065 \text{ mm/K}$  an. Aus Abb. 25 und Abb. 26 folgt für den Prüfkörper 11080, dass zu Beginn die Steigung  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = 0,0046 \text{ mm/K}$  beträgt und wieder erst nach Wiederholung des thermischen Belastungszyklus bis auf  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = 0,0065 \text{ mm/K}$  ansteigt. Der für das Asse-Speisesalz gefundene Wert von  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = 0,0071 \text{ mm/K}$  wird aber nicht erreicht. Demzufolge folgt gegenüber dem Referenz-Prüfkörper, Asse-Speisesalz (z2SP), mit  $\alpha_{th,08039} = 40,0E-06 \text{ 1/K}$ , für den ersten KW-Prüfkörper  $\alpha_{th,11079} \leq 14,4E-06 \text{ 1/K}$  und für den zweiten  $\alpha_{th,11080} \leq 14,0E-06 \text{ 1/K}$ , wenn die höchsten Werte im jeweils letzten Temperatur-Zyklus zu Grunde gelegt werden.

Die im KW-imprägnierten Material aus der Bohrung GoEB1RB793 gegenüber dem Asse-Speisesalz gefundene geringere Temperaturempfindlichkeit bei der thermisch induzierten Längenänderung wird wegen der isostatischen Einspannung mit  $p_{iso} = 20 \text{ MPa}$  nicht auf eine anfangs noch vorhandene Auflockerung zurückgeführt, deren Rückbildung der thermischen Ausdehnung entgegen wirken würde. Die Kompaktion eines gegebenenfalls aufgelockerten Ausgangszustands sollte gleich zu Beginn der isostatischen Belastung abgeschlossen sein. Die Dichtebestimmung aus Vermessen und Wiegen hatte die vergleichsweise hohen Werte von  $\rho_o(11079) = 2,205 \text{ g/cm}^3$  und  $\rho_o(11080) = 2,216 \text{ g/cm}^3$  ergeben. Nach dem Versuchsende wurden die um lediglich ca. 1% höheren Werte von  $\rho_{oo}(11079) = 2,206 \text{ g/cm}^3$  und  $\rho_{oo}(11080) = 2,221 \text{ g/cm}^3$  ermittelt. Die höher als für Steinsalz sonst gefundene Gesteinsdichte wird durch den Anhydrit-Gehalt getragen. Eine der thermischen Ausdehnung nennenswert entgegen gerichtete Kompaktion war demnach nicht wirksam. Beim Prüfkörper 11080 wurde beim Ausbau aus der Triaxial-Zelle auf der Innenseite des Gummimantels, der während des Versuchs zum Schutz gegen das Öl in der Druckzelle dient, ein dünner Film von wässriger Lösung gefunden. Bei der chemischen Analyse des Fluidfilms konnten keine KW-Verbindungen nachgewiesen werden (pers. Mitteilung GEORG SCHEEDER, BGR).

Zur Kontrolle des Befundes an den Prüfkörpern aus der Bohrung GoEB1RB793 (z2HS1) ist eine zusätzliche Messung an einem Steinsalzprüfkörper durchgeführt worden, der aus einem Salzblock (Kantenlänge ca. 1,5 Meter) vom Bohrort GoEB1/Bo1.2 stammt. Bohrort GoEB1/Bo1.2 liegt im Streifensalz (z2HS2) im Querschlag 1 West in der Nähe zur südlichen Richtstrecke des Erkundungsbereiches GoEB1. Das Ergebnis in Abb. 27 bestätigt die für die Prüfkörper 11079 und 11080 gefundenen Werte mit im Mittel  $L_{o,ges} \cdot \alpha_{th,ges} = 0,0067 \text{ mm/K}$ , das Ergebnis weicht also auch wieder von dem für das Asse-Speisesalz ab. Allerdings stellt sich beim Prüfkörper das Steigungsmaß im Gegensatz zu den KW-Kernen 11079 und 11080 von Anfang an konstant bleibend ein. Zusätzliche Messungen an weiteren geeigneten Prüfkörpern sowie gefügekundliche Untersuchungen, die zur Interpretation

der Befunde zur thermisch induzierten Längenänderung hätten Aufschluss geben können, sind an diesem Material und weiterem Vergleichsmaterial nicht durchgeführt worden.

Generell liefern die Messungen zur Ermittlung des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten an dem untersuchten Material aus dem Erkundungsbergwerk Gorleben geringere Werte als für dasASSE-Speisesalz.

## 9 Transport-Eigenschaften

Erst mit Auffahren des Untertagebauwerks entsteht ein Spannungszustand, der im Nahbereich der Hohlräume eine Dilatanz-Wirkung verursacht und bei dem in den Bereichen mit KW-Einschlüssen ein damit verbundener Porendruck auf die THM-Gebirgseigenschaften zusätzlich einwirken und diese verändern kann.

Da während einer Dilatanz-Wirkung kontinuierlich neue Wegsamkeiten entstehen, hat dies in der sich entsprechend ausbildenden EDZ eine von „Null“ verschiedene Permeabilität zur Folge (SCHULZE 2007). Hier ist zu prüfen, ob die KW-Einschlüsse auch bei den Transporteigenschaften von neutraler Wirkung bleiben - oder ob sie wie eine benetzende Lösung in einem Zwei-Phasen-System „Fluid-Gas“ mit Aufbau eines kapillaren Sperrdrucks wirken - oder die wässrige Lösung verdrängen und so die Durchströmbarkeit reduzieren. Nur wenn gilt, dass ein KW-Fluid, KW-Gas oder ein KW-Fluid-Gas-Gemisch als ein Ein-Phasen-System behandelt werden darf, lassen sich - unter Annahme von Darcy-Fluss und entsprechend berücksichtigter Viskosität - die z.B. für Gas (SCHULZE 2007) bisher als zutreffend nachgewiesenen Permeabilität-Porosität-Beziehungen anwenden. Dieser Vorbehalt sei besonders betont, da KW-Einschlüsse und Einschlüsse mit Salzlösungen gemeinsam auftreten können (vgl. Abb. 2).

Untersuchungen zur Porosität und Permeabilität sind an vier Prüfkörpern durchgeführt worden, die aus Steinsalzbereichen kommen, welche KW-Einschlüsse enthalten und einer Belastung im Dilatanz-Regime ausgesetzt waren. Die verfügbaren Mini-Zylinder, Durchmesser  $D = 30$  mm, Länge  $L = 60$  mm, stammen aus den Bohrungen GoRB687\_File: 12064; GoRB688\_File: 12065; GoRB689\_File: 12066 und GoRB690\_File: 12067.

Die markscheiderischen Bezeichnungen lauten:

02YEQ02/RB687 für GoRB687

02YEQ02/RB688 für GoRB688

02YEQ02/RB689 für GoRB689

## 02YEQ02/RB690 für GoRB690

Die Prüfkörper waren nach Kerngewinnung und Präparation nicht ohne Gefüge-Schädigung geblieben. Winzige Einzel-Risse durchsetzen jeden Prüfkörper. Die Untersuchungen zur Ermittlung von Porosität und Permeabilität wurden dennoch durchgeführt, um einen neu entwickelten Messplatz auf Tauglichkeit zu testen.

Die Prüfkörper wurden mit einem Gummi-Schlauch ummantelt und unter einem allseitigen Druck in einer Druckzelle (Hassler-Typ) eingespannt - in der Regel bei  $p_{iso} = 5$  MPa. Die Messung der Permeabilität erfolgte über den auf eine Stirnseite des Prüfkörpers aufbrachten konstanten  $N_2$ -Gasdruck (stationäre Strömung). Der Gas-Durchfluss wurde auf der anderen Seite mit Hilfe eines Durchfluss-Messgerätes aufgezeichnet. Der Gasdruck am Einlass war fest vorgegeben - in der Regel  $p_{gas} = 0,5$  MPa, auf der Auslass-Seite stand atmosphärischer Luftdruck frei an. Gemessen wurde bei allen vier Prüfkörpern eine unerwartet hohe Permeabilität - und zwar von  $1,0E-17$  m<sup>2</sup> bis  $5,0E-16$  m<sup>2</sup>.

Die Porosität ist über Pyknometrie mit He-Gas ermittelt worden. Die aus Vermessen und Wiegen erhaltene Rohdichte lag im Vergleich zum für Steinsalz sonst repräsentativen Wert von  $\rho = 2,165$  g/cm<sup>3</sup> wieder recht hoch, hier im Mittel bei  $\rho = 2,195$  g/cm<sup>3</sup>. Aus der mit dem Pyknometer, Typ AccPyc II, bestimmten Korndichte folgt für die Porosität im Mittel  $\phi = 0,3\%$ . Da trotz der geringen Porosität eine vergleichsweise hohe Permeabilität bestimmt wurde, ist eine Untersuchung angeschlossen worden, bei welcher ein größerer Prüfkörper genutzt werden konnte ( $L_o = 250$  mm;  $D_o = 100$  mm). Zum Vergleich sei auf Poro-Perm-Relationen verwiesen, die z.B. bei SCHULZE (2007) diskutiert werden.

Die am Prüfkörper aus der Bohrung GoEB1RB793 (Tab. 3; File: 11078) durchgeführte Untersuchung erfolgte in einer Triaxial-Prüfmaschine, bei der die Belastung im Lastpfad Kompression oder unter isostatischer Einspannung aufgebracht wird. Während der Belastung und entsprechend resultierender Verformung kann die Entwicklung von Porosität und Permeabilität gemessen werden. Die Messung der Durchströmbarkeit nach dem Pulstest-Verfahren ( $p_{gas} = 0,25$  MPa als Speisedruck auf der Einlass-Seite „Gasoben“) gleich nach Einbau und Aufbringen einer Anfangsbelastung (Temperatur  $T = 30^\circ\text{C} = \text{const.}$ ; Differenz-Spannung  $\Delta\sigma = 1$  MPa; Manteldruck  $p = 1$  MPa) lieferte eine Permeabilität  $k > 1,0E-16$  m<sup>2</sup>. Die hohe Durchströmbarkeit hat ihre Ursache in noch unzureichender Kompaktion und Umschließung des Prüfkörpers mit der Ummantelung. Daher ist für die Dauer einer Woche eine isostatische Kompaktion bei einem isostatischen Druck von  $p_{iso} = 20$  MPa angeschlossen worden. Danach war der Prüfkörper dicht, Durchströmbarkeit konnte auch nach Rückkehr zur Anfangsbelastung nicht wieder gemessen werden (Abb. 28). Zwar nimmt der Gasdruck „Z5-Gasoben“ auf der Einlass-Seite aufgrund von unvermeidbaren Artefakten kontinuierlich ab (z.B. verzögertes Einströmen in für Gas zugängliche Volumina

der Ummantelung), auf der Auslass-Seite „Z5-Gasunten“ wird jedoch innerhalb von 20 Tagen kein zuverlässig messbarer Druckanstieg registriert. Nachfolgend soll dennoch versucht werden, auf Grundlage der zwischen dem 9. Versuchstag bis 29. Versuchstag ablesbaren Werte die Nachweisgrenze für Durchströmbarkeit abzuschätzen. Die anfängliche Druck-Differenz  $\Delta p(0) = 2,38$  bar fällt auf  $\Delta p(20) = 2,33$  bar ab. Für den Prüfkörper ( $D = 0,1$  m;  $L = 0,25$  m) errechnet sich daraus eine Permeabilität  $k \leq 5,0E-19$  m<sup>2</sup>. Im Versuchsabschnitt um den 31. Versuchstag lässt sich dagegen der Anstieg auf  $k = 1,2E-18$  m<sup>2</sup> zuverlässig ablesen.

Unter Beibehalten einer einseitigen Gasdruck-Belastung auf eine Stirnseite des Prüfkörpers (Z5-Gasoben) wurde die Differenz-Spannung stufenweise erhöht, um über dieses Detektionsverfahren (vgl. Abb. 5) zur Bestätigung der Befunde in Abb. 16 und Abb. 17 das Erreichen eines Spannungszustands im Dilatanzregime durch das Einsetzen von Durchströmbarkeit zu erfassen. Gemäß der Dilatanzformel von CRISTESCU & HUNSCHE (1998) soll dies bei der Differenz-Spannung  $\Delta\sigma_{dil} (p = 2 \text{ MPa}) > 8 \text{ MPa}$  der Fall werden. Erst in der Stufe mit  $\Delta\sigma = 11 \text{ MPa}$  fällt der Gasdruck auf der Einlass-Seite ab, auf der Gegenseite steigt er entsprechend an (Abb. 28). Die axiale Gesamtverformung liegt noch bei  $\varepsilon \sim 0,6\%$ , eine Zunahme der volumetrischen Verformung als Folge von Dilatanz kann noch nicht gemessen werden. Wegen der stets nur ca. eine Woche andauernden Versuchsabschnitte mit konstanter Differenz-Spannung und der geringen Verformungen tritt Durchströmbarkeit als Folge von Dilatanz verzögert erst in der Stufe mit  $\Delta\sigma = 11 \text{ MPa}$  auf. Nach Rücknahme der Differenz-Spannung auf  $\Delta\sigma = 10 \text{ MPa}$  bleibt Durchströmbarkeit erhalten. Durch diesen Befund wird die Dilatanzgrenze gemäß Abb. 5 bestätigt. Ein vorzeitiges Einsetzen von Dilatanz durch eine mögliche Porendruck-Wirkung in dem Steinsalzprüfkörper mit KW-Einschlüssen (vgl. Abb. 7) wird dagegen nicht registriert.

## 10 Wirkung ionisierender Strahlung

Eine weitere Quelle für einen Druckaufbau und eine Porendruckwirkung kann im Prinzip in der radiolytischen Zerlegung von KW-Verbindungen entstehen. Allerdings wird die von HAW-Material ausgehende Strahlung nahezu vollständig in den Gebinden absorbiert. Nur im Falle der dünnwandigen HAW-Kokillen (und anderer vergleichbar dünnwandiger Abfall-Gebinde) erreicht die ionisierende  $\gamma$ -Strahlung das Salzgestein. Durch Absorption können die sogenannten Farbzentren entstehen - im Steinsalz letztlich molekulares Chlorgas und metallisches Natrium. Im Falle gegebenenfalls anstehender wässriger Lösung führt die Radiolyse zu einem weiten Spektrum von Chlorsäuren, auch freier Wasserstoff kann entstehen (JENKS et al. 1975). Eine Übersicht dazu gibt SCHULZE (2002). Zur Radiolyse von KW-Verbindungen sind hier keine Befunde bekannt. Für die Diskussion ist mit Blick auf einen möglichen Druckaufbau durch Radiolyse-Gase unbedingt zu beachten, dass die

ionisierende Wirkung der  $\gamma$ -Strahlung als Folge der Absorption nur wenige Zentimeter in das Salzgestein eindringen kann (SCHULZE 1985). Darüber hinaus gilt nach Ausweis der Ergebnisse aus der Standorterkundung und auf Grundlage der Kenntnisse zum geologischen Standort-Modell, dass Gesteinsbereiche, die KW-Imprägnation in nennenswerter Menge enthalten können, im Zuge der untertägigen Erkundung vorhersehbar sind. Aufgrund dessen ist es zulässig, die Quelle „Radiolyse von KW-Verbindungen mit Druckaufbau im Porensystem“ von vornherein auszuschließen.

## 11 Zusammenfassung

Zur quantitativen Bewertung der Relevanz bzw. Signifikanz mechanisch und thermisch induzierter Einwirkung von KW-Einschlüssen auf die Gebirgseigenschaften ist Voraussetzung, Art, Menge, Verteilung und Einschlussform der KW im Kleinen, also im Steinsalzgefüge, wie auch im Großen, also bezüglich der Gesteinsbereiche und Feldesteile mit KW-Imprägnationen, zu kennen.

Generell besteht zur Bewertung der möglichen Einwirkungen das Prozessverständnis. Die darauf aufbauenden Formulierungen von Stoffgesetzen sind im Prinzip vorhanden und für Modellberechnungen verfügbar. Ein KW-Gehalt, bis zu dem keine Einwirkung auf das THM-Verhalten der Wirtsgesteinsbereiche eintreten kann, kann allerdings nicht generell benannt werden, denn Verteilung (z.B. mittlerer freier Abstand) und Einschlussform sind entscheidende Parameter.

Um die Parameter in den Stoffgesetzformulierungen - und hier insbesondere den hydraulischen Wirkfaktor (Biot-Faktor) quantifizieren zu können, müssen die Eigenschaften der KW führenden Gesteinsbereiche und die der KW-Vorkommen zuverlässig bekannt sein.

Mit Blick auf die hier durchgeführten und berichteten Untersuchungen muss jedoch gefragt werden, ob der Umfang der Untersuchungen an Material aus der als repräsentativ eingeschätzten Bohrung GoEB1RB793 und die Datenlage zu den KW-Nachweisen genügend geeignet sind, um zu einer quantitativen Bewertung der Relevanz bzw. Signifikanz der mechanisch und thermisch induzierten Einwirkungen von KW-Einschlüssen auf die Gebirgseigenschaften zu gelangen. Da die KW-Imprägnationen offenbar nur begrenzt und in tektonisch und stratigrafisch identifizierbaren Gesteinsbereichen angetroffen werden - also vorzugsweise im Kernbereich der Sattel-Struktur des Staßfurt-Hauptsalzes (Knäuelsalz z2HS1) - und da der Gehalt in diesen Bereichen im Mittel nicht höher als 1 mg KW-Verbindungen pro 1 kg Salzgestein beträgt, kann eine Wirkung auf die thermo-mechanischen Eigenschaften ausgeschlossen werden.

Zielführende Untersuchungen und die Interpretation benötigen als Grundlage aufschlussreiche Gefügeuntersuchungen - insbesondere im Hinblick auf das Auftreten von KW-Einschlüssen in Verbindung mit Einschlüssen wässriger Lösung.

Wegen der grundsätzlichen, von einer bestimmten Steinsalzformation unabhängigen Aufgabenstellung, den Zusammenhang zwischen Gefüge-Merkmalen und THM-Eigenschaften eines Wirtsgesteins zu ermitteln und für Prognosen zu nutzen, sind diese Arbeiten fortzuführen. Die experimentellen Voraussetzungen zum sachgerechten Umsetzen der methodischen Herangehensweise und für die Verbesserung der Datengrundlage sind vorhanden.

## Literaturverzeichnis

- CRISTESCU, N. & U. HUNSCHE (1998): Time effects in rock mechanics.- Series: Materials, modelling and computation; 342 pp.; John Wiley & Sons, Chichester (UK).
- HAMMER, J., PUSCH, M., HÄGER, A., OSTERTAG-HENNING, C., SCHLÖMER, S., MINGERZAHN, G., SCHEEDER, G., SHAO, H., PAUL, B., SCHULZE, O., ZARETZKI, B., HESSER, J. (2012): Projekt Gorleben. Untersuchungen von Kohlenwasserstoffen im Erkundungsbergwerk Gorleben - Zwischenbericht 2011. Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 236 S., 107 Abb., 17 Tab., 3 Anhänge
- HAMPEL, A. & O. SCHULZE (2007): The Composite Dilatancy Model: A constitutive model for the mechanical behaviour of rock salt.- In: M. Wallner, K-H. Lux, W. Minkley & H.R. Hardy, Jr. (eds.): The Mechanical Behaviour of Salt. Understanding of THMC Processes in Salt. Hannover 2007: 99-107. Taylor & Francis, London.
- HAMPEL, A. (2012a): Weiterentwicklung der Module im CDM-Stoffgesetzsystem 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: P. Bérest, M. Ghoreychi, F. Hadj-Hassen & M. Tijani (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).
- HERRMANN, A.G. (1996): Fluid Inclusions in Evaporiten. Film B 1839. ISSN 00734433.- Publ. Wiss. Film; Techn. Wiss. / Naturw. 12:89-183.
- HUNSCHE, U., O. SCHULZE, F. WALTER & I. PLISCHKE (2003): Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein.- BGR-Abschlussbericht zum Arbeitspaket 9G213811.
- JENKS, G.H., E. SONDER, C.D. BOPP, J.R. WALTON & S. LINDENBAUM (1975): Reaction products and stored energy released from irradiated sodium chloride by dissolution and by heating.- J. Phys. Chem. 79:871-875.
- LUX, K.-H. (2006): Zum langfristigen Tragverhalten von verschlossenen solegefüllten Salzkavernen – ein neuer Ansatz zu physikalischer Modellierung und numerischer Simulation.- Erdöl Erdgas Kohle, 122(11): 420-428. Urban-Verlag, Hamburg.

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

Tab. 2: Ergebnisse aus triaxialen Kriechversuchen zur Ermittlung des Kriechverhaltens und des Einsetzens von Dilatanz von Steinsalz in Abhängigkeit von den Bohrungen...

Tab. 3: Prüfkörper aus der Bohrung GoEB TRB703 und deren Eigenschaften...

	Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1:	Kernmaterial und Prüfkörper aus dem Gesteinsbereich des z2HS, der KW-Einschlüsse enthalten kann.....	34
Tab. 2:	Ergebnisse aus triaxialen Kriechversuchen zur Ermittlung des Kriechvermögens und des Einsetzens von Dilatanz von Steinsalz (z2HS) aus den Bohrungen:.....	39
Tab. 3:	Prüfkörper aus der Bohrung GoEB1RB793 und deren Verwendung.....	41
	gewönel, flüssige bis feste KV-Verbindungen. Die KV-Einschlüsse sind eingeleimt und voneinander isoliert angeordnet. Standbild aus Bohrung 1996) mit Dank an Z. Pore (H.G. Leipzig)	43
Abb. 3:	Verteilung von KV-Einschlüssen in einem Gesteinsstück (Bohrung 1996, Lohf, Gorleben-Steinsalz, Handstück aus Durchschlag 1. Bohr z2HS) (Pore et al. 2002)	44
Abb. 4:	Zusammenstellung verschiedener Formulierungen für die Dilatanzgrenze zum Lastpfad „Kompression“ (Schulze 2007)	45
Abb. 5:	Kurzzeit-Bruchgrenze und Dilatanzgrenzen (S. 2) und (S. 3) mit Darstellung der Ergebnisse aus verschiedenen Dehnversuchen (Schulze 2007)	46
Abb. 6:	Vergleich der Bruchfestigkeit und der Dilatanzgrenze (S. 3) in der $\sigma = f(\sigma_{\text{Kompression}})$ -Darstellung für Kompression (Lastpfad $m = -1$ ) und Expansion (Lastpfad $m = +1$ )	47
Abb. 7:	Verschiebung eines Spannungszustandes bei Parallelverschiebung zur Kurzzeit-Bruchgrenze und zur Dilatanzgrenze (S. 3)	48
Abb. 8:	Triaxial-Kriechversuch (99179) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	49
Abb. 9:	Triaxial-Kriechversuch (99274) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	50
Abb. 10:	Triaxial-Kriechversuch (99275) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	51
Abb. 11:	Triaxial-Kriechversuch (99276) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	52
Abb. 12:	Triaxial-Kriechversuch (99277) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	53
Abb. 13:	Triaxial-Kriechversuch (99278) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	54
Abb. 14:	Triaxial-Kriechversuch (99279) an z2HS-Steinsalz aus RB19 (a) Verformung, (b) Verformungsrate	55

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Verschmierte KW-Austrittsstelle am Stoß. Im Bohrloch mit Tropfen- und Saumbildung durch nicht-flüchtige KW längs bevorzugter Wegsamkeiten in der Auflockerungszone des Hauptsalzes (Querschlag 1 West).....	43
Abb. 2: Jenseits der Auflockerungszone sind die KW-Einschlüsse saum- bzw. netz-förmig auf Korngrenzen eingeschlossen, zum geringen Teil auch wie in der Abbildung intrakristallin. Die Einschlüsse enthalten in der Regel Salzlösung und Gas unterschiedlicher Zusammensetzung sowie (untergeordnet) flüssige bis feste KW-Verbindungen. Die KW-Einschlüsse sind eingeformt und voneinander isoliert angeordnet. Standbild aus HERRMANN (1996) mit Dank an TILL POPP (IfG, Leipzig).....	43
Abb. 3: Verteilung von KW-Einschlüssen in einem Dickschliff (Durchlicht, UV-Licht), Gorleben-Steinsalz, Handstück aus Querschlag 1 West, z2HS1 (POPP et al. 2002).....	44
Abb. 4: Zusammenstellung verschiedener Formulierungen für die Dilatanzgrenze zum Lastpfad „Kompression“ (SCHULZE 2007).....	45
Abb. 5: Kurzzeit-Bruchgrenze und Dilatanzgrenzen (Gl. 2) und (Gl. 3) mit Darstellung der Ergebnisse aus verschiedenen Detektionsverfahren (SCHULZE 2007).....	46
Abb. 6: Vergleich der Bruchfestigkeit und der Dilatanzgrenze (Gl. 3) in der $\Delta\sigma = f(\sigma_{\min})$ -Darstellung für Kompression (Lastpfad $m = -1$ ) und Extension (Lastpfad $m = +1$ ).....	47
Abb. 7: Verschiebung eines Spannungszustands bei Porendruck-Wirkung relativ zur Kurzzeit-Bruchgrenze und zur Dilatanzgrenze (Gl. 3).....	48
Abb. 8: Triaxial-Kriechversuch (99179) an z2HS3-Steinsalz aus RB119, (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	49
Abb. 9: Triaxial-Kriechversuch (98224) an z2HS2-Steinsalz aus RB210 (12,74 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	50
Abb. 10: Triaxial-Kriechversuch (98225) an z2HS2-Steinsalz aus RB210 (14,22 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	51
Abb. 11: Triaxial-Kriechversuch (98237) an z2HS3-Steinsalz aus RB210 (31,28 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	52
Abb. 12: Triaxial-Kriechversuch (00071) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (6,21 m); Zugabe von NaCl-Lösung ( $< 1 \text{ cm}^3$ ) am 230-ten Versuchstag, (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	53
Abb. 13: Triaxial-Kriechversuch (99017) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (13,51 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	54
Abb. 14: Triaxial-Kriechversuch (00072) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (19,37 m); Zugabe von NaCl-Lösung ( $< 1 \text{ cm}^3$ ) am 230-ten Versuchstag, (a) Verformung; (b) Verformungsrate.....	55

Seite

Abb. 15: Triaxial-Kriechversuch (00073) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (23,06 m) mit Temperatur-Wechsel (30°C > 50°C), (a) Verformung; (b) Verformungsrate .....	56
Abb. 16: Triaxial-Kriechversuche aus Abb. 12 und Abb. 14; mit und ohne Dilatanz-Wirkung, Zugabe von NaCl-Lösung am 230-ten Tag. ....	57
Abb. 17: Triaxial-Kriechversuche aus Abb. 16, erster Versuchsabschnitt vor der Unterbrechung zwecks Zugabe von NaCl-Lösung, im Vergleich mit dem Kriech-Verhalten der vier Prüfkörper aus der Bohrung GoEB1RB793 (vgl. Tab. 3) .....	58
Abb. 18: Prüfkörper 99181 (uniaxial belastet) - Thermische Ausdehnung bei Temperatur-Erhöhung und deren Berechnung .....	59
Abb. 19: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 20$ MPa) an einem Aluminium-Prüfkörper als Referenz zum Kalibrieren der Mess-Strecke. Der Graph „alpha_ALU+System“ folgt aus der ermittelten Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System.....	60
Abb. 20: Lineare Anpassung zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit an die Ideal-Kurve für Aluminium und an die Messwerte für das Gesamt-System. Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt.....	61
Abb. 21: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 20$ MPa) am Steinsalz-Prüfkörper Asse-Speisesalz, z2SP, File: 08039, als Referenz zum Kalibrieren der Mess-Strecke. Der Graph „alpha_Salz+System“ folgt aus der ermittelten Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System .....	62
Abb. 22: Lineare Anpassung zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit an die Ideal-Kurve für den Steinsalz-Prüfkörper (08039) und an die Messwerte für das Gesamt-System. Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung trifft für alle Phasen (auf + ab) im Temperatur-Programm zu .....	63
Abb. 23: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 2$ MPa) am Steinsalz-Prüfkörper GoEB1RB793/004/06, z2HS1; File: 11079. Der Graph „alpha_Salz+System“ folgt aus der Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System.....	64
Abb. 24: Lineare Anpassung der Messwerte für das Gesamt-System zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit für den Steinsalz-Prüfkörper (11079). Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung erreicht asymptotisch erst im dritten Zyklus des Temperatur-Programms den stabilen Endwert .....	65

## Anhangverzeichnis

## Seite

Abb. 25:	Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 20 \text{ MPa}$ ) am Steinsalz-Prüfkörper GoEB1RB793/005/02, z2HS1; File: 11080. Der Graph „alpha_Salz+System“ folgt aus der Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System.....	66
Abb. 26:	Lineare Anpassung der Messwerte für das Gesamt-System zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit für den Steinsalz-Prüfkörper (11079). Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung erreicht asymptotisch erst im dritten Zyklus des Temperatur-Programms den stabilen Endwert.....	67
Abb. 27:	Lineare Anpassung der Messwerte für das Gesamt-System zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit für den Steinsalz-Prüfkörper (11059). Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung bleibt in den drei Zyklen des Temperatur-Programms konstant.....	68
Abb. 28:	Steinsalzprüfkörper 11078 (vergl. Tab. 3) mit konstant bleibendem Gasdruck auf der Einlass-Seite ( $p_{gas} = 0,25 \text{ MPa}$ ), bis als Folge abschnittsweise gesteigerter Differenz-Spannung das Dilatanz-Regime erreicht wird und Durchströmbarkeit einsetzt. Dadurch steigt der Gasdruck auf der Auslass-Seite an. (Manteldruck $p = 2 \text{ MPa} = \text{const.}$ ; Temperatur $T = 30^\circ\text{C} = \text{const.}$ ).....	69

---

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1: .....	33
Tabellen	
Anhang 2: .....	42
Abbildungen	

- Anhang 1 -

Tab. 1: Kernmaterial und Prüfkörper aus dem Gesteinsbereich des zZHS; der KW-Einschlüsse enthalten kann.

Kernbezeichnung	FileNr	Stratig	Herkunft	Tiefe [m]	Dichte	BGRa	Probenbeschreibung
GoEB1_840m(Q1W(9))	99181	zZHS1	Q1W(9)	0	2.200		Steinsalz, mittelgrau, schwach durchscheinend, fein- mittel- vereinzelt grobkrist., unregelmäßig vert. Anhydritknäuel bzw. vereinzelt Anhydritleisten an groben Kristallen, ohne Einfallen
GoEB1RB119/04/9/086/01	01001	zZHS1	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	251.04	2.178	6	Steinsalz, schmutziggrau, fein- mittelkristallin, zoniert unregelmäßig verteilte Anhydritflocken, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB119/04/9/086/02	01002	zZHS1	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	253.47	2.212	6	Steinsalz, schmutziggrau, feinkristallin, massive Anhydritlinienreste, -knauern und -flocken, unregelmäßig verteilt, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB119/05/1/089/01	01004	zZHS2	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	261.42	2.176	6	Steinsalz, milchgrüb, feinkristallin, eine Zone mit einer Anhydritflockenwolke, Einfallen 35°
GoEB1RB119/05/1/089/02	01005	zZHS2	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	261.92	2.198	6	Steinsalz, hellgrau fast undurchscheinend, fein- gelegentlich mittelkristallin, diffus wolkig von Anhydritflocken durchsetzt, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB119/09/7/173/01	01007	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	512.36	2.176	4	Steinsalz, gläsern - schmutziggrau, grob- Überkorn - partienweise mittelkristallin, Anhydritlinienreste z.T. auch Säume, Einfallen 35°
GoEB1RB119/09/7/173/02	01008	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	512.49	2.188	5	Steinsalz, gläsern - schmutziggrau, grob- Überkorn - partienweise mittelkristallin, Anhydritlinienreste z.T. auch Säume, Einfallen 20°
GoEB1RB119/105/181/01	00181	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	536.59	2.174	4	Steinsalz, milchgrüb, mittel- gelegentlich grob- feinkristallin, vereinzelt Anhydritflocken und -linienreste, Einfallen 30°
GoEB1RB119/106/182/01	99180	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	540.32	0.000	6	
GoEB1RB119/114/190/01	00183	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	562.70	2.176	7	Steinsalz, milchgrüb, grob- gelegentlich mittelkristallin, auf Korngrenzen Anhydritflockensäume, Einfallen 30°
GoEB1RB119/115/191/02	00187	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	566.20	2.166	4	Steinsalz, milchgrüb, grob- partienweise mittelkristallin, zwei wolkig diffuse anhydritisch verunreinigte Zonen, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB119/120/196/01	00189	zZHS3	Bohrort 3, parallel Q1-Ost, westl.	582.41	2.176	4	Steinsalz, milchgrüb - bräunlich, feinkristallin, unregelmäßig im Schichteinfallen verteilte Anhydritflocken, Einfallen 25°
GoEB1RB120/126/186/01	99134	zZHS3	Bohrort 3, Vorbohrung Q1-Ost,	549.01	2.166	5	Steinsalz, milchgrüb - graugläsern, grob- partienweise mittelkristallin, zerrissene Anhydritschurreste und vereinzelt Anhydritflocken, Einfallen ca. 35°
GoEB1RB120/126/186/03	99136	zZHS3	Bohrort 3, Vorbohrung Q1-Ost,	549.27	2.168	5	Steinsalz, milchgrüb - graugläsern, mittel- grobkristallin, lagenweise Anhydritflocken, Halitaugen in oberer Probenhälfte, Einfallen ca. 45°
GoEB1RB120/134/194/02	99138	zZHS3	Bohrort 3, Vorbohrung Q1-Ost,	574.66	2.159	4	Steinsalz, milchgrüb - gläsern, mittel- grobkristallin, mehrere Halitaugen bis 4 cm Durchmesser, zwei Anhydritflockenlinien, Einfallen ca. 45°
GoEB1RB120/134/194/03	99139	zZHS3	Bohrort 3, Vorbohrung Q1-Ost,	574.79	2.161	4	Steinsalz, milchgrüb - gläsern, mittel- grobkristallin, mehrere Halitaugen bis 4 cm Durchmesser, zwei schwache Anhydritflockenschnüre, Einfallen ca. 25°
GoEB1RB120/135/195/02	99141	zZHS3	Bohrort 3, Vorbohrung Q1-Ost,	576.88	2.166	4	Steinsalz, milchgrüb - gläsern, mittel- partienweise fein- grobkristallin, zonenweise Anhydritflocken und Flockenlinien, Einfallen ca. 35°
GoEB1RB210/007/007/02	98218	zZHS	Bohrort 3, Q1-Ost, westl.	8.55	2.204	6	Steinsalz, grau, fein- gelegentlich grobkristallin, am oberen Ende ein Überkorn, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/010/010/01	98220	zZHS	Bohrort 3, Q1-Ost, westl.	11.71	2.182	5	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/010/010/02	98221	zZHS2	Bohrort 3, Q1-Ost, westl.	11.94	2.195	5	Steinsalz, grau, mittel- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/015/015/01	98226	zZHS2	Bohrort 3, Q1-Ost, westl.	17.92	2.197	6	Steinsalz, grau, fein- mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung

- Anhang 1 -

Kernbezeichnung	FileNr	Stratig	Herkunft	Tiefe [m]	Dichte	BGRa	Probenbeschreibung
GoEB1RB210/015/015/02	98227	z2HS2	Bohrtort 3, Q1-Ost, - westl.	18.09	2.195	6	Steinsalz, grau, fein- mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/019/019/02	98229	z2HS2	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	24.04	2.173	5	Steinsalz, hellgrau, fein- mittelkristallin, an Probenenden Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/019/019/03	98230	z2HS2	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	24.14	2.189	4	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/022/022/01	98231	z2HS2	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	27.25	2.176	3	Steinsalz, hellgrau, feinkristallin, einzelne Streifen mit Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/022/022/04	98232	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	27.76	2.183	4	Steinsalz, hellgrau, feinkristallin, ein Überkorn einzelne Streifen mit Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/024/024/01	98233	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	29.55	2.184	3	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/024/024/04	98234	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	29.86	2.180	3	Steinsalz, grau, mittel- fein- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/024/024/06	98236	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	30.70	2.184	2	Steinsalz, grau, mittel- fein- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/025/025/05	98238	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	31.49	2.186	3	Steinsalz, grau, mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/025/025/06	98239	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	31.54	2.183	3	Steinsalz, grau, mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/027/027/01	98243	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	34.05	2.210	1	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/027/027/04	98302	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	34.24	2.187	3	Steinsalz, hellgrau, mittel- grobkristallin
GoEB1RB210/028/028/01	98244	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	35.55	2.185	2	Steinsalz, grau, mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/028/028/02	98245	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	35.80	2.184	2	Steinsalz, grau, mittel- gelegentlich grobkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/028/028/03	98246	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	36.04	2.186	4	Steinsalz, grau, mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/029/029/02	98248	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	37.30	2.189	4	Steinsalz, grau, mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, an oberer Mantelfläche Kristallausbrüche, Kristalleinregelung
GoEB1RB210/029/029/03	98249	z2HS3	Bohrtort 3, Q1-Ost, westl.	37.72	2.192	1	Steinsalz, grau, mittelkristallin, auf Bändern Anhydritflocken und -flatschen, Kristalleinregelung

- Anhang 1 -

Kernbezeichnung	FileNr	Stratig	Herkunft	Tiefe [m]	Dichte	BGRa	Probenbeschreibung
GoEB1RB213/003/003/02	99162	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	3.57	2.200	5	Steinsalz, mittelgrau - gläsern, grobkristallin - vereinzelt Überkorn, 3 mit Anhydritflocken und Linienresten verunreinigte Zonen, Einfallen 30°
GoEB1RB213/003/003/03	99163	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	3.89	2.177	5	Steinsalz, gläsern - mittelgrau, grobkristallin - vereinzelt Überkorn, 3 mit Anhydritflocken und Linienresten verunreinigte Zonen, Einfallen 25°
GoEB1RB213/003/003/04	99164	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	4.20	2.194	5	Steinsalz, schmutzgrau - gläsern, mitte- grob- partienweise feinkristallin, vereinzelt Überkorn, 2 mit Anhydritflocken und Linienresten verunreinigte Zonen, Einfallen 25°
GoEB1RB213/003/003/05	99165	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	4.36	2.203	5	Steinsalz, schmutzgrau - gläsern, mitte- grob- partienweise feinkristallin, vereinzelt Überkorn, 4 mit Anhydritflocken und Linienresten verunreinigte Zonen, Einfallen 25°
GoEB1RB213/011/011/01	99166	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	16.15	2.171	5	Steinsalz, milchiggraugläsern, grob- mittelkristallin, in Probenmitte eine schwach diffuse schwach anhydritisch verunreinigte Zone, Einfallen nicht eindeutig
GoEB1RB213/011/011/02	99167	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	16.31	2.177	5	Steinsalz, milchiggraugläsern, grob- mittelkristallin, eine zerrissene z.T. verfaltete Anhydritschnur, Einfallen 25°
GoEB1RB213/013/013/01	99168	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	18.34	2.192	6	Steinsalz, gläsern - schmutzgraugläsern, grob- mittelkristallin, partienw. Überkorn, in Probenmitte eine zerrissen-verfaltete Anhydritschnur, z.T. Anhydritbesteige auf Korngrenzen, Einfallen 15°
GoEB1RB213/013/013/02	99169	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	18.48	2.189	4	Steinsalz, schmutzgraugläsern, mittel- grob- partienweise feinkristallin - vereinzelt Überkorn, zwei Zonen mit Anhydritflocken und Anhydritlinienresten, Einfallen 0°
GoEB1RB213/013/013/04	99171	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	19.35	2.191	5	Steinsalz, schmutzgraugläsern, grob- mittelkristallin, eine mit Anhydritflocken und Anhydritlinienresten schmutzte Zone, Einfallen 25°
GoEB1RB213/013/013/05	99172	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	19.51	2.217	6	Steinsalz, schmutzgraugläsern, grob- mittelkristallin, eine mit Anhydritflocken und Anhydritlinienresten schmutzte Zone, Einfallen 25°
GoEB1RB213/022/022/01	99175	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	30.80	2.189	5	Steinsalz, schmutzgraugläsern, grob- gelegentlich mittelkristallin - partienweise Überkorn, 2 mit Anhydritflocken und Anhydritlinienresten schmutzte Zonen, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB213/024/024/01	99176	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	33.62	2.216	4	Steinsalz, schmutzgrau vereinzelt gläsern, grob- partienweise mittelkristallin - Überkorn, Probe von massiven Anhydritkristallen und Linienresten durchsetzt, Einfallen ca. 20°
GoEB1RB213/024/024/05	99178	z2HS2	Bohrort 3.2, Q1-Ost	34.36	2.226	5	Steinsalz, hell- mittelgrau undurchscheinend, mittel- grob- partienw. feinkristallin, Probe stark von massivem Anhydrit + anhydrit. Linienresten durchsetzt, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB341/006/006/01	99011	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	5.04	2.188	6	Steinsalz, grau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, mit regellos verteilten anhydrit. Flocken und Knäueln z.T. intern geschichtet, vereinzelt Haltaugen bis 6 cm Durchmesser, ohne Einfallen
GoEB1RB341/006/006/02	99012	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	5.20	2.190	5	Steinsalz, grau - hellgrau, fein- gelegentlich mittelkristallin, vereinzelt Überkorn 4 cm Durchmesser, mit regellos verteilten anhydrit. Knäueln z.T. intern geschichtet und Flocken, ohne Einfallen
GoEB1RB341/006/006/03	99013	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	5.42	2.198	6	Steinsalz, grau - hellgrau, fein- gelegentlich mittel- vereinzelt grobkristallin, mit regellos verteilten anhydritischen Knäueln z.T. intern geschichtet und Flocken, ohne erkennbares Einfallen

- Anhang 1 -

Kernbezeichnung	FileNr	Stratig	Herkunft	Tiefe [m]	Dichte	BGRa	Probenbeschreibung
GoEB1RB341/006/006/06	99091	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	5.96	2.204	6	Steinsalz, hellgrau fast undurchscheinend, mittel- vereinzelt grob- partienw. feinkrist., mit regellos verteilten Anhydritlinienresten, z. T. intern geschichtet + verknäult, ohne erkennb. Einfallen
GoEB1RB341/010/010/03	99092	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	11.08	2.195	6	Steinsalz, hellgrau fast undurchscheinend, mittel- vereinzelt grob- partienw. feinkrist., mit regellos verteilten Anhydritlinienresten, z. T. intern geschichtet + verknäult, ohne erkennb. Einfallen
GoEB1RB341/011/011/01	99014	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	12.67	2.210	6	Steinsalz, grau-hellgr., fein- gelegentl. mittel- vereinz. grobkrist., vereinz. Halitaugen bis 4 cm Durchm., mit regel. verteilt anhydrit. Knäueln z. T. intern geschicht. + Flocken, ohne erkennb. Einfallen
GoEB1RB341/011/011/02	99015	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	13.10	2.168	6	Steinsalz, grauweiß, mittel- fein- grobkristallin, mit unregelmäßig verteilten anhydritischen Knäueln, Einfallen 40°
GoEB1RB341/011/011/03	99016	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	13.35	2.175	5	Steinsalz, grauweiß, mittel- fein- grobkristallin, mit unregelmäßig verteilten anhydritischen Knäueln, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB341/013/013/02	99093	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	16.15	2.210	6	Steinsalz, hellgrau fast undurchscheinend, mittelkrist. - klastisch, partienw. feinkristallin, unregelmäßig verteilt Anhydritlinienreste z. T. mit Internschicht. + verknäult, ohne erkennb. Einfallen
GoEB1RB341/017/017/01	99018	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	21.74	2.209	6	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentl. grobkrist., durchsetzt von mehreren Halitaugen bis 5 cm Durchm., unregelmäßig verteilte anhydrit. Knäuel z. T. mit Internschichtung, ohne Einfallen
GoEB1RB341/017/017/02	99019	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	21.99	2.184	6	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentl. grobkrist., durchsetzt von mehreren Halitaugen bis 5 cm Durchm., unregelmäßig verteilte anhydrit. Knäuel z. T. mit Internschichtung, ohne Einfallen
GoEB1RB341/017/017/03	99020	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	22.38	2.198	7	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentl. grobkrist., durchsetzt von mehreren Halitaugen bis 5 cm Durchm., unregelmäßig verteilte anhydrit. Brocken+Knäuel z. T. Internschichtung, ohne Einfallen
GoEB1RB341/017/017/04	99021	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	22.60	2.197	6	Steinsalz, grau, fein- mittel- gelegentl. grobkrist., durchsetzt von mehreren Halitaugen bis 5 cm Durchm., unregelmäßig verteilte anhydrit. Knäuel z. T. mit Internschichtung, ohne Einfallen
GoEB1RB341/023/023/01	99022	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	30.02	2.187	8	Steinsalz, hellgrau- grau, fein- mittel- gelegentl. grobkristallin, ein Halitauge mit 10 cm Durchmesser, unregelmäßig verteilte anhydritische Brocken + Flocken, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB341/023/023/02	99023	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	30.24	2.179	6	Steinsalz, schmutziggeläsert, fein- mittel- gelegentl. grobkristallin, durchsetzt von Halitaugen, bis 5 cm Durchmesser, unregelmäßig verteilte anhydritische Knäuel z. T. Internschicht
GoEB1RB341/024/024/04	99025	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	32.00	2.195	8	Steinsalz, grau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, , unregelmäßig verteilte anhydritische Flocken und Knäuel z. T. mit Internschichtung, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB341/024/024/05	99026	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	32.50	2.206	6	Steinsalz, hellgrau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, , unregelmäßig verteilte anhydritische Flocken und Knäuel z. T. mit Internschichtung, ohne erkennbares Einfallen

- Anhang 1 -

Kernbezeichnung	FileNr	Stratig	Herkunft	Tiefe [m]	Dichte	BGRa	Probenbeschreibung
GoEB1RB341/024/024/06	99027	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	32.60	2.199	8	Steinsalz, grau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, , unregelmäßig verteilte anhydritische Flocken und Knäuel z. T. mit Internschichtung, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB342/014/014/01	99008	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	16.55	2.203	7	Steinsalz, grau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, mit regellos verteilten anhydritischen Brocken, Flocken und Knäueln z. T. intern geschichtet, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB342/014/014/02	99009	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	16.69	2.194	8	Steinsalz, grau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, mit regellos verteilten anhydritischen Flocken und Knäueln z. T. intern geschichtet, ohne erkennbares Einfallen
GoEB1RB342/014/014/03	99010	z2HS1	Bohrort 3.1, Q1-Ost	16.91	2.198	8	Steinsalz, grau, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, mit regellos verteilten anhydritischen Flocken und Knäueln z. T. intern geschichtet, ohne erkennbares Einfallen

- Anhang 1 -

Tab. 2: Ergebnisse aus triaxialen Kriechversuchen zur Ermittlung des Kriechvermögens und des Einsetzens von Dilatanz von Steinsalz (z2HS) aus den Bohrungen:

GoEB1RB119 - Bohrort 3 , Q-1 Ost ;

GoEB1RB210 - Bohrort 3 , Q-1 Ost ;

GoEB1RB341 - Bohrort 3.1, Q-1 Ost .

Kern- bezeichnung	File	Tiefe [m]	Strati- graphie	$\Delta\sigma$ [MPa]	p [MPa]	T [°C]	Stand	Bemerkung	BGRb
RB119	99179	537.50	z2HS3	16	12	40	1 Z2	nicht dilatant	6
				18	12	40		nicht dilatant	6
RB210	98224	12.74	z2HS2	20	12	40	2 D4	in stationär	-
				24	12	40		in stationär	-
				20	12	40		nicht dilatant	5
				20	8	40		nicht dilatant	5
				20	6	40		dilatant	5
				20	4	40		dilatant	5
				20	2	40		dilatant	6
				20	1	40		dilatant	6
				20	12	40		nicht dilatant	4
RB210	98225	14.22	z2HS2	18	20	50	3 Z3	in stationär	-
				20	20	50		nicht dilatant	5
				22	20	50		nicht dilatant	5
				20	20	50		nicht dilatant	4
				20	8	50		nicht dilatant	4
RB210	98237	31.28	z2HS3	20	20	30	4 Z1	in stationär	4
				20	10	30		nicht dilatant	3
				20	8	30		nicht dilatant	3
				20	6	30		dilatant	3
				20	4	30		dilatant	3
				20	2	30		dilatant	4
				20	1	30		dilatant	5
				20	0.5	30		dilatant	5
				20	0.5	30		Laugenzugabe	9
				20	2	30		dilatant	7
				20	4	30		dilatant	5
				20	6	30		dilatant	4
				20	8	30		nicht dilatant	4
				20	10	30		nicht dilatant	3
				20	4	30		dilatant	4
20	2	30	dilatant	6					
20	4	30	dilatant	5					

- Anhang 1 -

Kern- bezeichnung	File	Tiefe [m]	Strati- graphie	$\Delta\sigma$ [MPa]	p [MPa]	T [°C]	Stand	Bemerkung	BGRb
RB341	00071	6.21	z2HS1	20	20	31	5 D1	in stationär	-
				20	10	31		nicht dilatant	4
				20	8	31		nicht dilatant	3
				20	6	31		dilatant	3
				20	4	31		dilatant	4
				20	2	31		dilatant	4
				20	1	31		dilatant	4
				20	0.5	31		dilatant	4
				20	0.5	31		Laugenzugabe	9
				20	10	31		nicht dilatant	7
				20	2	31		dilatant	8
				20	4	31		dilatant	8
				20	6	31		dilatant	7
				20	8	31		nicht dilatant	7
				20	10	31		nicht dilatant	7
20	2	31	dilatant	9					
RB341	99017	13.51	z2HS1	20	12	42	6 D2	nicht dilatant	6
				24	12	42		nicht dilatant	7
				20	12	42		nicht dilatant	6
RB341	00072	19.37	z2HS1	20	20	31	7 D2	in stationär	-
				20	10	31		nicht dilatant	7
				20	8	31		nicht dilatant	7
				20	6	31		dilatant	7
				20	4	31		dilatant	7
				20	2	31		dilatant	7
				20	1	31		dilatant	7
				20	0.5	31		dilatant	7
				20	0.5	31		Laugenzugabe	10
				20	10	31		nicht dilatant	7
				20	2	31		dilatant	9
				20	4	31		dilatant	8
				20	6	31		dilatant	8
				20	8	31		nicht dilatant	8
				20	10	31		nicht dilatant	7
RB341	00073	23.06	z2HS1	20	20	30	8 Z2	nicht stationär	-
				20	10	30		nicht dilatant	8
				20	8	30		nicht dilatant	7
				20	6	30		dilatant	7
				20	4	30		dilatant	7
				20	2	30		dilatant	8
				20	1	30		dilatant	8
				20	20	30		nicht dilatant	6
				20	20	50		nicht dilatant	9
				20	10	50		nicht dilatant	9
				20	8	50		nicht dilatant	9
				20	6	50		dilatant	9
				20	4	50		dilatant	9
				20	2	50		dilatant	9
				20	1	50		dilatant	9
20	20	50	nicht dilatant	8					

- Anhang 1 -

Tab. 3: Prüfkörper aus der Bohrung GoEB1RB793 und deren Verwendung.

Kernbezeichnung	Bemerkung	Tiefe	File	Dichte	Probenbeschreibung
GoEB1RB793/003/02	Triax-Kriechen_D1 $\Delta\sigma = 20 \text{ MPa}$ ; $T = 30^\circ\text{C}$ ; $\epsilon \approx 15 \%$ $p: 20 \dots 0.5 \text{ MPa}$	2.32	11075	2.194	Steinsalz (z2HS1), mittelgrau undurchscheinend, fein- mittel- gelegentlich grobkristallin, vereinzelt Halitklasten, vereinzelt Anhydritknauern und -linienreste z.T. flockig, Einfallen 45°, Probe großflächig von Kohlenwasserstoffen durchsetzt
GoEB1RB793/003/04	Triax-Kriechen_D2 $\Delta\sigma = 20 \text{ MPa}$ ; $T = 30^\circ\text{C}$ ; $\epsilon \approx 15 \%$ $p: 20 \dots 0.5 \text{ MPa}$	2.83	11076	2.186	Steinsalz (z2HS1), mittelgrau fast undurchscheinend, fein- gelegentlich mittel- grobkristallin, vereinzelt verstellte Halitklasten, unregelmäßig verteilte Anhydritknauern und -flockenbündel sowie anhydritische Säume an Klasten, ohne erkennbares Einfallen; eine verwürgte mit Kohlenwasserstoffen durchtränkte Zone z.T. zerrissen
GoEB1RB793/003/05	Triax-Kriechen_D3 $\Delta\sigma = 20 \text{ MPa}$ ; $T = 30^\circ\text{C}$ ; $\epsilon \approx 15 \%$ $p: 20 \dots 0.5 \text{ MPa}$	3.28	11077	2.184	Steinsalz (z2HS1), mittelgrau, fein- partienweise mittel- gelegentlich grobkristallin, vereinzelt Halitklasten, Anhydritflockenstreifen, Einfallen 35°, Probe häufig vertikal mit Kohlenwasserstoffen durchtränkt
GoEB1RB793/004/03	Triax-Kriechen_Z5 Poro-Perm	4.53	11078	2.185	Steinsalz (z2HS1), mittelgrau, fein- partienweise mittel- gelegentlich grobkristallin, vereinzelt Halitklasten, Anhydritflockenstreifen und vereinzelt Knauern, Einfallen 35°, Probe ganz mit Kohlenwasserstoffen durchtränkt
GoEB1RB793/004/06	für therm. Dehnung genutzt	4.88	11079	2.205	Steinsalz (z2HS1) mittelgrau fast undurchscheinend, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, vereinzelt Halitklasten, unregelmäßig verteilte Anhydritlinien- reste z.T. flockig, ohne erkennbares Einfallen; Probe stark mit Kohlenwasserstoffen durchsetzt
GoEB1RB793/005/02	für therm. Dehnung genutzt; Wasser-Austritt	5.26	11080	2.216	Steinsalz (z2HS1), mittelgrau fast undurchscheinend, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, vereinzelt Halitklasten, unregelmäßig verteilte Anhydritlinien- reste z.T. flockig, ohne erkennbares Einfallen; Probe stark mit Kohlenwasserstoffen durchsetzt
GoEB1RB793/005/03	Triax-Kriechen_D4 $\Delta\sigma = 20 \text{ MPa}$ ; $T = 30^\circ\text{C}$ ; $\epsilon \approx 15 \%$ $p: 20 \dots 0.5 \text{ MPa}$	5.61	11081	2.190	Steinsalz (z2HS1), mittelgrau fast undurchscheinend, fein- mittel- vereinzelt grobkristallin, vereinzelt Halitklasten, unregelmäßig verteilte Anhydritlinienreste z.T. flockig, Einfallen 30°, Probe stark mit Kohlenwasserstoffen durchsetzt
<b>Aus den Bohrkern-Abschnitten wurden Prüfkörper mit Standard-Abmessungen hergestellt: Do = 100 mm; Lo = 250 mm</b>					

## Anhang 2:

### Abbildungen

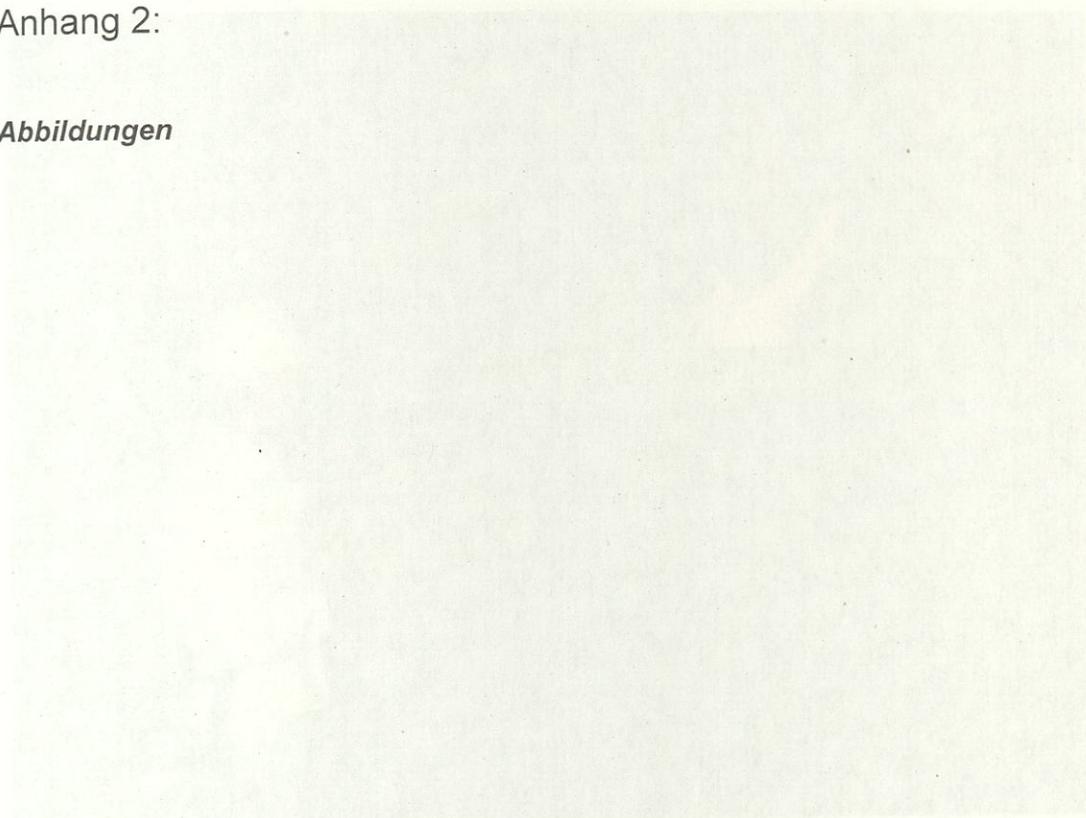


Abbildung 1: Versuchsreihe KW-Ausbreitungsphase von BGS. Im Röhren mit Tropfen- und Schaumbildung durch  
eine hochdruck KW längs Bohrloch. Salzpartikel in der Auflockerungszone der Fließzone  
(Chemnitz 7. April)

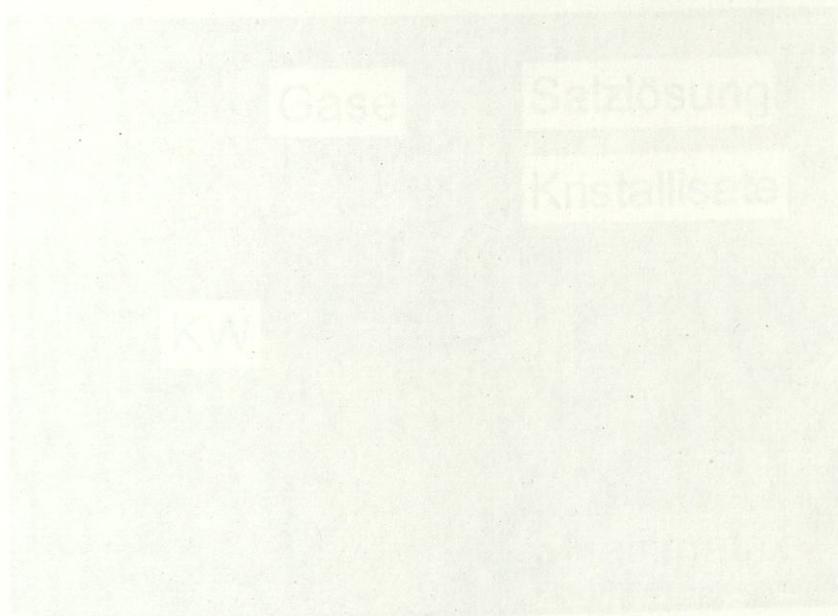


Abbildung 2: Jenseits der Auflockerungszone sind die KW Einschlüsse wasser- bzw. netz-fähig mit Hauptanteil  
eingeschlossen, zum geringen Teil auch wie in der Abbildung eingeschleift. Die Einschlüsse ent-  
halten in der Regel Salzlösung und Gas unterschiedlicher Zusammensetzung sowie in der Regel an  
Salzige bis keine KW-Verbindungen. Die KW Einschlüsse sind eingekapselt und voneinander isoliert  
sowie durch Trennhaut aus Hydrogelen (1996) (siehe auch Teil-Pore-BGS-Logbuch)

- Anhang 2 -



Abb. 1: Verschmierte KW-Austrittsstelle am Stoß. Im Bohrloch mit Tropfen- und Saumbildung durch nicht-flüchtige KW längs bevorzugter Wegsamkeiten in der Auflockerungszone des Hauptsalzes (Querschlag 1 West)

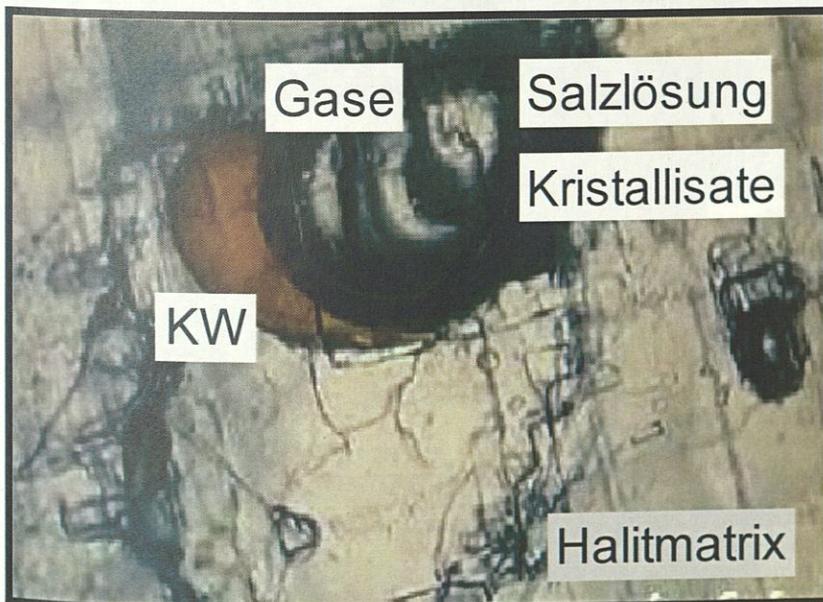


Abb. 2: Jenseits der Auflockerungszone sind die KW-Einschlüsse saum- bzw. netz-förmig auf Korngrenzen eingeschlossen, zum geringen Teil auch wie in der Abbildung intrakristallin. Die Einschlüsse enthalten in der Regel Salzlösung und Gas unterschiedlicher Zusammensetzung sowie (untergeordnet) flüssige bis feste KW-Verbindungen. Die KW-Einschlüsse sind eingeformt und voneinander isoliert angeordnet. Standbild aus HERRMANN (1996) mit Dank an TILL POPP (IfG, Leipzig)

- Anhang 2 -



Abb. 3: Verteilung von KW-Einschlüssen in einem Dickschliff (Durchlicht, UV-Licht), Gorleben-Steinsalz, Handstück aus Querschlag 1 West, z2HS1 (POPP et al. 2002)

- Anhang 2 -

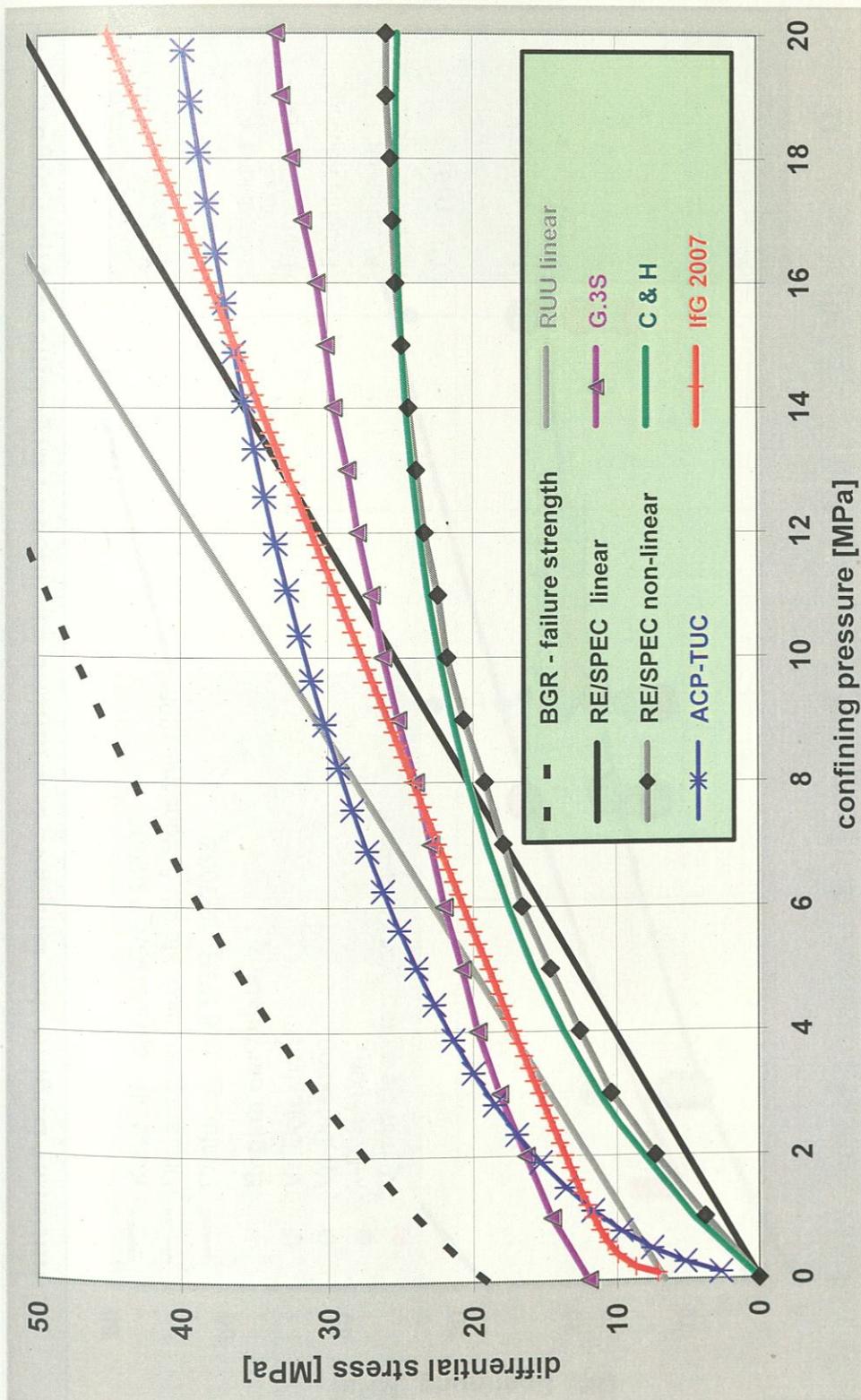


Abb. 4: Zusammenstellung verschiedener Formulierungen für die Dilatanzgrenze zum Lastpfad „Kompression“ (SCHULZE 2007)

- Anhang 2 -

Ermittelter Beginn der Dilatanz & ähnliche Einflüsse : Ergebnisse und Folgen

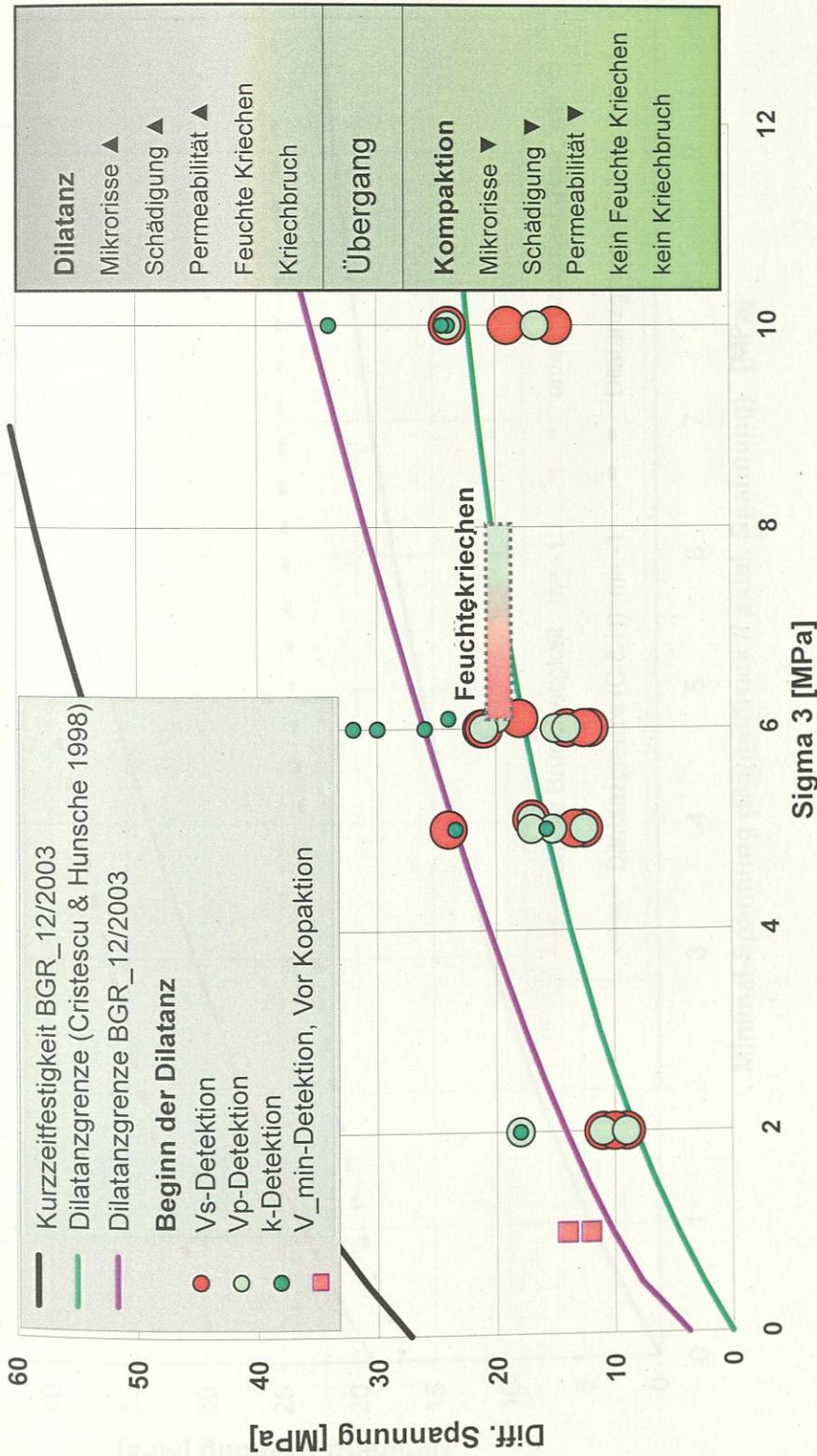


Abb. 5: Kurzeit-Bruchgrenze und Dilatanzgrenzen (Gl. 2) und (Gl. 3) mit Darstellung der Ergebnisse aus verschiedenen Detektionsverfahren (SCHULZE 2007)

- Anhang 2 -

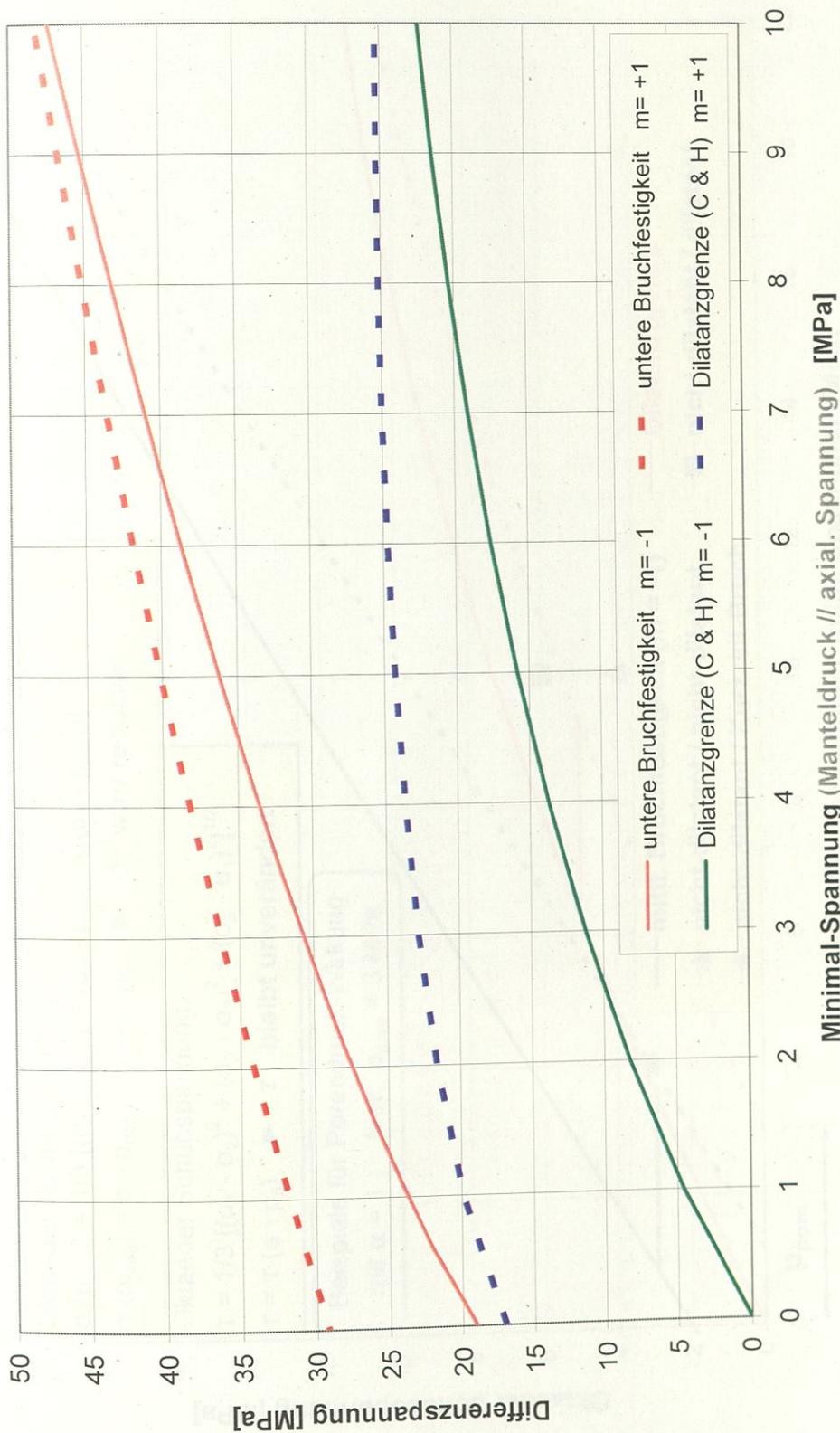


Abb. 6: Vergleich der Bruchfestigkeit und der Dilatanzgrenze (Gl. 3) in der  $\Delta\sigma = f(\sigma_{min})$ -Darstellung für Kompression (Lastpfad m = -1) und Extension (Lastpfad m = +1)

- Anhang 2 -

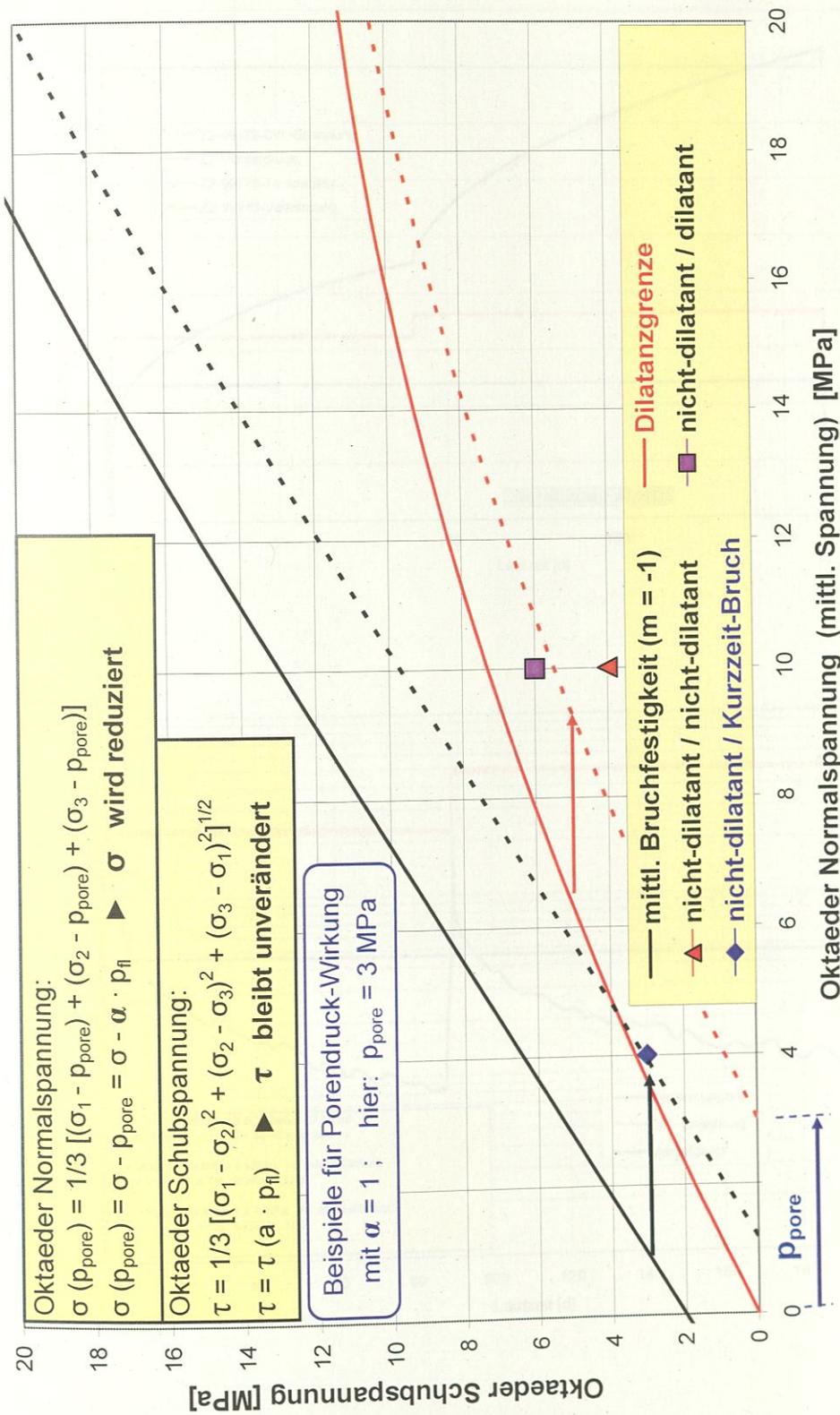
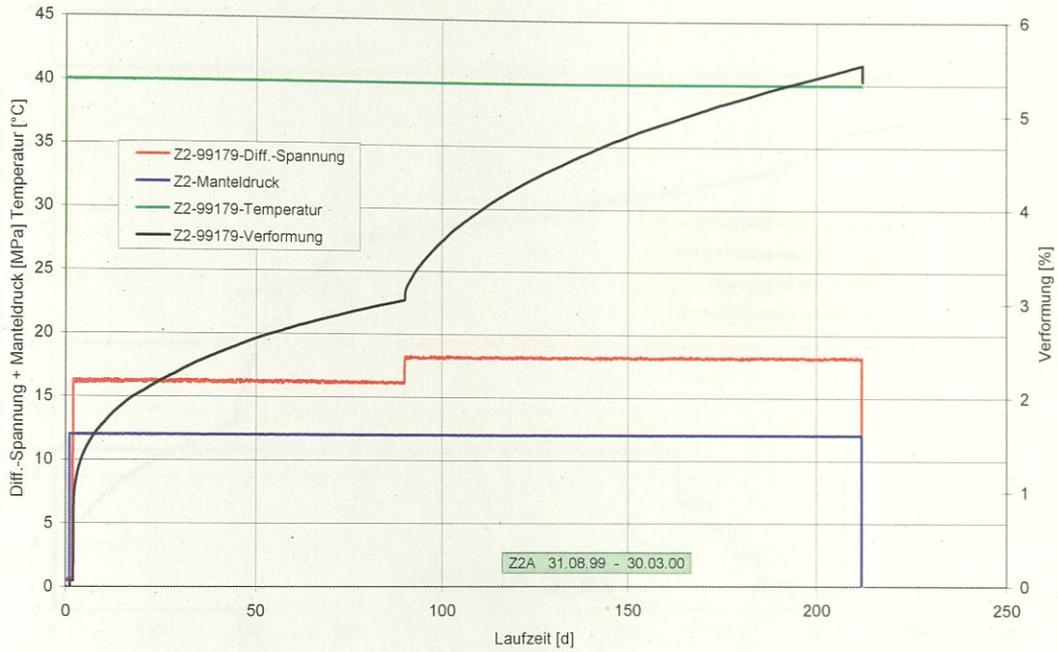
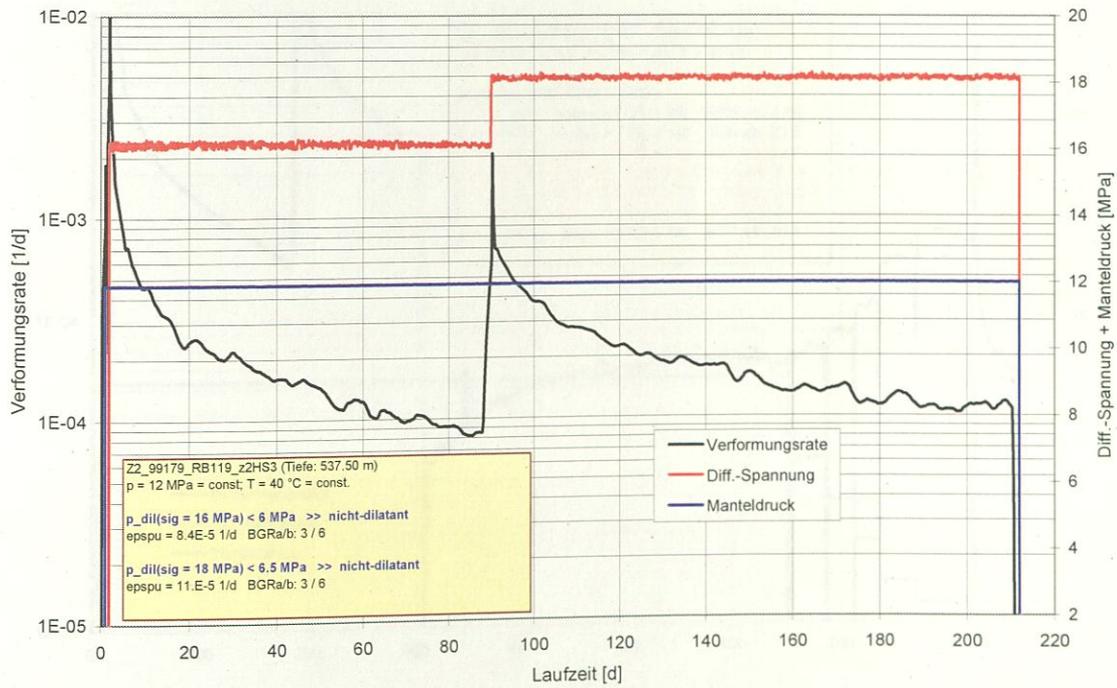


Abb. 7: Verschiebung eines Spannungszustands bei Porendruck-Wirkung relativ zur Kurzzeit-Bruchgrenze und zur Dilatanzgrenze (Gl. 3)

- Anhang 2 -



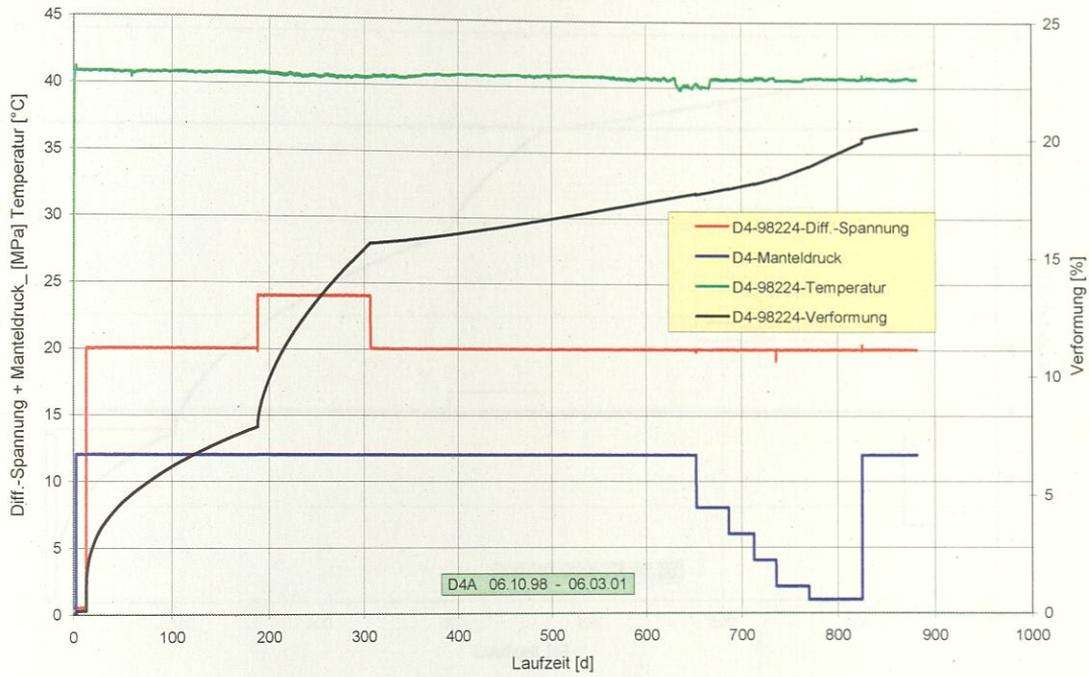
(a)



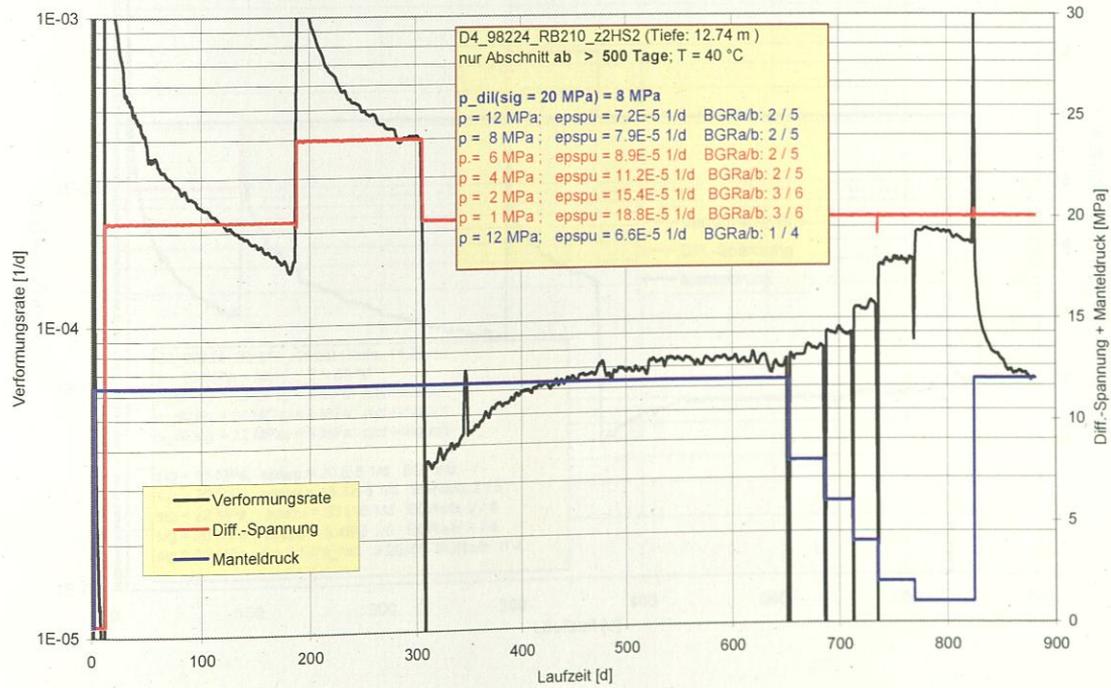
(b)

Abb. 8: Triaxial-Kriechversuch (99179) an z2HS3-Steinsalz aus RB119, (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



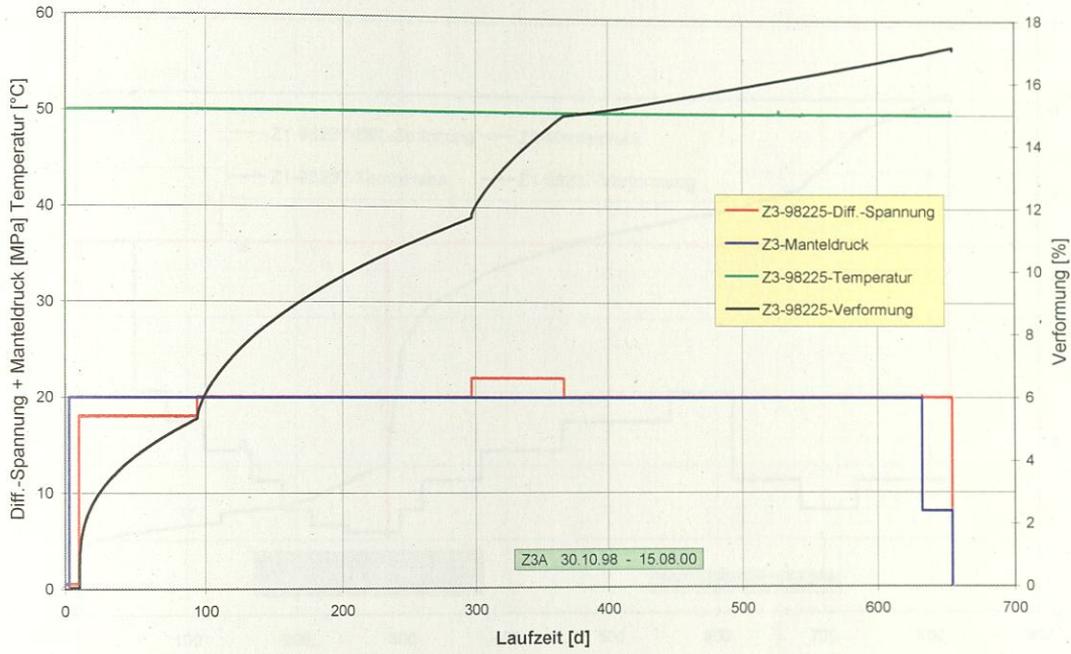
(a)



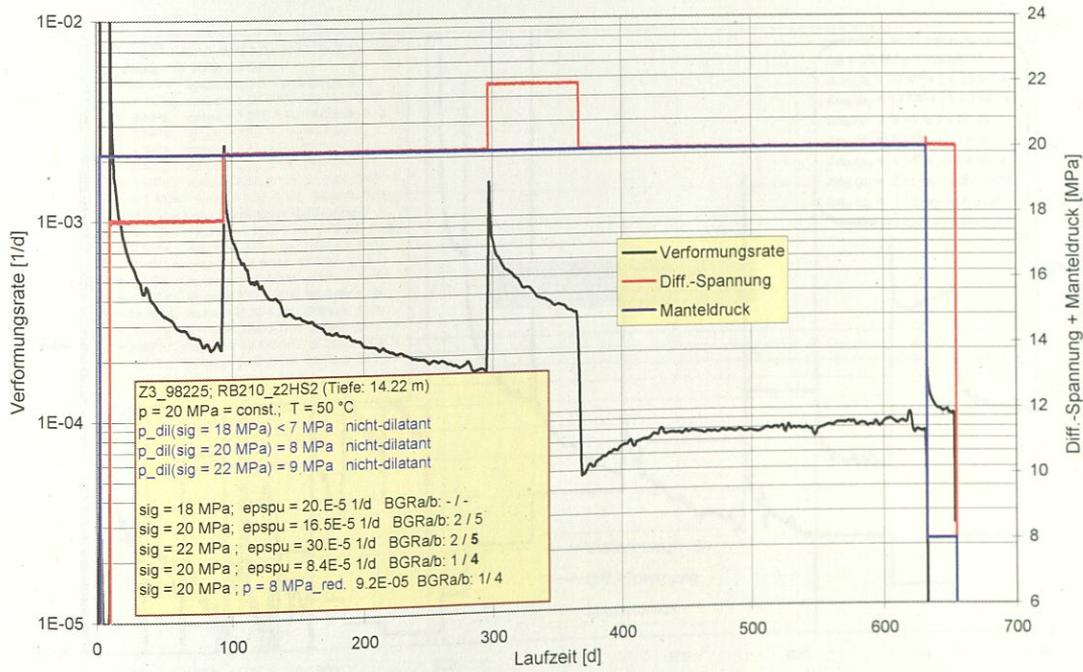
(b)

Abb. 9: Triaxial-Kriechversuch (98224) an z2HS2-Steinsalz aus RB210 (12,74 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



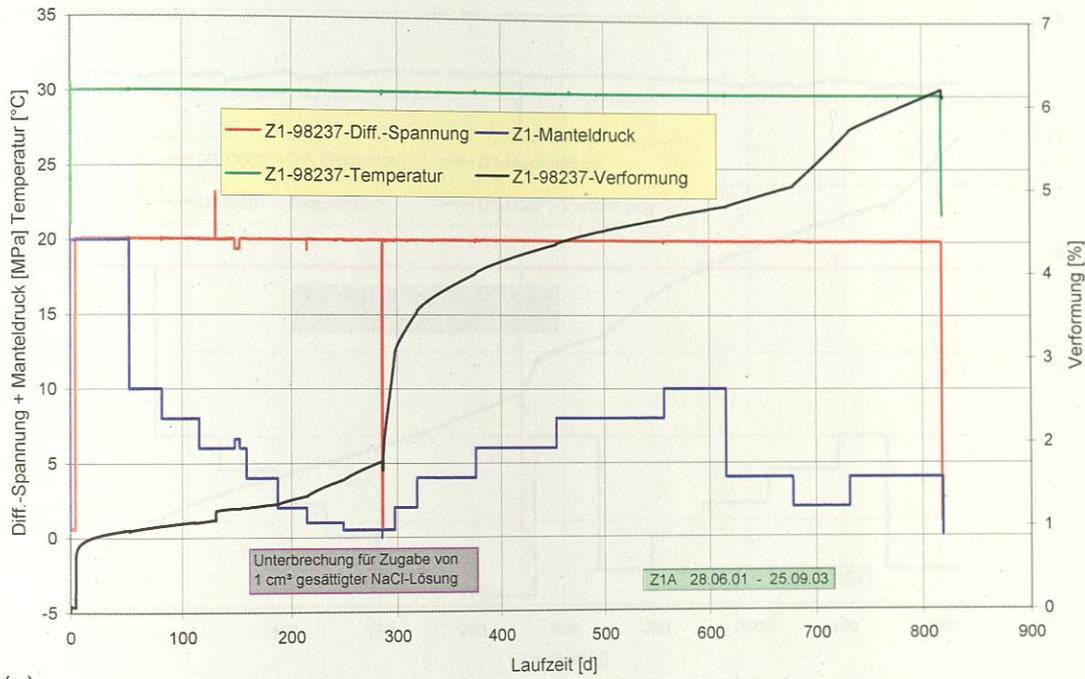
(a)



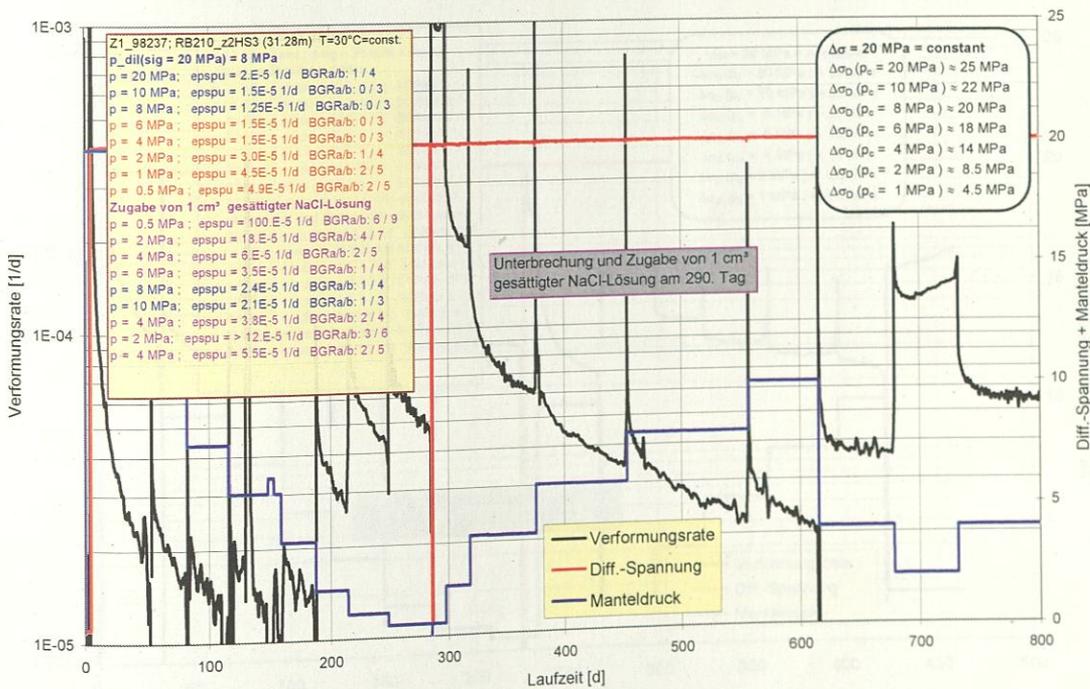
(b)

Abb. 10: Triaxial-Kriechversuch (98225) an z2HS2-Steinsalz aus RB210 (14,22 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



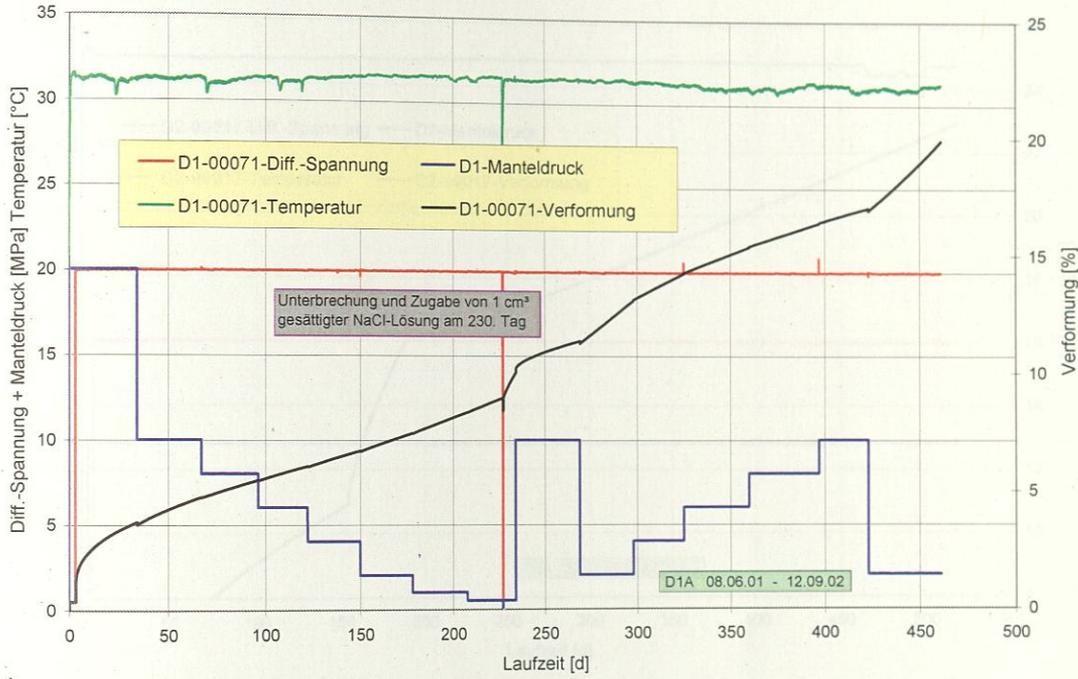
(a)



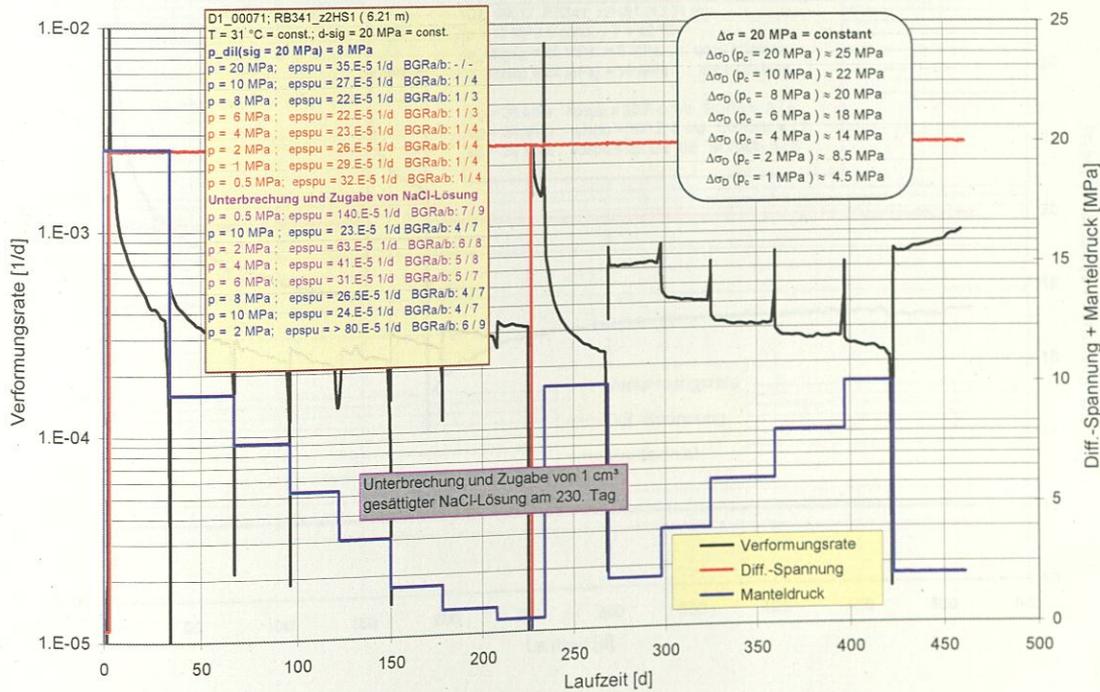
(b)

Abb. 11: Triaxial-Kriechversuch (98237) an zHS3-Steinsalz aus RB210 (31,28 m), (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



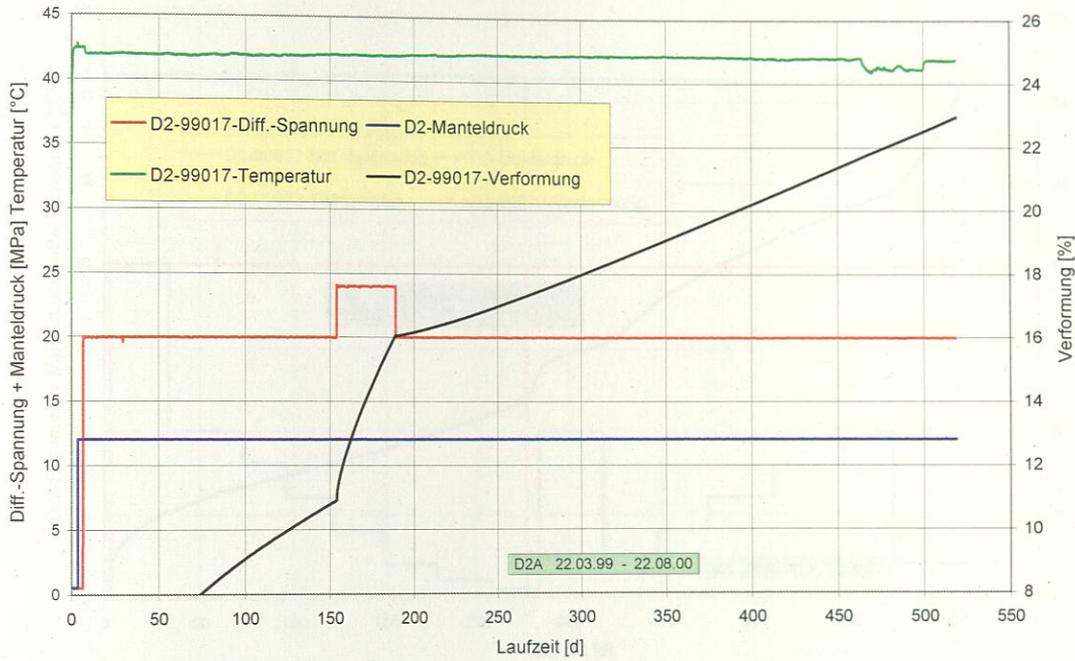
(a)



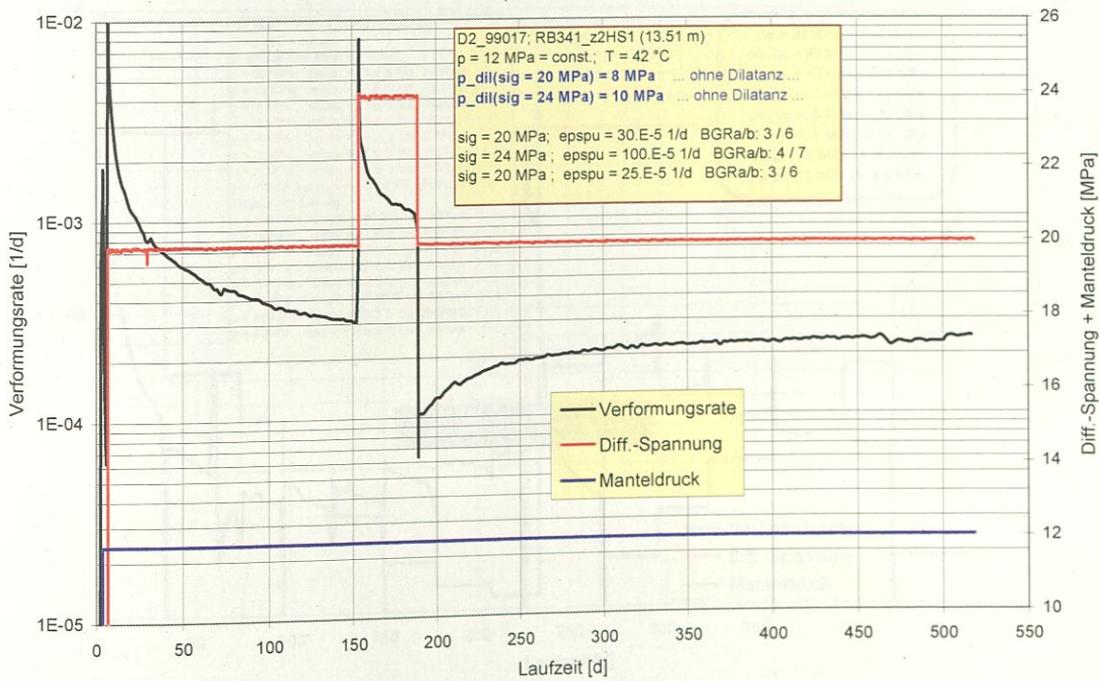
(b)

Abb. 12: Triaxial-Kriechversuch (00071) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (6,21 m); Zugabe von NaCl-Lösung (< 1 cm³) am 230-ten Versuchstag. (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



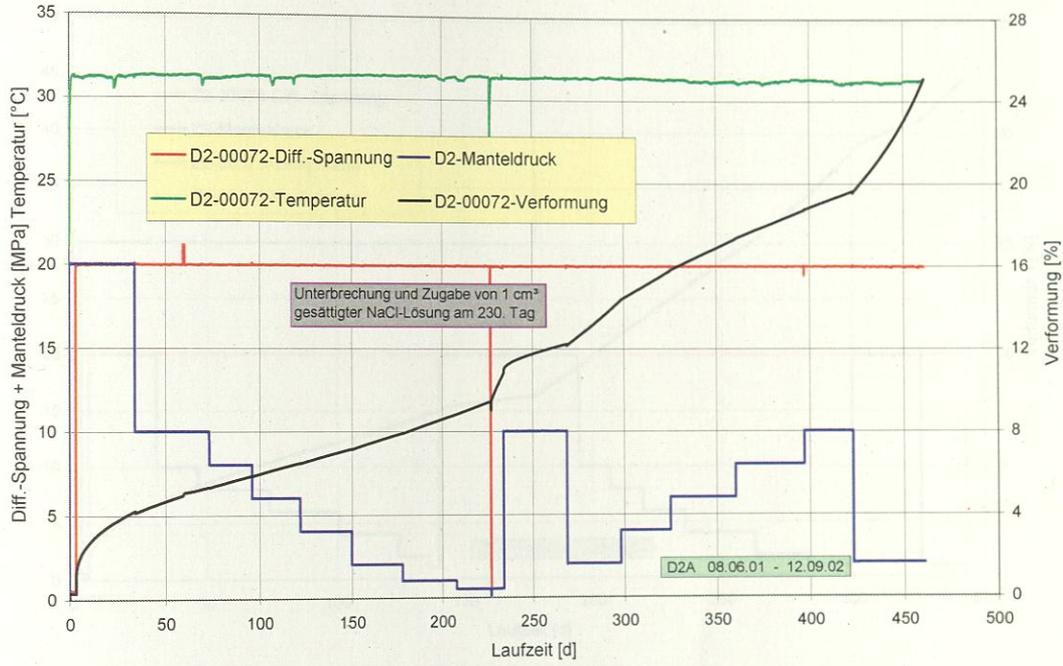
(a)



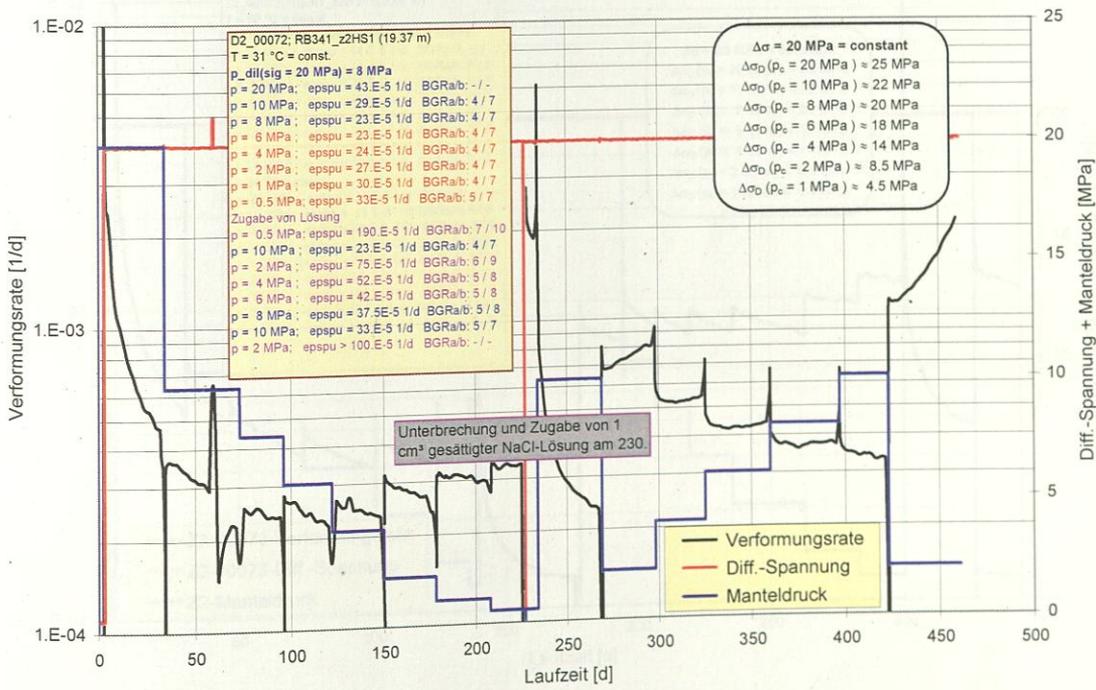
(b)

Abb. 13: Triaxial-Kriechversuch (99017) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (13,51 m), (a) Verformung;  
(b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



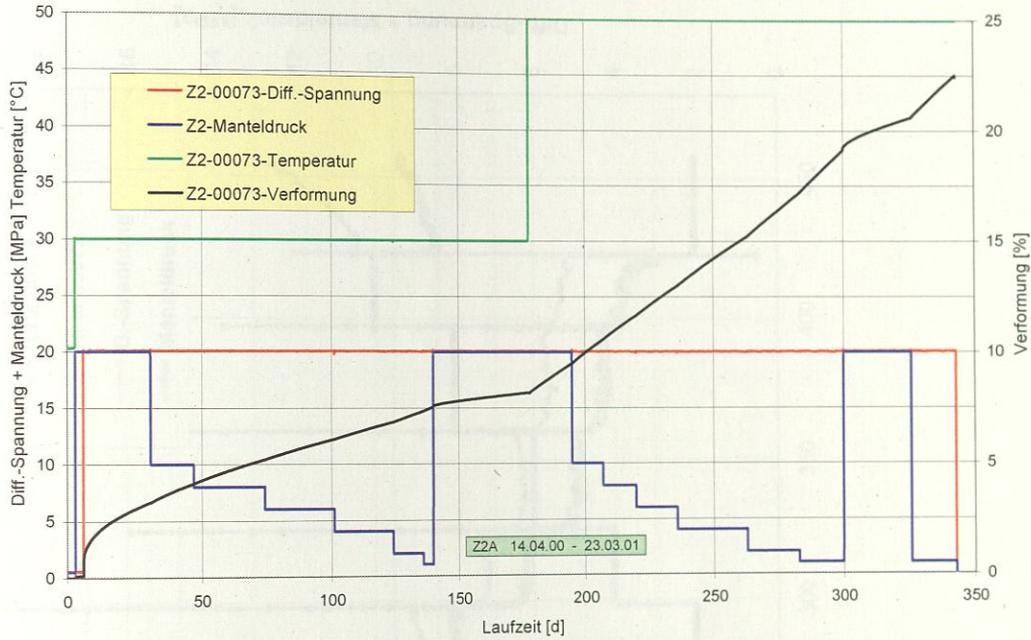
(a)



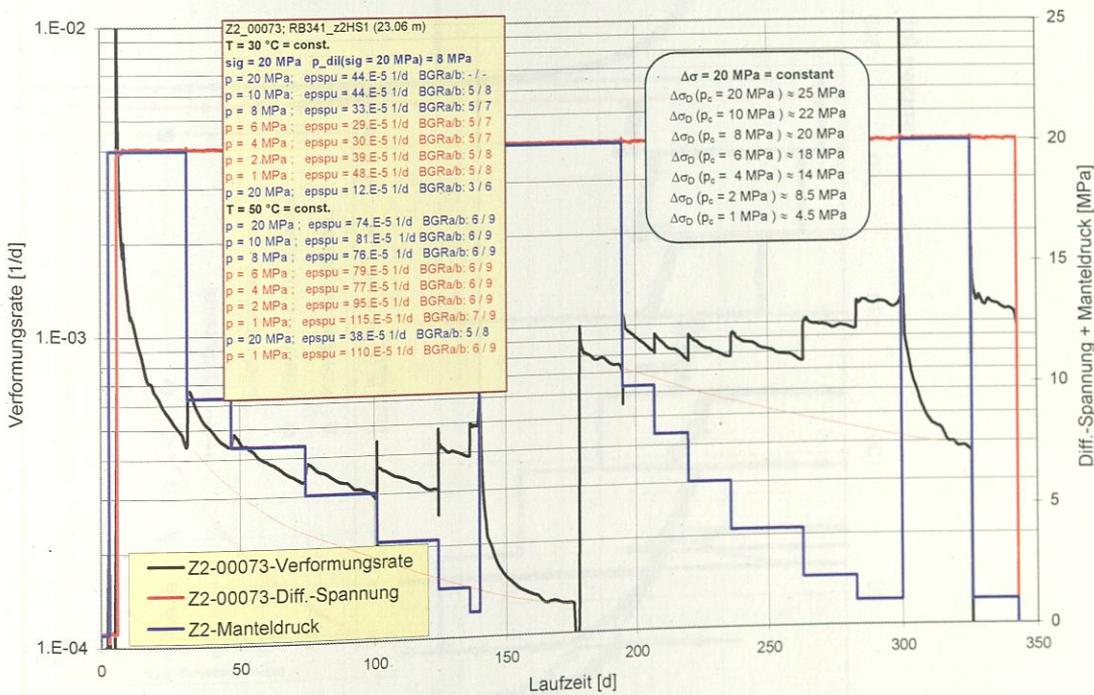
(b)

Abb. 14: Triaxial-Kriechversuch (00072) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (19,37 m); Zugabe von NaCl-Lösung (< 1 cm³) am 230-ten Versuchstag, (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -



(a)



(b)

Abb. 15: Triaxial-Kriechversuch (00073) an z2HS1-Steinsalz aus RB341 (23,06 m) mit Temperatur-Wechsel (30°C > 50°C), (a) Verformung; (b) Verformungsrate

- Anhang 2 -

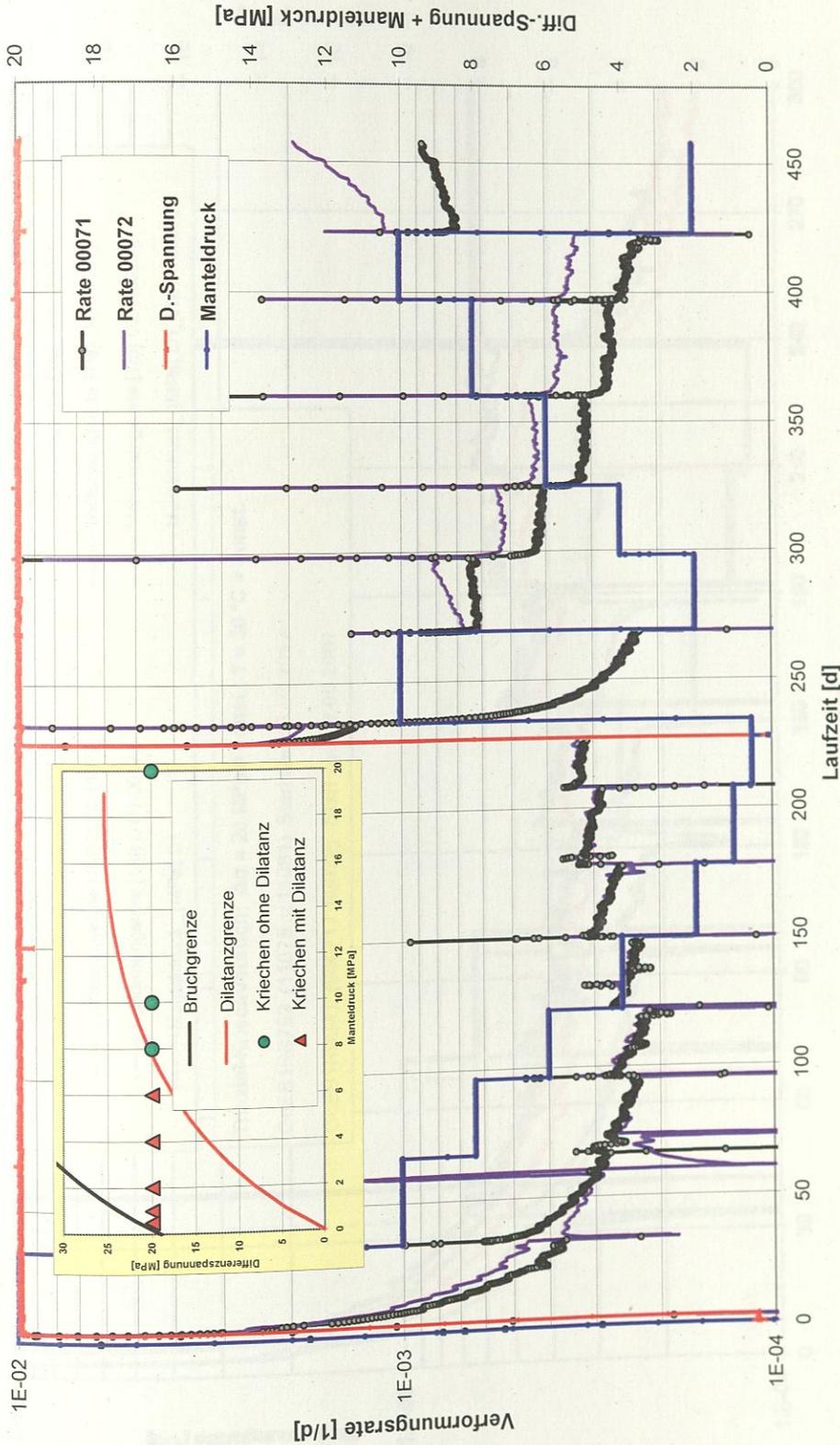


Abb. 16: Triaxial-Kriechversuche aus Abb. 12 und Abb. 14; mit und ohne Dilatanz-Wirkung, Zugabe von NaCl-Lösung am 230-ten Tag.

- Anhang 2 -

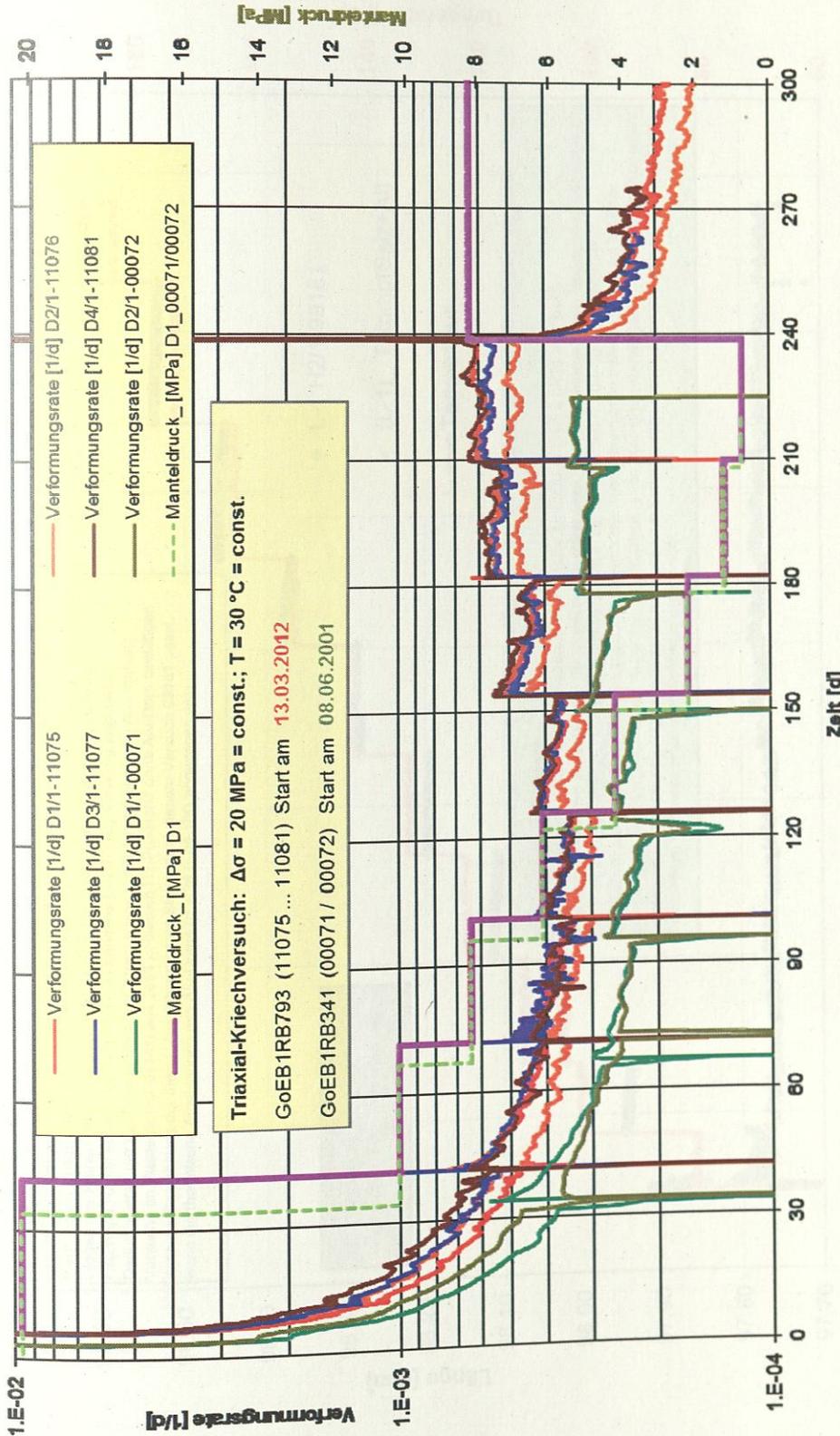


Abb. 17: Triaxial-Kriechversuche aus Abb. 16, erster Versuchsabschnitt vor der Unterbrechung zwecks Zugabe von NaCl-Lösung, im Vergleich mit dem Kriech-Verhalten der vier Prüfkörper aus der Bohrung GoEB1RB793 (vgl. Tab. 3)

- Anhang 2 -

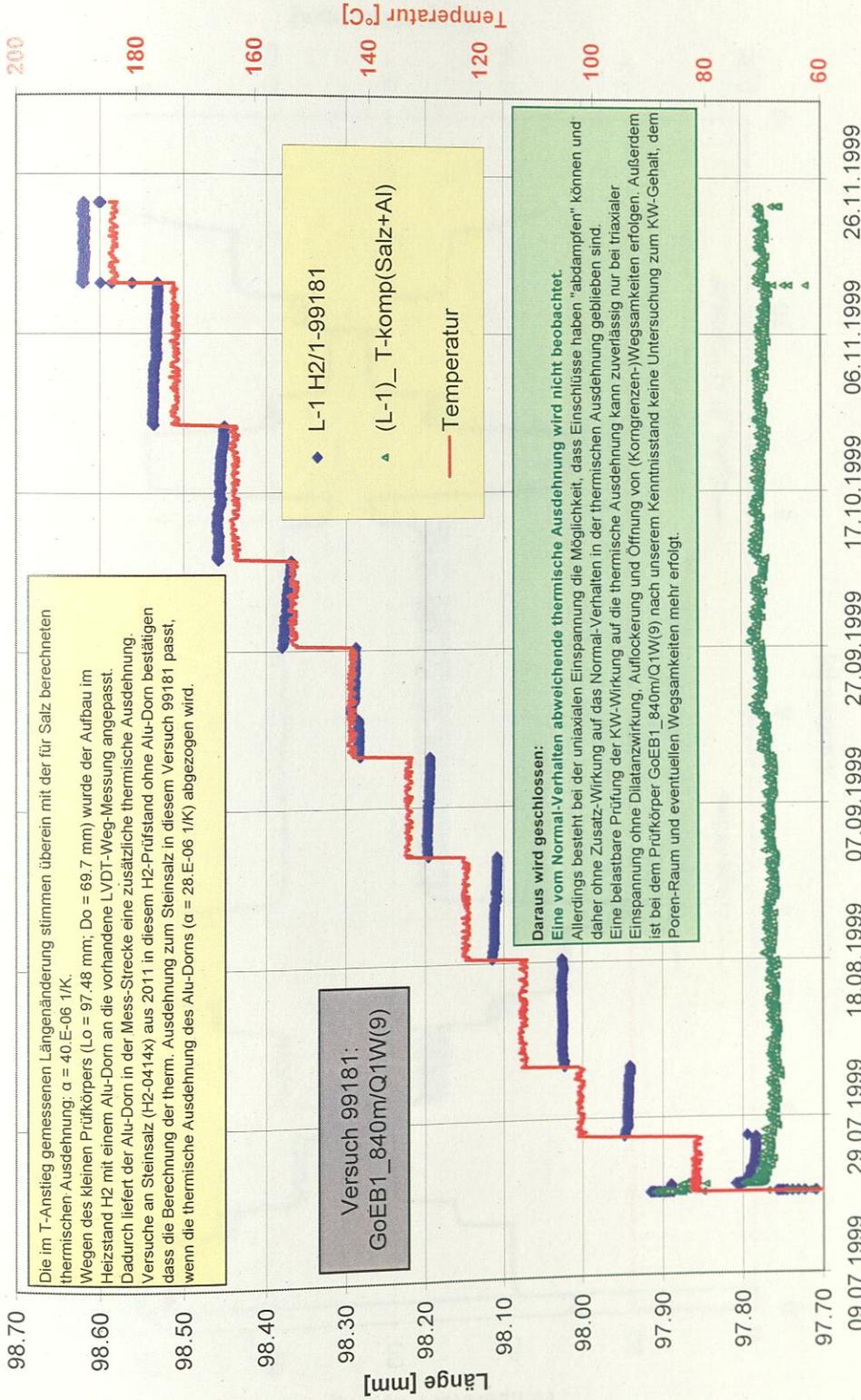


Abb. 18: Prüfkörper 99181 (uniaxial belastet) - Thermische Ausdehnung bei Temperatur-Erhöhung und deren Berechnung

- Anhang 2 -

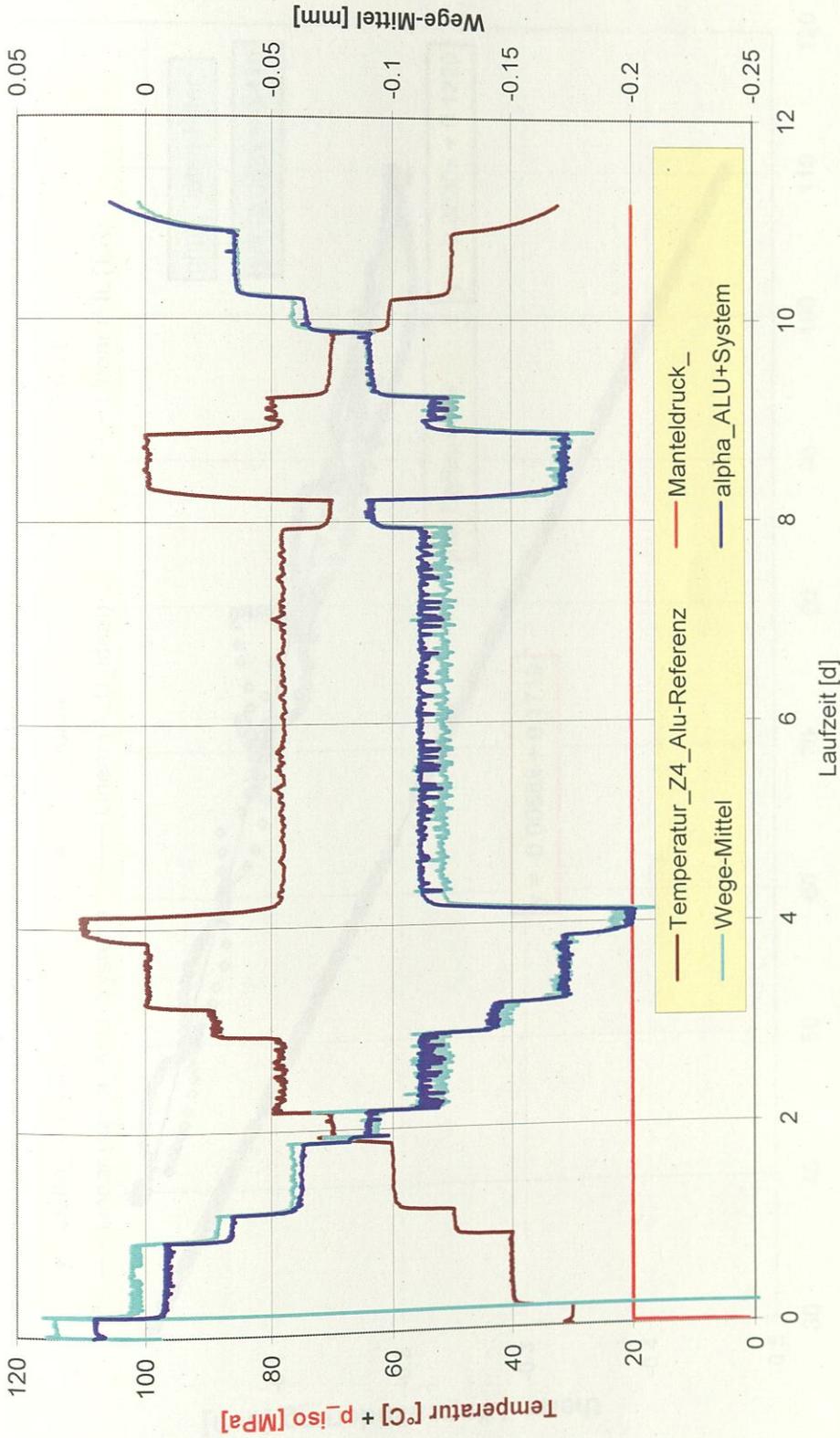


Abb. 19: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 20 \text{ MPa}$ ) an einem Aluminium-Prüfkörper als Referenz zum Kalibrieren der Mess-Strecke. Der Graph „alpha\_ALU+System“ folgt aus der ermittelten Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System.

- Anhang 2 -

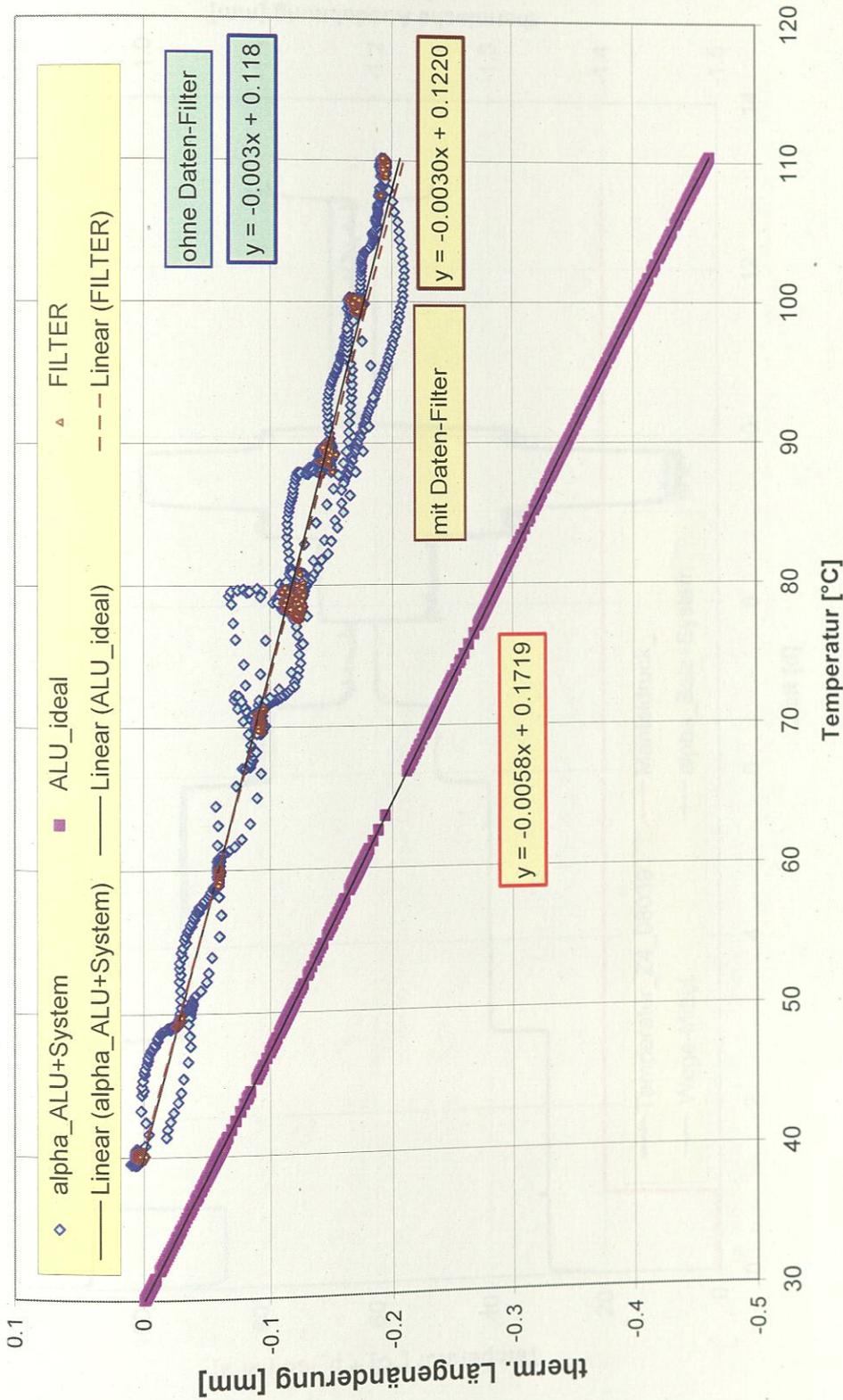


Abb. 20: Lineare Anpassung zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit an die Ideal-Kurve für Aluminium und an die Messwerte für das Gesamt-System. Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt

- Anhang 2 -

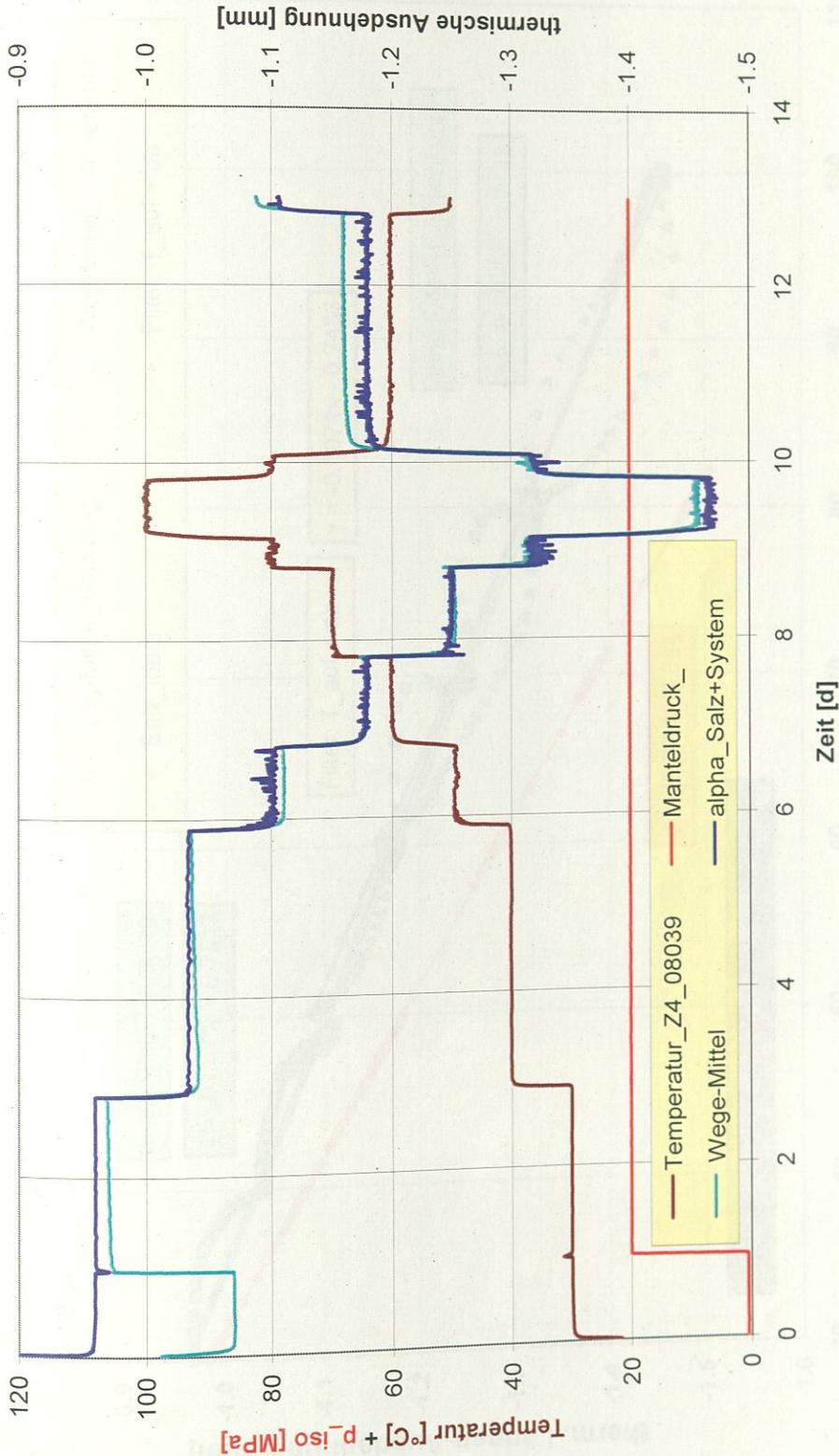


Abb. 21: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 20 \text{ MPa}$ ) am Steinsalz-Prüfkörper Asse-Speisesalz, z2SP, File: 08039, als Referenz zum Kalibrieren der Mess-Strecke. Der Graph „alpha\_Salz+System“ folgt aus der ermittelten Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System

- Anhang 2 -

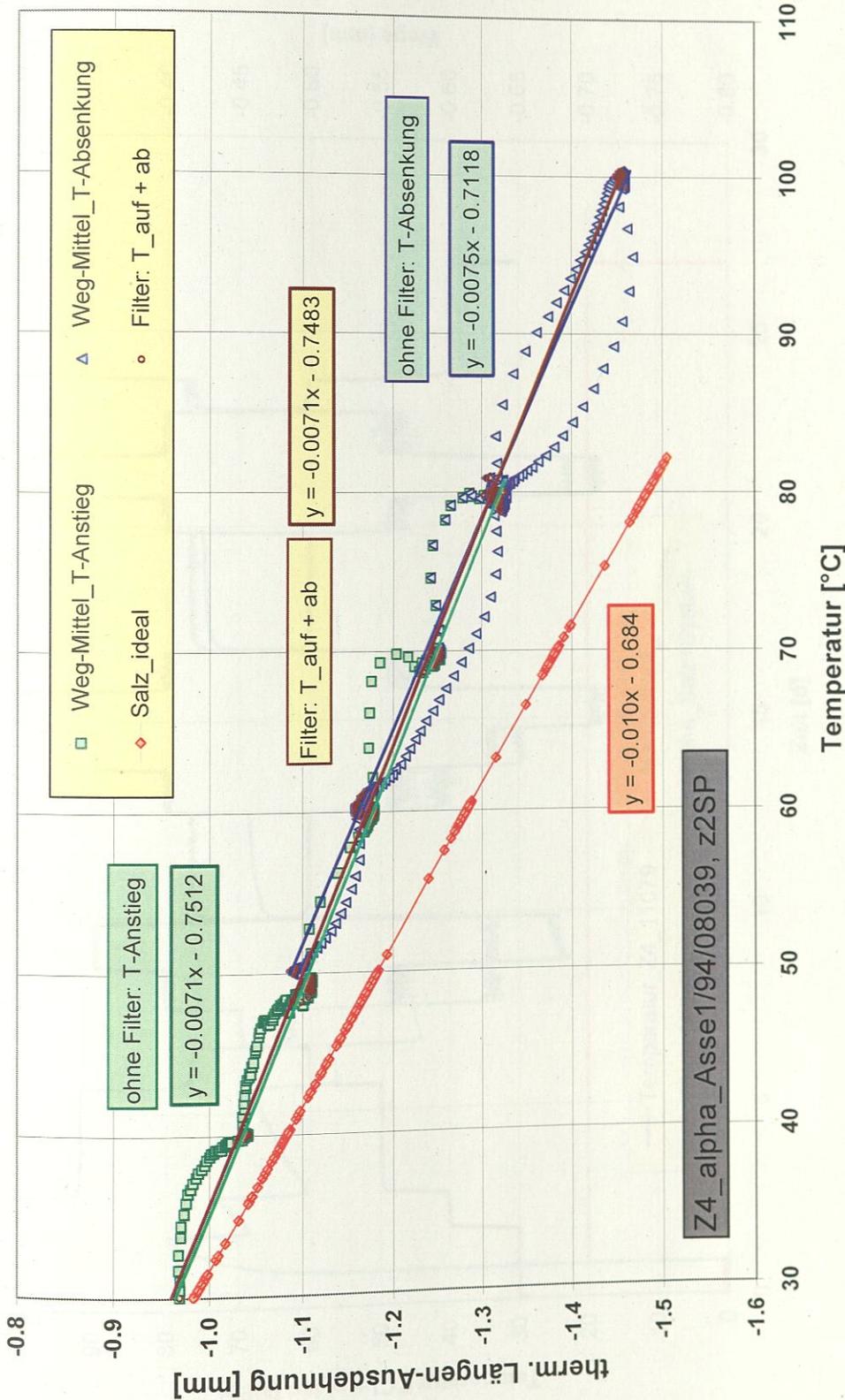


Abb. 22: Lineare Anpassung zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit an die Ideal-Kurve für den Steinsalz-Prüfkörper (08039) und an die Messwerte für das Gesamt-System. Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung trifft für alle Phasen (auf + ab) im Temperatur-Programm zu

- Anhang 2 -

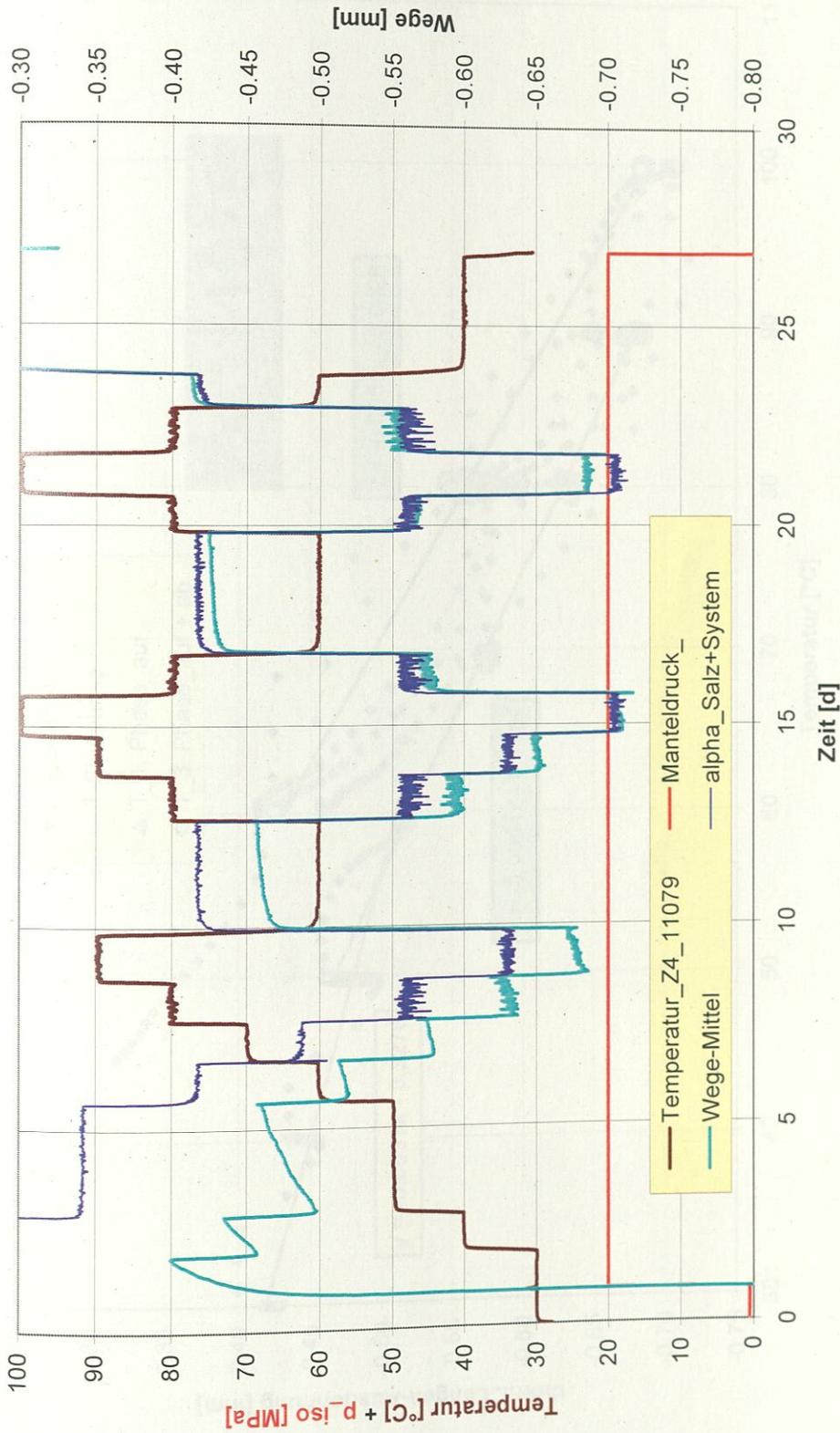


Abb. 23: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 2 \text{ MPa}$ ) am Steinsalz-Prüfkörper GoEB1RB793/004/06, z2HS1; File: 11079. Der Graph „alpha\_Salz+System“ folgt aus der Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System

- Anhang 2 -

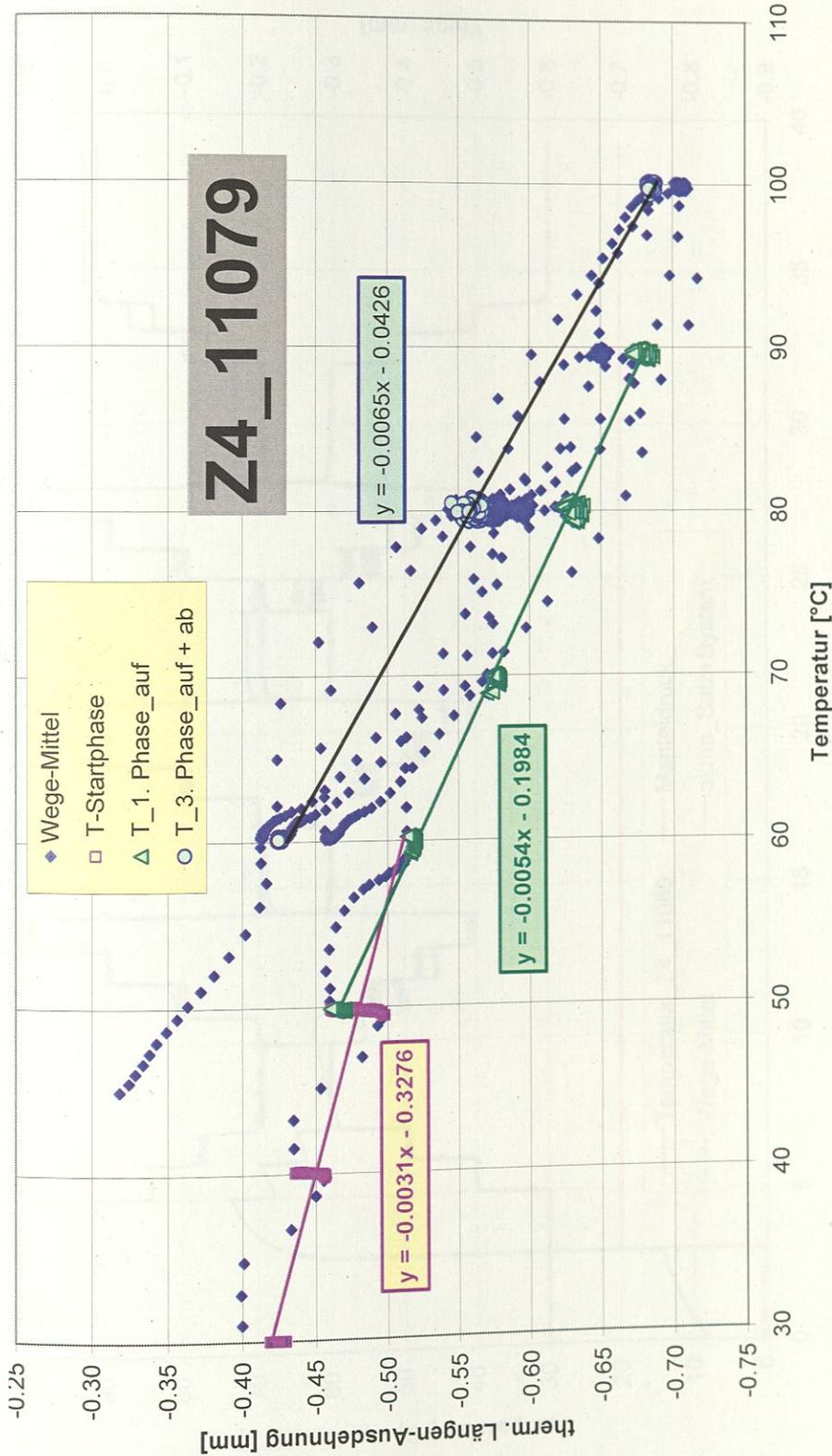


Abb. 24: Lineare Anpassung der Messwerte für das Gesamt-System zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit für den Steinsalz-Prüfkörper (11079). Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung erreicht asymptotisch erst im dritten Zyklus des Temperatur-Programms den stabilen Endwert

- Anhang 2 -

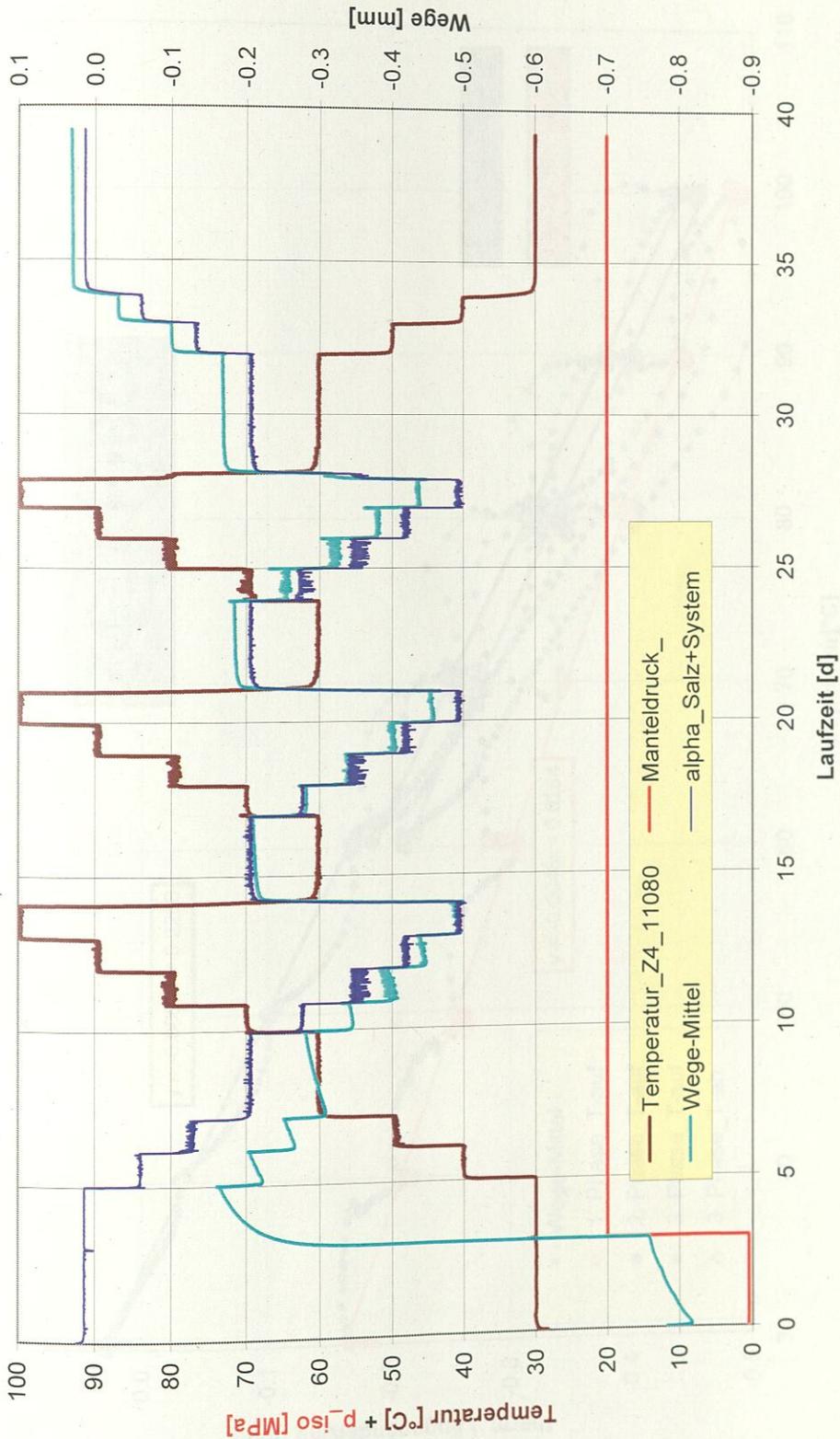


Abb. 25: Messung der thermisch induzierten Längenänderung bei isostatischer Einspannung ( $p_{iso} = 20 \text{ MPa}$ ) am Steinsalz-Prüfkörper GoEB1RB793/005/02, z2HS1; File: 11080. Der Graph „alpha\_Salz+System“ folgt aus der Temperaturempfindlichkeit von Prüfkörper und Mess-System

- Anhang 2 -

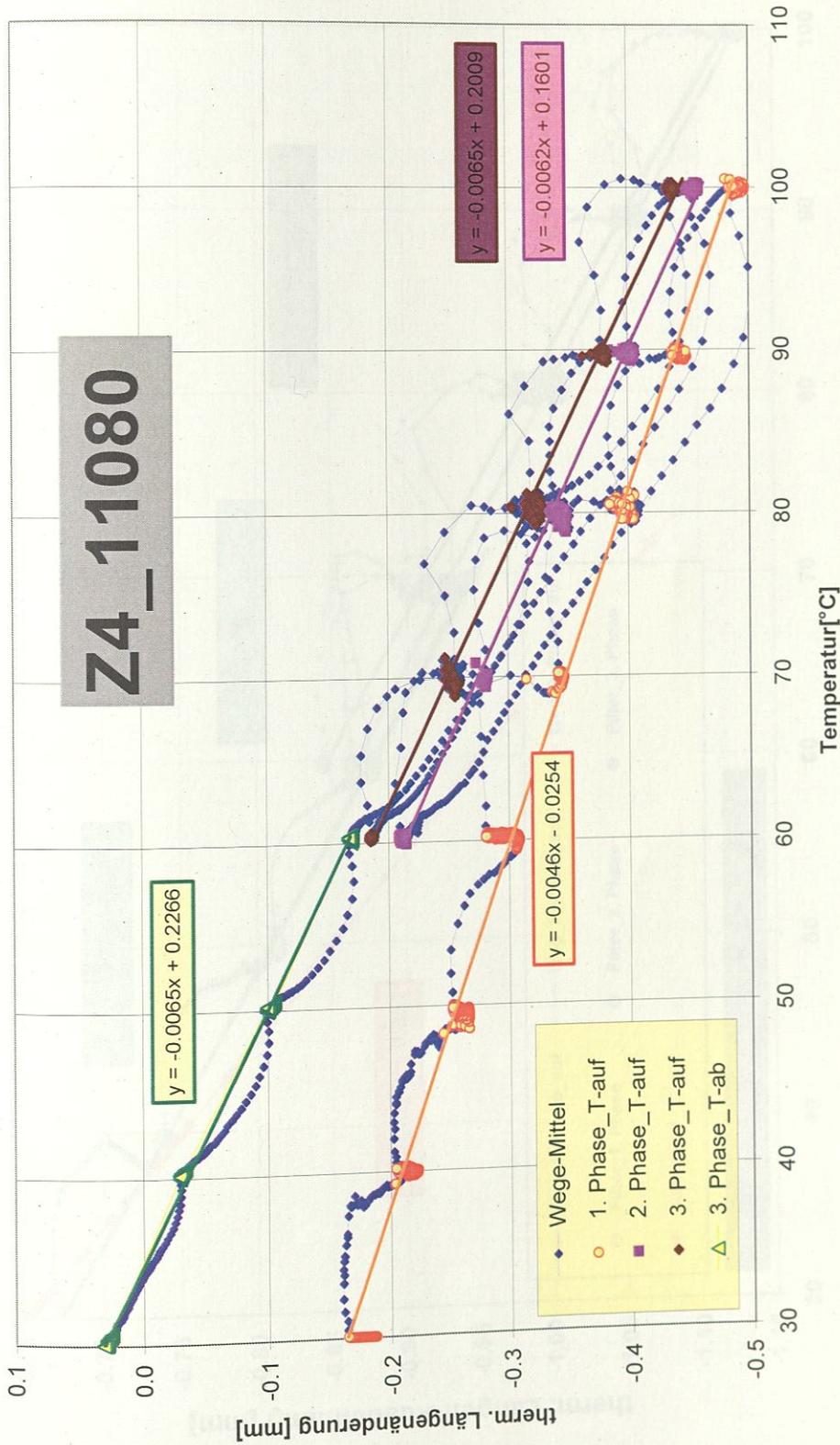


Abb. 26: Lineare Anpassung der Messwerte für das Gesamt-System zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit für den Steinsalz-Prüfkörper (11079). Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung erreicht asymptotisch erst im dritten Zyklus des Temperatur-Programms den stabilen Endwert

- Anhang 2 -

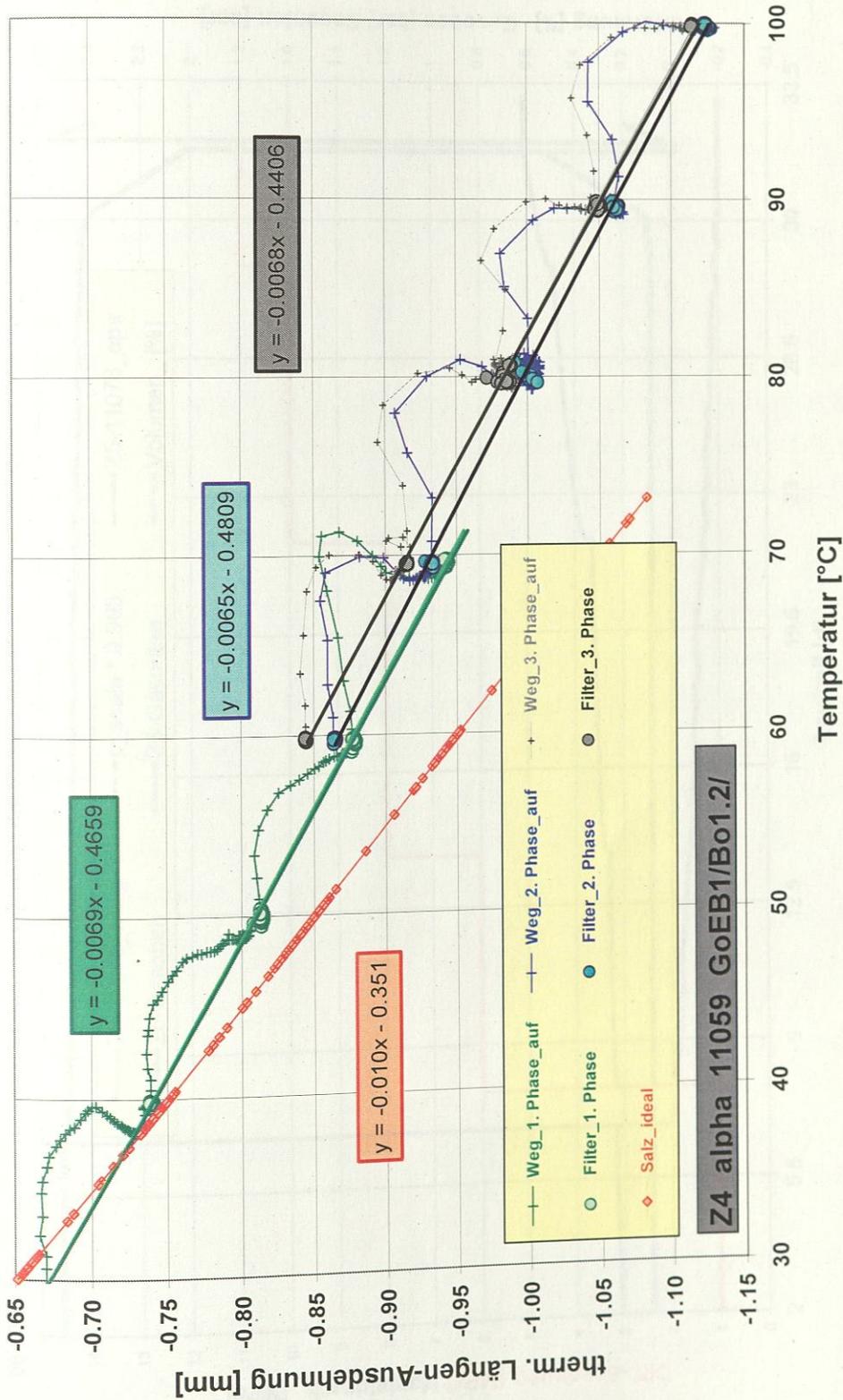


Abb. 27: Lineare Anpassung der Messwerte für das Gesamt-System zur Ermittlung der T-Empfindlichkeit für den Steinsalz-Prüfkörper (11059). Durch den Daten-Filter werden nur die Messwerte innerhalb einer Phase mit konstanter Temperatur berücksichtigt. Die lineare Anpassung bleibt in den drei Zyklen des Temperatur-Programms konstant.

- Anhang 2 -

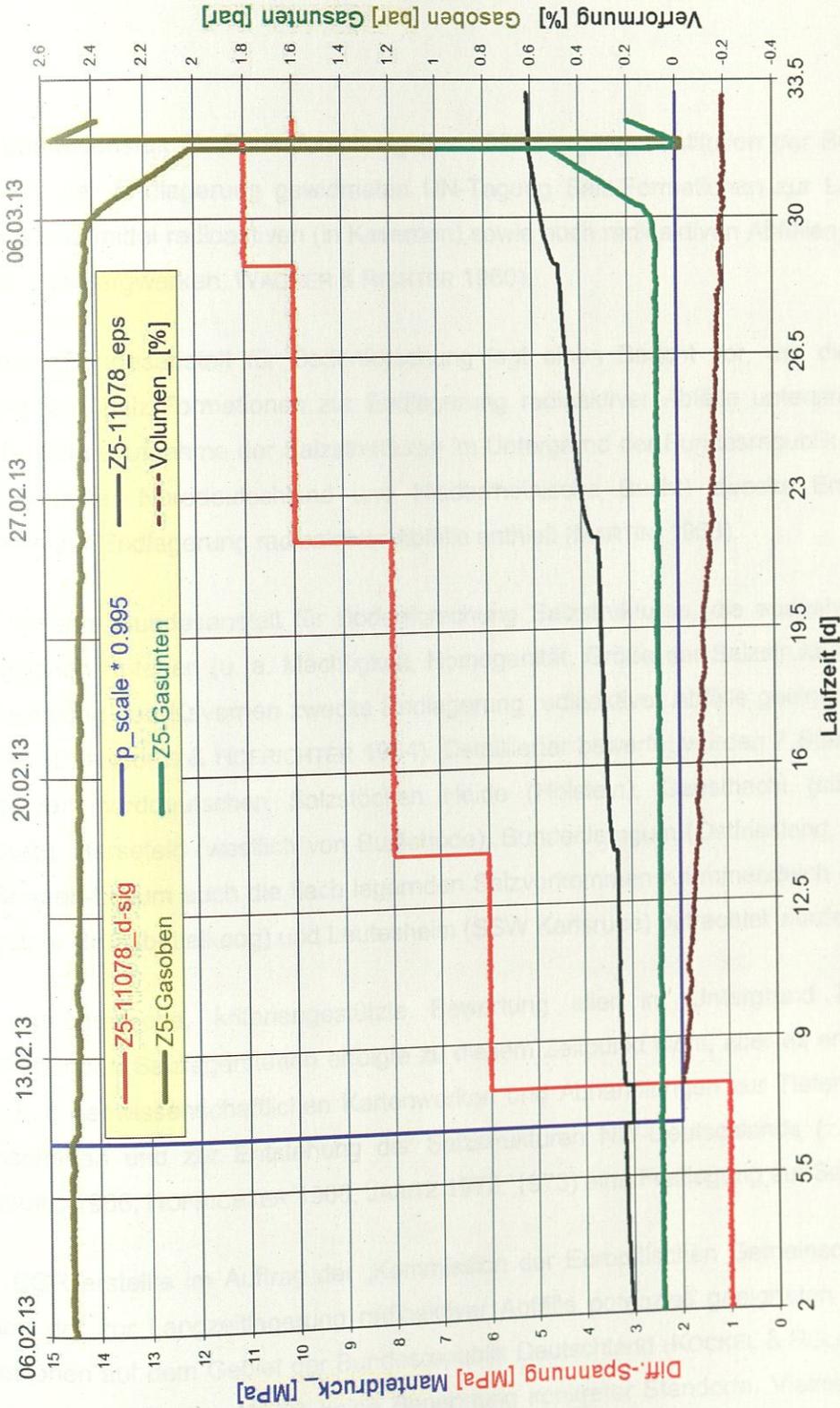


Abb. 28: Steinsalzprüfkörper 11078 (vergl. Tab. 3) mit konstant bleibendem Gasdruck auf der Einlass-Seite ( $p_{\text{gas}} = 0,25 \text{ MPa}$ ), bis als Folge abschnittsweise gesteigerter Differenz-Spannung das Dilatanz-Regime erreicht wird und Durchströmbarkeit einsetzt. Dadurch steigt der Gasdruck auf der Auslass-Seite an. (Manteldruck  $p = 2 \text{ MPa} = \text{const.}$ ; Temperatur  $T = 30^\circ\text{C} = \text{const.}$ )

Stand: 01.10.2013

## Kurzer Abriss der Wirtsgesteinsstudien der BGR mit Schwerpunkt Salz, inkl. flach lagernde Salze

1959 Bundesanstalt für Bodenforschung (bis 1975 Vorgängereinstitution der BGR) empfahl auf einer, der Endlagerung gewidmeten UN-Tagung Salz-Formationen zur Lagerung von schwach und mittel radioaktiven (in Kavernen) sowie hoch radioaktiven Abfällen (kontrollierte Lagerung in Bergwerken, WAGNER & RICHTER 1960).

Mai 1963 Bundesanstalt für Bodenforschung legt einen Bericht vor, der die besondere Eignung von Salz-Formationen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle unterstrich und eine erste Bestandsaufnahme der Salzstrukturen im Untergrund der Bundesrepublik Deutschland (Schwerpunkte: Norddeutschland und Niederrheinische Bucht) zwecks Errichtung von Kavernen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle enthielt (MARTINI 1963).

1964 benennt Bundesanstalt für Bodenforschung Salzstrukturen, die ausgehend von v.a. geologischen Kriterien (u. a. Mächtigkeit, Homogenität, Größe der Salzstruktur, Tiefenlage) zur Aussolung von Kavernen zwecks Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignet erschienen (RICHTER-BERNBURG & HOFRICHTER 1964). Detaillierter bewertet wurden 7 Standorte, wobei neben den norddeutschen Salzstöcken Heide (Holstein), Geesthacht (südöstlich von Hamburg), Harsefeld (westlich von Buxtehude), Bunde/Jemgum (Ostfriesland, an der Ems) und Bremen-Lesum auch die flach lagernden Salzvorkommen Krummendeich (Untere Elbe, gegenüber Brunsbüttelkoog) und Leutesheim (SSW Karlsruhe) betrachtet wurden.

Eine systematische, kriteriengestützte Bewertung aller im Untergrund Deutschlands vorkommenden Salzlagerstätten erfolgte zu diesem Zeitpunkt nicht, aber es erfolgte auf der Basis von geowissenschaftlichen Kartenwerken und Abhandlungen zur Tiefenlage, zu den Eigenschaften und zur Entstehung der Salzstrukturen NW-Deutschlands (z. B. RICHTER-BERNBURG 1966, HOFRICHTER 1966, JARITZ 1972, 1973) eine Festlegung auf Salzstrukturen.

1977 BGR erstellte im Auftrag der „Kommission der Europäischen Gemeinschaften“ einen Katalog der zur Langzeitlagerung radioaktiver Abfälle potenziell geeigneten geologischen Formationen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland (KOCKEL & ROLAND 1977). Im Rahmen dieser Studie erfolgte keine Benennung konkreter Standorte. Vielmehr wurde auf der Grundlage der Mitte der 1970er Jahre vorhandenen geologisch-geotechnischen Kenntnisse zu Salinar-Formationen, Tonen/Tonsteinen bzw. Tonmergelsteinen sowie Intrusivgesteinen und basierend auf Analysen ihrer regionalen Verbreitung, strukturellen Position und Lithologie die Eignung dieser Gesteinstypen für die

Endlagerung radioaktiver Abfälle kriteriengestützt bewertet. Neben Steinsalz wurden auch Granitoid- und Tonsteinformationen als prinzipiell für die Endlagerung radioaktiver Abfälle geeignete Wirtsgesteine angesehen. **12 Seiten über flach lagernde Salinar-Formationen von insgesamt 42 Seiten**

Die nachfolgenden Wirtsgesteinsstudien der BGR konzentrierten sich bis Mitte der 1990er Jahre auf der Grundlage des aktuellen Kenntnisstandes auf Bewertungen der in Deutschland vorkommenden Salz-Formationen, inklusive der flach lagernden salinaren Schichtenfolgen.

BEST et al. (1982) analysierten im Auftrag der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) detaillierter die Salinar-Formationen des Rotliegend, Zechstein und der Trias in Schleswig-Holstein sowie die hessischen Salzvorkommen der Werra-Formation im Werra-Fulda-Gebiet. **ca. 20 Seiten über flach lagernde Salinar-Formationen von insgesamt 48 Seiten**

Unter Zugrundelegung von, durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt vorgegebenen Bewertungskriterien, z.B. Bergwerkkonzept und Anforderungen bezüglich der Mächtigkeit (Schwebe von 300 m, Festen zum Flankenbereich von 200 m), Tiefenlage (Salzspiegel mindestens 200 m tief, Top der Salzstruktur nicht tiefer als 700 m, Endlagerbergwerk nicht tiefer als 1000 m), Zusammensetzung der Salinargesteine sowie der tektonischen und seismischen Aktivität in den zu bewertenden Regionen, wurden die Werra-Formation im Niederrhein-Gebiet, die alpinen Salinare in SE-Bayern, die Muschelkalk-Salinare in Baden-Württemberg und die Tertiär-Salinare im Oberrheingraben als nicht geeignet eingestuft.

Zu ähnlichen Schlußfolgerungen kam JARITZ (1983), der sich im Rahmen einer durch das BMFT im Januar 1982 beauftragten Bewertung der Salzstöcke Niedersachsens ebenfalls mit Optionen der Endlagerung in flach lagernden Salinar-Formationen beschäftigte.

Mai 1991 BGR wurde durch das BMU beauftragt, die Salzvorkommen in den neuen Bundesländern auf der Grundlage der in BEST et al. (1982) und JARITZ (1983) enthaltenen endlagerkonzeptionellen Vorgaben hinsichtlich ihrer Eignung für die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle zu bewerten. Im Rahmen dieser Beauftragung wurden Daten zur Verbreitung, zu den Mächtigkeiten und zur lithologischen Ausbildung der Rotliegend-, Zechstein-, Röt-, Muschelkalk- und Keuper-Salinare zusammengestellt (KRULL 1991). **ca. 32 Seiten über flach lagernde Salinar-Formationen von insgesamt 48 Seiten**

Prinzipiell günstige Voraussetzungen für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes bieten lediglich einige, weiter im Detail zu erkundende Salzstrukturen in Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Die flach lagernden Salzschieben und die Salzkissen in

der Nordostdeutschen Senke liegen fast ausnahmslos zu tief für ein Endlagerbergwerk. So wurden z. B. die Rotliegend-Salinare lediglich in Bohrungen in über 4000 m Tiefe nachgewiesen. Die Salinar-Formationen des Rotliegend, Röt, Mittleren Muschelkalk und Keuper sind nach KRULL (1991) entweder zu unrein oder lagern in zu großen Tiefen oder die Steinsalzlager sind für den Bau eines Endlagers zu geringmächtig. Die flach lagernden Salinarschichten der Thüringischen und Hessisch-SW Thüringischen Senken weisen nach KRULL (1991) zu geringe Mächtigkeiten und zahlreiche Nutzungskonflikte mit aktuellen oder geplanten Salzbergbau-Projekten auf.

Koalitionsvereinbarung zur 12. Legislaturperiode forderte eine Ergänzung der Kenntnisse über die in Deutschland vorkommenden Salinar-Formationen und eine Vervollständigung der Angaben zu den anderen, prinzipiell in Frage kommenden Wirtsgesteinsformationen. Auf der Basis eines Erlasses aus dem BMU von April 1992 hat die BGR Mitte der 1990er Jahre eine aktualisierte zusammenfassende Studie über die Salz-Formationen in Deutschland vorgelegt. Der von KOCKEL et al. (1995) erstellte Untersuchungsbericht enthält keine systematische Bewertung aller im Untergrund Deutschlands vorkommenden Salinar-Formationen, sondern ergänzt bzw. aktualisiert die Daten für die von BEST et al. (1982), JARITZ (1983) und KRULL (1991) positiv bewerteten Salinar-Formationen. Auf der Grundlage dieser Datenzusammenstellungen werden 28 Zechstein- und 7 Rotliegend-/Zechstein-Salzstrukturen sowie 6 Keuper-Salinar-Vorkommen hinsichtlich ihrer Eignung für den Bau eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle neu bewertet. Die anderen Salinar-Formationen werden inklusive der flach lagernden Salinarvorkommen nur sehr knapp dargestellt, wobei auf früher publizierte Angaben und Eignungsbewertungen zurückgegriffen wird.

Letztmalig wurden von KRULL et al. (2004) Standortalternativen im Steinsalz beschrieben.

Zwecks Gewährleistung einer höchstmöglichen Transparenz und Nachvollziehbarkeit der früheren Entscheidungen und als eine Grundlage für zukünftige, auf gesamtgesellschaftlich akzeptierten Auswahlkriterien basierende Bewertungen von potenziellen Wirtsgesteinen werden im ersten BASAL-Bericht (2014) die geologischen Kenntnisse zu den flach lagernden Salinar-Formationen zusammenfassend dargestellt.