

KfK 5435
Dezember 1994

Triaxiale Messungen zum Kompaktierungsverhalten von trockenem Salzgrus bei erhöhten Temperaturen

E. Korthaus
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

KfK 5435

**Triaxiale Messungen zum Kompaktierungsverhalten
von trockenem Salzgrus bei erhöhten Temperaturen**

E. Korthaus

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

ISSN 0303-4003

Zusammenfassung

Zum Kompaktierungsverhalten von trockenem Salzgrus, wie er in deutschen Endlagerkonzepten für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente als Versatzmaterial vorgesehen ist, wurden Messungen mit einer triaxialen Prüfeinrichtung bei Temperaturen von 50 bis 150°C durchgeführt. In 5 Versuchen mit insgesamt 19 Kriechphasen von jeweils einigen Tagen Dauer und Spannungen von 3.0 bis 20.0 MPa wurden die hydrostatischen Kompaktierungsraten sowie in 4 deviatorischen Lastfällen die Verformungsraten ermittelt. Um den im Endlager zu erwartenden Verhältnissen möglichst nahe zu kommen, wurden die Versuchsparameter in den Kriechphasen jeweils so gewählt, daß sich Kompaktierungsraten von etwa 10^{-4} - $10^{-3}/d$ ergaben.

Bei einer Anfangsporosität von 31 % wurden Kompaktierungen bis maximal 28.5 % erreicht (bei 150°C) entsprechend einer Porosität von 3.5 %.

Zusammen mit anderen bei Raumtemperatur gewonnenen Ergebnissen finden die präsentierten Meßergebnisse Verwendung bei der Formulierung eines Stoffgesetzes für Salzgrus, wie es für thermomechanische Modellrechnungen zur Streckenkonvergenz und Versatzkompaktierung in einem Endlager in einer Steinsalzformation benötigt wird.

Triaxial measurements on the consolidation behaviour of dry crushed salt at elevated temperatures

Abstract

Measurements on the consolidation behaviour of dry crushed salt were performed at temperatures of 50 to 150°C with the aid of a triaxial testing apparatus. Crushed salt is proposed for use as a backfill material in the German disposal concepts for high level radioactive wastes and spent fuel elements. In 5 tests with a total of 19 creep phases of some days duration each and stress levels of 3.0-20.0 MPa the hydrostatic consolidation rates as well as the deformation rates in 4 deviatoric load cases were determined. In order to approach as closely as possible the conditions to be expected in a final repository the testing parameters were selected such that consolidation rates of about 10^{-4} - $10^{-3}/d$ were obtained during the creep phases.

Starting at an initial porosity of 31 % consolidations up to 28.5 % at the maximum (at 150°C) were reached, corresponding to a porosity of 3.5 %.

Together with other results obtained at room temperature, the presented results will be used in the formulation of a constitutive law for crushed salt backfill required in thermomechanical model calculations on drift convergence and on backfill consolidation in a final repository in rock salt.

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung

1. Einleitung

1

2. Meßverfahren

1

3. Durchführung der Messungen

2

4. Meßergebnisse

3

5. Diskussion und Ausblick

7

6. Literatur

10

7. Abbildungen

11

1. Einleitung

Im deutschen Konzept zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen in einer Steinsalzformation ist Salzgrus (granulares Salz) als Versatzmaterial für die Verfüllung der Resthohlräume in den Lager- und Beschickungsstrecken vorgesehen. Das Konvergenzverhalten dieser Strecken und die damit verbundene Kompaktierung des Versatzmaterials spielen eine wichtige Rolle für die Sicherheit des Endlagers, da sie mögliche Laugenzutritte und -bewegungen im Lagerbereich entscheidend beeinflussen.

Zur Vorhersage der Konvergenz und der Versatzkompaktierung werden thermomechanische Modellrechnungen durchgeführt, in denen die Kompaktierungs- und Verformungseigenschaften des Versatzmaterials in Form eines geeigneten Stoffgesetzes berücksichtigt werden müssen. Zur näherungsweise Beschreibung des komplexen viskoplastischen Stoffverhaltens von Salzgrus liegen Stoffgesetzworschläge /1/,/2/,/3/ vor, die jedoch mit Hilfe geeigneter Messungen überprüft bzw. quantitativ angepaßt werden müssen. Diese Messungen sollten unter Bedingungen durchgeführt werden, die den im Endlager zu erwartenden Verhältnissen möglichst nahe kommen, d.h. bei Spannungen bis etwa 20 MPa, Temperaturen bis 200°C und Kompaktierungsraten unter $10^{-3}/d$. Sie sollten nicht nur das hydrostatische Kompaktierungsverhalten sondern auch die Verformung unter deviatorischen Belastungen erfassen.

In /4/ wurden eine speziell zu diesem Zweck entwickelte triaxiale Meßeinrichtung beschrieben sowie erste Messungen bei Raumtemperatur am sog. Referenzversatz, wie er für die Untersuchungen zum Gorleben-Projekt und zu PAE (Projekt Andere Entsorgungstechniken) definiert wurde. Es handelt sich dabei um trockenen Salzgrus aus der Schachanlage ASSE mit einer breiten Korngrößenverteilung und einem maximalen Korndurchmesser von 31.5 mm.

Im vorliegenden Bericht wird über eine Reihe von Messungen am Salzgrus-Referenzversatz bei Temperaturen von 50 - 150°C berichtet.

2. Meßverfahren

Die für die Messungen verwendete und in /4/ ausführlich beschriebene triaxiale Prüfeinrichtung zeichnet sich durch die folgenden Merkmale aus:

- Echt 3-dimensionale Geometrie (würfelförmiges Prüfvolumen)
- Triaxiale Lastaufbringung symmetrisch in den 3 Raumrichtungen (≤ 30 MPa)
- Ausreichende Größe der Prüfkammer (im Vergleich zur max. Korngröße)
- Messung der Verformungsraten in den 3 Raumrichtungen ($\geq 5 \cdot 10^{-5}/d$)
- Betriebsfähigkeit bei Temperaturen bis 200°C

Die Lastaufbringung in den 3 Raumrichtungen erfolgt bei dieser Methode mit Hilfe von 6 hydraulischen Druckkissen aus Edelstahl, die an den Wänden des Prüfvolumens angebracht werden. Sie werden für jede Messung erneuert. Über die ihnen zugeführte Menge an Hydrauliköl erfolgt auch die Bestimmung der über den Probenquerschnitt gemittelten triaxialen Verformungen (Methode der Ölmengenbestimmung, ÖMB). Es wurden bisher 2 Arten von Druckkissen eingesetzt, die sich durch ihren Aufbau und die Wandstärke unterscheiden, die sog. Faltkissen mit einer Wandstärke von 0.15 mm und die sog. Löt-kissen mit 0.3 mm Wandstärke. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus und der Fertigung der Druckkissen wird in /4/ gegeben.

Zusätzliche Messungen der triaxialen Verformungen werden unter Verwendung von induktiven Wegaufnehmern (IWA) durchgeführt. Sie erfassen die Verformung des Prüfkörpers in der Mitte der Seitenflächen. Diese Messungen stellen eine wichtige Ergänzung und Absicherung der Versuche dar. Insbesondere liefern sie on-line Informationen über die Probengeometrie bzw. über Abweichungen von der idealen Quaderform, die durch Wandreibungseffekte verursacht werden. Daneben können sie die Weiterführung von Versuchen ermöglichen, wenn die Verformungsmessung über die Druckkissen aufgrund einer kleinen Leckage gestört ist. Dieses Meßverfahren wurde bei den im folgenden dargestellten Versuchen erstmals eingesetzt.

Die angegebene Grenze von $5 \cdot 10^{-5}/d$ für die Messung der Verformungsraten wurde aus Testmessungen mit einer massiven Aluminiumfüllung der Prüfzelle abgeleitet, bei denen eine z.Z. nicht näher zu spezifizierende Langzeitdrift von etwa $5 \cdot 10^{-6}/d$ ermittelt wurde.

Die Abb.1 und 2 zeigen die gesamte Meßeinrichtung und die Prüfzelle bei abgenommener Wärmeisolation.

In /4/ wurde bereits erwähnt, daß für Messungen an Salzgrus bei erhöhten Temperaturen unbedingt ein Korrosionsschutz für die Druckkissen vorgesehen werden muß.

Ein Korrosionsschutz in Form eines Anstrichs oder einer nichtmetallischen Beschichtung mußte wegen der starken mechanischen Beanspruchung der Druckkissen im Kontakt mit dem Probenmaterial ausgeschlossen werden. Es wurde daher eine Umhüllung mit einer 0.075 mm starken Titanfolie gewählt, mit der eine Abdeckung der Vorderseite und einer rückseitigen 20 mm breiten Randzone der Druckkissen realisiert wird. Die bisherigen Versuche ergaben, daß die Titan-Umhüllungen die starken Verformungen (Biegungen, Stauchungen) bruchlos überstehen und auch nach mehreren Wochen durch Korrosion noch nicht gravierend beeinträchtigt werden. Es zeigte sich auch, daß diese Umhüllung der Druckkissen, durch die zwar der direkte Kontakt mit dem Probenmaterial unterbunden, nicht aber ein gasdichter Abschluß gegenüber diesem bewirkt wird, für einen wirksamen Korrosionsschutz der Druckkissen ausreichend ist.

Für die Versuche bei erhöhten Temperaturen mußte auch die Fertigung der Löt-kissen etwas modifiziert werden, da sich das Aufkleben den Ronden auf der Rückwand als nicht geeignet erwies. Hier wurde stattdessen ein Lötverfahren entwickelt unter Verwendung von speziellem VA-Lot mit 220°C Erweichungspunkt.

2. Durchführung der Messungen

Zur Durchführung der Versuche wurde das Probenmaterial in 6 abgewogenen Chargen schichtenweise in die Prüfzelle eingebracht und jeweils durch mechanische Vorkompaktierung auf die gewünschte Anfangsporosität gebracht.

Nach Anbringung des oberen Druckkissens und Verschließen der Prüfzelle mit der Deckplatte wurde zunächst eine gewisse hydrostatische Anfangsbelastung aufgebracht und danach oder währenddessen die gewünschte Versuchstemperatur eingestellt.

Die Versuche wurden als Kriechversuche mit hydrostatischen und in einigen Fällen deviatorischen Belastungen durchgeführt. Um in vertretbaren Zeiträumen in den interessierenden Bereich niedriger Kompaktierungsraten zu gelangen, wurden teilweise Spannungsabsenkungen um etwa 30 % vorgenommen.

Die wichtigsten charakteristischen Daten zu den einzelnen Versuchen sind in der Tabelle 1 angegeben. Weitere Details insbesondere zur Belastungsgeschichte werden im folgenden Kapitel bei der ausführlichen Darstellung der Ergebnisse der einzelnen Versuche mitgeteilt.

3. Meßergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der Messungen sind die Kompaktierungen und die Kompaktierungsraten, die sich gegen Ende der jeweiligen Kriechphasen einstellten sowie die effektiven deviatorischen Verformungsraten im Falle von deviatorischen Belastungen.

Diese Ergebnisse, die für die Formulierung eines Stoffgesetzes verwendet werden können, sowie die charakteristischen Daten der durchgeführten Versuche und der untersuchten Lastfälle sind in der Tab.1 zusammenfassend aufgeführt. Dabei bedeuten:

η_0 : Anfangsporosität

p : Mittlere Normalspannung (MPa)

q : Äquivalentspannung (Deviator, MPa)

T : Temperatur (°C)

D : Dauer der Kriechphase (d)

K : Kompaktierung am Ende der Kriechphase ($\Delta V/V_0$)

\dot{K} : Kompaktierungsrate am Ende der Kriechphase (1/d)

$\dot{\epsilon}_e$: Äquivalente (deviatorische) Verformungsrate am Ende der Kriechphase (1/d)

Auf die Angabe der einzelnen Komponenten der Spannungen, Verformungen und Verformungsraten wurde hier aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Die angegebenen Kompaktierungen, Kompaktierungs- und Verformungsraten wurden in der Regel über die Ölmengenbestimmung (ÖMB) ermittelt unter rechnerischer Korrektur für die thermische Ausdehnung des Probenmaterials, des Hydraulik-Öls und des Druckgefäßes. Im Fall der deviatorischen Verformungen wurde jeweils die Änderung des Probenquerschnitts, durch die der Zusammenhang zwischen Ölmenge und Probenverformung nichtlinear wird, berücksichtigt.

Die angegebenen Kompaktierungs- und Verformungsraten wurden jeweils mit Hilfe einer Polynomannpassung dritten Grades an die Versuchsdaten ermittelt.

Die Ergebnisse der IWA-Messung wurden meist nur zu Kontrollzwecken, insbesondere hinsichtlich der Entwicklung der Probengeometrie verwendet und werden hier nicht im einzelnen mitgeteilt, da sie für das Verhalten des Prüfmaterials weniger repräsentativ sind als die ÖMB-Methode. Sie wurden jedoch in den Fällen berücksichtigt, in denen die ÖMB-Messung durch eine kleine Leckage in einem Kanal nicht mehr verwertbar war. Auf die IWA-Messungen wird in der folgenden detaillierten Erläuterung der einzelnen Versuche eingegangen.

Zur beispielhaften Illustration der Präzision beider Meßverfahren ist in Abb.3 und 4 jeweils der zeitliche Verlauf der Stauchungen in einer horizontalen Richtung während einer Kriechphase des bei 150°C durchgeführten Versuchs V140494 in stark gedehntem Maßstab gezeigt. Die Stauchungsrate beträgt hier etwa $8 \cdot 10^{-5}/d$. Man erkennt, daß die ÖMB-Methode wesentlich geringere temperaturbedingte Schwankungen aufweist als das IWA-Verfahren, aber auch dieses ist offensichtlich geeignet, derartig geringe Stauchungsraten hinreichend genau zu bestimmen, sofern die Meßzeit wenigstens einige Tage beträgt.

Versuch	η_0	p	q	T	D	K	\dot{K}	$\dot{\epsilon}_e$
V010693	0.325	3.5	0	70	5	0.151	4.20E-4	-
"		3.5	0	100	4.6	0.159	1.71E-3	-
V280194	0.31	4.5	0	50	3	0.129	2.79E-3	-
"		3.0	0	"	5.5	0.130	3.00E-4	-
V240294	0.31	3.0	0.866	50	7	0.130	3.80E-4	1.31E-4
V140494	0.31	7.0	0	150	3.2	0.213	3.00E-3	-
"		5.0	0	"	1	0.214	4.50E-4	-
"		5.0	1.73	"	4	0.216	5.00E-4	2.12E-4
"		5.0	0	"	1	0.216	3.30E-4	-
"		15.0	0	"	3	0.261	3.30E-4	-
"		10.0	3.46	"	4	0.265	6.40E-4	4.05E-4
"		10.0	0	"	4.6	0.267	4.20E-4	-
"		7.5	0	"	4	0.267	1.35E-4	-
"		20.0	0	"	6	0.285	1.20E-3	-
V060794	0.31	10.0	0	50	4.2	0.184	2.10E-3	-
"		8.0	0	"	1	0.1845	6.00E-4	-
"		6.0	0	"	1.9	0.1846	2.00E-4	-
"		6.0	1.73	"	3.5	0.1855	2.00E-4	7.70E-5
"		10.0	0	100	10	0.225	1.40E-3	-

Tab.1 Charakteristische Daten und Meßergebnisse der durchgeführten Versuche

Versuch V010693

Dieser Versuch wurde bei Temperaturen von 70 und 100°C und einer Spannung von 3.5 MPa (hydrostatisch) als Fortsetzung eines Versuchs bei Raumtemperatur, bei dem durch hydrostatische Belastungen von 7.5, 5.0 und 3.5 MPa in 26 Tagen eine Kompaktierung von 14.8 % erreicht worden war, durchgeführt.

Dieses war der erste Versuch, bei dem der Korrosionsschutz der Druckkissen (Faltkissen, Wandstärke 0.15 mm) durch eine Titanumhüllung eingesetzt wurde. Gleichzeitig wurde hier erstmals die zusätzliche Verformungsmessung mit den induktiven Wegaufnehmern praktiziert.

Die erste Temperaturerhöhung auf 70°C wurde während einer 8-stündigen Druckabsenkung auf 2.5 MPa vorgenommen. Danach wurde die Belastung wieder auf 3.5 MPa erhöht. Nach 5 Tagen wurde bei gleichbleibender Spannung die zweite Temperaturerhöhung auf 100°C vorgenommen.

In Abb.5 ist die Verformungsgeschichte des Versuchs dargestellt, wie sie aus der ÖMB- und der IWA-Messung ermittelt wurde. Man erkennt daraus zunächst die relativ gute Übereinstimmung zwischen beiden Meßmethoden und den deutlichen Anstieg der Stauchungsraten nach der Temperaturerhöhung auf 100°C. Gegenüber dem Ende der Vorphase bei Raumtemperatur (und 3.5 MPa) war die Kompaktierungsrate durch die Erhöhung auf 70°C bereits um einen Faktor 10 angestiegen. Daß die Kompaktierungsrate während der beiden Kriechphasen trotz abnehmender Porosität nur wenig bzw. nicht abnimmt, erklärt sich einerseits durch die relativ weitgehende Kompaktierung während der Vorphase bei Raumtemperatur, zum anderen vermutlich durch einen bei erhöhter Temperatur ablaufenden Tempereffekt, durch den zuvor stattgefundenen Dehnungsverfestigungen in den Salzpartikeln wieder abgebaut werden.

In der Versuchsphase mit 100°C fällt der schnellere Anstieg der Stauchungen aus der IWA-Messung auf. Dies ist durch die zunehmende Abweichung des Prüfkörpers von der idealen Quadergeometrie zu erklären, die durch die Wandreibungseffekte bewirkt wird. Diese Effekte sind umso größer, je "weicher" das Probenmaterial relativ zur Steifigkeit der Druckkissen-vorderwand hinsichtlich einer Stauchung in Form kleiner Wellen oder Falten ist. Die Effekte nehmen daher mit steigender Temperatur zu und sind bei Verwendung der Löt-kissen größer als bei den dünnwandigen Faltskissen.

Gegen Ende dieser Messung lassen sich aus Abb.5 relative Unterschiede von bis etwa 3% zwischen den über das ÖMB-Verfahren bestimmten Stauchungen und den aus der IWA-Messung folgenden Werten für die Mitte der Probenseitenflächen ablesen. Bei einer nachträglichen groben Vermessung des ausgebauten Prüfkörpers zeigten sich etwas größere Unterschiede, die jedoch deutlich unter 10% lagen.

Die Unterschiede zwischen den Stauchungen in den 3 Richtungen trotz hydrostatischer Belastung erklären sich vermutlich durch eine Anisotropie des Prüfkörpermaterials, die beim Befüllen der Prüfzelle verursacht wird. In den meisten bisher durchgeführten (hydrostatischen) Versuchen stellt sich dies so dar, daß die Stauchungen in der vertikalen (z-) Richtung um ca. 20% größer sind als in den beiden horizontalen Richtungen, die meist gut übereinstimmen.

Die Tatsache wiederum, daß die absoluten Stauchungen aus der IWA-Messung teils über und teils unter der anderen Meßmethode liegt, erklärt sich dadurch, daß bei dieser Messung noch eine reine Punktmessung in der Mitte der Druckkissen durchgeführt wurde, was aufgrund des grobkörnigen Probenmaterials und der auftretenden Welligkeiten der Druckkissen-vorderwand zu statistischen Streuungen der gemessenen Stauchungen führte. Bei den neueren Messungen wurden daher in der Mitte der Druckkissen 1.5 mm starke Stahlscheiben mit 45 mm Durchmesser angebracht. Dadurch werden diese Streuungen weitgehend beseitigt (s.u.).

Die IWA-Messung zeigt hier noch relativ starke zeitliche Schwankungen, die auf Schwankungen der Raumtemperatur zurückzuführen sind. Da die induktiven Wegaufnehmer einerseits am (temperaturstabilisierten) Druckgefäß angekoppelt sind, andererseits durch den Isoliermantel teilweise ins Freie ragen, bewirkten Schwankungen der Raumlufttemperatur veränderliche Gradienten über der aktiven Zone der Wegaufnehmer, was durch die elektronische Temperaturkompensation dieser Meßeinrichtung nicht korrigiert wird. Daher wurden für die späteren Messungen zur Verringerung dieser Gradienten gut wärmeleitende Kupferumhüllungen der aktiven Zone der Wegaufnehmer angebracht. Diese wurden außerdem mit je einem Thermoelement versehen, um eine nachträgliche Temperaturkorrektur zu ermöglichen.

Versuch V280194

Bei diesem Versuch wurde erstmals eine wegegeregelte Lastaufbringung zu Beginn des Versuchs vorgenommen. Mit Hilfe der PC-gestützten Datenerfassungsanlage wurden die den Druckkissen der 3 Kanäle zugeführten Ölmengen entsprechend einer Stauchungsrate von je 1 %/h geregelt. Gleichzeitig wurde die Temperaturerhöhung auf 50°C vorgenommen.

Entsprechend den Erfahrungen bei den früheren Versuchen mit spannungsgeregelter Anfangsphase zeigte sich nun ein (um etwa 10 %) langsamerer Spannungsanstieg in der vertikalen z-Richtung gegenüber den beiden horizontalen Richtungen. Nach 3.5 h waren Stauchungen von 3.5 % und ein Spannungsaufbau von 4.5 bzw. 4.0 MPa erreicht. Um für die anschließend beabsichtigte Kriechphase einen hydrostatischen Spannungszustand mit 4.5 MPa zu realisieren, mußte die Stauchung im z-Kanal fortgesetzt werden, so daß sich schließlich auch hier wieder eine um etwa 20 % höhere Stauchung in dieser Richtung ergab.

Durch einen Fehler in der Steuerung ergab sich 10 h nach Versuchsbeginn eine Relaxationsphase von 12 h. Nach 3.8 d wurde eine Spannungsreduktion auf 3.0 MPa vorgenommen, um in den angestrebten Bereich niedriger Kompaktierungsraten zu gelangen.

Der zeitliche Verlauf der Stauchungen ist in Abb.6 gezeigt. Nach etwa 4 Tagen zeigt sich eine Leckage im z-Kanal, die nach Ausbau der Druckkissen nicht lokalisiert wurde. Dieser Versuch war ohne einen Korrosionsschutz der Druckkissen (Wandstärke 0.15 mm) durchgeführt worden in der Hoffnung, daß bei 50°C noch kein nennenswerter Korrosionsangriff zu erwarten sei. Vermutlich lag jedoch ein Korrosionsdefekt vor, da im folgenden ähnlichen Versuch ein solcher nachgewiesen wurde (s.u.).

Versuch V240294

Dieser Versuch, der ebenfalls mit ungeschützten Faltkissen bei 50°C durchgeführt wurde, war bis 2.4 d nach Versuchsbeginn praktisch identisch mit dem vorigen Versuch V280194. Danach wurde er mit einem deviatorischen Spannungszustand weitergeführt, der durch Anheben bzw. Absenken der beiden horizontalen Spannungen um 0.5 MPa realisiert wurde. Die resultierenden Verformungen sind in Abb.7 dargestellt.

Ab etwa 4 d macht sich bei der ÖMB-Messung im x-Kanal eine zunehmende Leckage bemerkbar. Bei der Nachuntersuchung der Druckkissen wurden einige winzige Löcher in der Druckkissenvorderwand festgestellt, die offensichtlich durch Lochfraß, ausgelöst durch den direkten Kontakt mit den Salzpartikeln, verursacht waren. Damit ist klar, daß bereits bei der relativ niedrigen Temperatur von 50°C ein Korrosionsschutz für die Druckkissen erforderlich ist, sofern die Messungen über mehr als einige wenige Tage durchgeführt werden sollen.

Versuch V140494

Dieser Versuch wurde mit den sog. Löt-kissen mit 0.3 mm Wandstärke unter Verwendung von Titan-Umhüllungen bei einer Temperatur von 150°C durchgeführt. Während der Versuchsdauer von 35 Tagen wurden mehrere hydrostatische und 2 deviatorische Spannungszustände

untersucht (Abb.8). Die Versuchstemperatur wurde nach der wegeeregelterten Aufbringung der Anfangsbelastung von 7.5 MPa während der Entlastungsphase mit 5.0 MPa eingestellt.

Das Ende des Versuchs bei einer Spannung von 20 MPa und einer Restporosität von nur etwa 3.5 % wurde durch einen Bruch eines Druckkissens an einer Lötnaht aufgrund eines Fertigungsfehlers verursacht. Korrosionsangriffe waren an den Druckkissen nicht festzustellen. Damit wurde erstmals gezeigt, daß mit der triaxialen Meßeinrichtung auch Messungen bei hohen Temperaturen und Drücken zumindest über mehrere Wochen durchgeführt werden können.

Die Abb.9 und 10 zeigen die mit den ÖMB- und IWA-Verfahren erhaltenen zeitlichen Verläufe der Stauchungen. Auch hier ist die Stauchung im z-Kanal wieder deutlich größer, während die beiden horizontalen Kanäle nun auch bei der IWA-Messung übereinstimmen, da hier die oben erwähnten Stahlscheiben zur Einebnung der Proben- bzw. Druckkissenoberfläche im Zentrum eingesetzt wurden. Die IWA-Meßwerte liegen hier um etwa 20 -25% über den ÖMB-Werten, bedingt durch die steiferen Druckkissen und das bei der hohen Temperatur relativ "weiche" Probenmaterial.

Versuch V060794

Dieser Versuch wurde ebenfalls mit Lötkeissen und Titan-Umhüllungen durchgeführt. Die Versuchstemperatur von 50°C für die ersten 12 Tage wurde während einer Entlastungsphase mit 8 MPa eingestellt, nachdem zuvor eine wegeeregelterte Kompaktierung mit 3 %/h bis etwa 15 % bzw. 10 MPa vorgenommen worden war. Die Abb.11 und 12 zeigen die Belastungsgeschichte und die resultierenden Verformungen (ÖMB) während dieses Zeitabschnitts.

Nach 12 Tagen wurde die Temperatur auf 100°C und die Spannung auf 10 MPa erhöht. Nach weiteren 10 Tagen mußte diese Kriechphase wegen einer Leckage im z-Kanal, die bereits nach 7 d einsetzte (s. Abb.12), abgebrochen werden. Als Ursache wurde nachträglich ein sehr kleiner Riß in der Randzone eines Druckkissens festgestellt, der anscheinend durch eine mechanische Vorschädigung des Materials ausgelöst worden war. Eine Korrosionseinwirkung war auch hier nicht festzustellen.

Die IWA-Messung (Abb.13) liegt bei diesem Versuch ebenfalls um etwa 20 -25% über der ÖMB-Messung. Im Falle des z-Kanals sind es sogar etwa 30%, was jedoch daran liegen kann, daß während dieser Messung der obere der beiden induktiven Wegaufnehmer defekt war. Die IWA-Messung konnte daher nur an der Probenunterseite erfolgen, was evtl. aufgrund einer Unsymmetrie zu einer Überschätzung der vertikalen Stauchung durch die IWA-Messung geführt haben kann.

Diskussion und Ausblick

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, daß mit der triaxialen Prüfeinrichtung /4/ bei Verwendung eines Korrosionsschutzes für die Druckkissen auch Messungen bei erhöhten Temperaturen möglich sind. Insbesondere kann auch das Verformungsverhalten bei deviatorischer Belastung gemessen werden. Mit konventionellen Triaxial-Anlagen ist dies aufgrund technischer Probleme bei der Bestimmung der radialen Verformung bisher nicht mit der erforderlichen Genauigkeit gelungen, sodaß hierfür keine vergleichbaren Meßergebnisse vorliegen.

Zu klären ist noch, welche Standzeiten mit den dünnwandigen Druckkissen, den Faltkissen, die hinsichtlich der Meßgenauigkeit Vorteile gegenüber den Löt-kissen bieten, bei den erhöhten Temperaturen erreicht werden können.

Die Versuche haben gezeigt, daß mit der zusätzlich installierten Meßmethode mit induktiven Wegaufnehmern eine wertvolle Ergänzung der triaxialen Meßeinrichtung realisiert wurde, die eine bessere Interpretation der Messungen gestattet sowie die Auswertung von Messungen, die durch kleine Defekte in den hydraulischen Kanälen gestört sind.

Die erstmalige Erprobung der wegegeregelten Lastaufbringung in einigen der dargestellten Versuche verlief erfolgreich, sodaß damit dieses Verfahren nun auch für Versuche mit sehr langsamer Lastaufbringung zur Verfügung steht.

Die in Tab.1 zusammengefaßten Ergebnisse der beschriebenen Versuche zeigen im Vergleich zu den bei Raumtemperatur gewonnenen Daten den deutlichen Einfluß der Temperatur auf die Verformungsraten. Eine ausführlichere quantitative Beurteilung und Interpretation bzw. ein Vergleich mit Oedometerversuchen anderer Autoren an vergleichbarem Material ist wegen des komplexen nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Verformungsraten, Spannungszustand, Kompaktierungsgrad bzw. Porosität, und Temperatur nicht ohne weiteres möglich. Hierzu muß vielmehr ein durch theoretische Überlegungen begründetes Stoffgesetz für Salzgrus herangezogen werden. Über den aktuellen Stand der Anpassung eines derartigen Stoffgesetzes nach /2/ bzw. /3/ unter Verwendung aller bisher bei Raumtemperatur und bei erhöhten Temperaturen ermittelten Daten wird in Kürze ausführlich berichtet werden. Hier sollen vorab einige wichtige Ergebnisse genannt werden:

- die gemessenen Kompaktierungsraten lassen sich in guter Näherung mit einer p^5 -Abhängigkeit beschreiben
- die Temperaturabhängigkeit der Kompaktierungs- und Verformungsraten kann durch einen Faktor $\exp(-6495/T_{\text{abs}})$ beschrieben werden

Beide Abhängigkeiten entsprechen dem bisher meist verwendeten Stoffgesetz für das stationäre Kriechen des kompakten Steinsalzes aus der ASSE

- die Kompaktierungsrate nimmt nur wenig zu, wenn von einem hydrostatischen Spannungszustand zu einem leicht deviatorischen mit gleicher mittlerer Normalspannung übergegangen wird. Dies läßt sich auch aus den in Tab.1 angegebenen Ergebnissen direkt entnehmen
- Die aus den gemessenen deviatorischen Verformungen abgeleiteten äquivalenten Verformungsraten werden durch das angepaßte Stoffgesetz ähnlich gut beschrieben wie die hydrostatischen Kompaktierungsraten

Zur Absicherung der bisher vorliegenden Stoffgesetzformulierung sind weitere Messungen insbesondere bei erhöhten Temperaturen, bei großen Kompaktierungen bzw. kleinen Restporositäten, sowie bei deviatorischen Spannungsverhältnissen erforderlich. Auch zum Verformungsverhalten bei geringen Kompaktierungen und niedrigen Kompaktierungsraten sowie bei größeren Anfangsporositäten, wie sie bei der technischen Veratzeinbringung evtl. auftreten werden, sind zusätzliche Messungen nötig. Die beiden letztgenannten Punkte sind speziell auch für die Stoffgesetzvalidierung anhand des im Salzbergwerk ASSE laufenden TSS-Versuchs (Thermische Simulation der Streckenlagerung) /5/ von Bedeutung.

In geeigneten Testmessungen sollte noch der Frage nachgegangen werden, ob bei dem hier verwendeten Meßverfahren durch das Zusammenwirken der flexiblen Druckkissen mit dem grobkörnigen Probenmaterial nennenswerte Fehler in der Verformungsmessung bewirkt werden können gegenüber den Verhältnissen im Endlager, wo eine starre, in der Fläche jedoch schrumpfende Streckenwand auf das Material aufläuft. Diese Frage ist auch für die konventionellen Triaxialversuche von Bedeutung, bei denen die Lastaufbringung in radialer Richtung über eine flexible Manschette erfolgt.

Speziell im Hinblick auf das Langzeitverhalten von versetzten Strecken muß ausführlicher der Frage nachgegangen werden, inwieweit mit Zeitrafferversuchen generell, d.h. sowohl mit normalen Kriechversuchen wie auch mit der hier meist angewandten Entlastungsmethode oder mit wegegeregelten Messungen hinreichend repräsentative Ergebnisse für die Verhältnisse im Endlager erzielt werden können, wo die Versatzkompaktierung in wesentlich längeren Zeiträumen abläuft.

Hierzu müssen zukünftig spezielle Messungen unter stärkerer Variation des Lastpfades durchgeführt werden, insbesondere solche mit möglichst langsamer Kompaktierung. Ebenso sollte untersucht werden, ob eine Zeitraffung mit vorübergehend überhöhten Temperaturen zu den gleichen Ergebnissen führt.

6. Literatur

- /1/ Liedtke, L., Kojic, M., Bathe, K.-J.
A Pressure Sensitive Creep Model for Crushed Rock Salt. Vortrag European Conference on "Numerical Methods in Geomechanics", Stuttgart, Sept. 1987
- /2/ Hein, H.J.
Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat
Dissertation RWTH Aachen, 1991
- /3/ Breidenich, G.
Gekoppelte Berechnung der thermomechanischen Feldgrößen in einer Steinsalzformation infolge der Einlagerung radioaktiver wärmefreisetzender Abfälle
Dissertation RWTH Aachen, 1994
- /4/ Korthaus, E., Schwarzkopf, W.
Eine triaxiale Meßeinrichtung zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus
KfK 5211, 1993
- /5/ W. Bechthold et. al.:
Large-Scale Test on In-Situ Backfill Properties and Behavior Under Reference Repository Conditions - The Demonstration Experiment 'Thermal Simulation of Drift Emplacement' - Workshop on Sealing of Radioactive Waste Repositories, Braunschweig, 22-25 May 1989

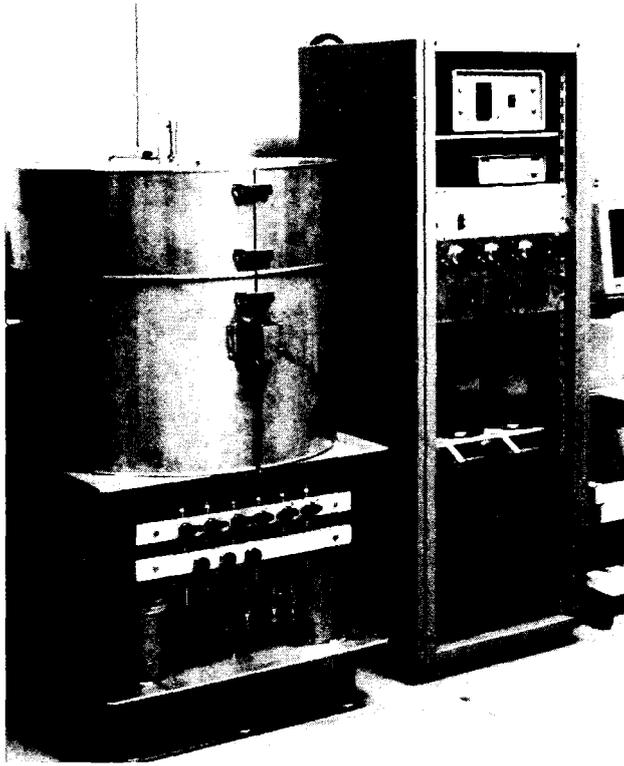


Abb. 1 Gesamtansicht der triaxialen Prüfeinrichtung

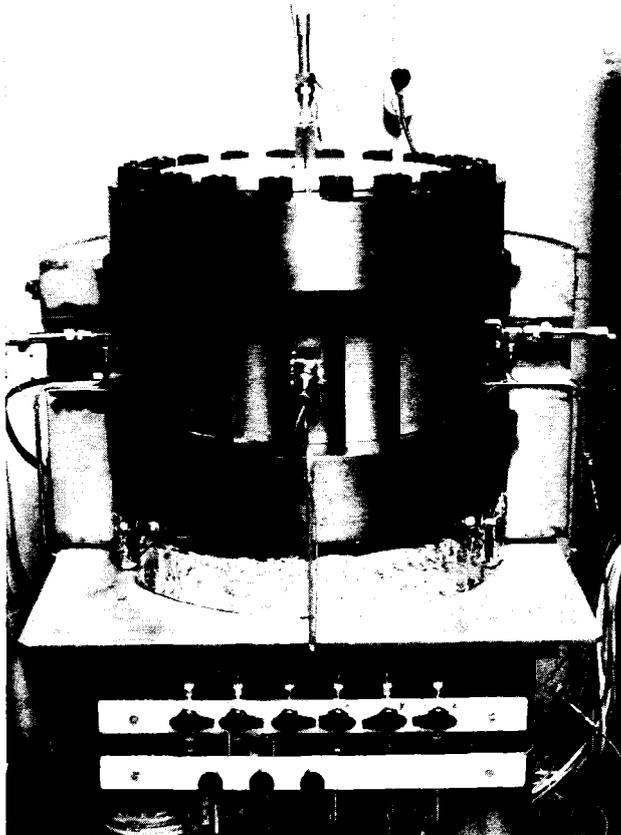


Abb. 2 Ansicht der triaxialen Prüfzelle bei abgenommener Wärmeisolation

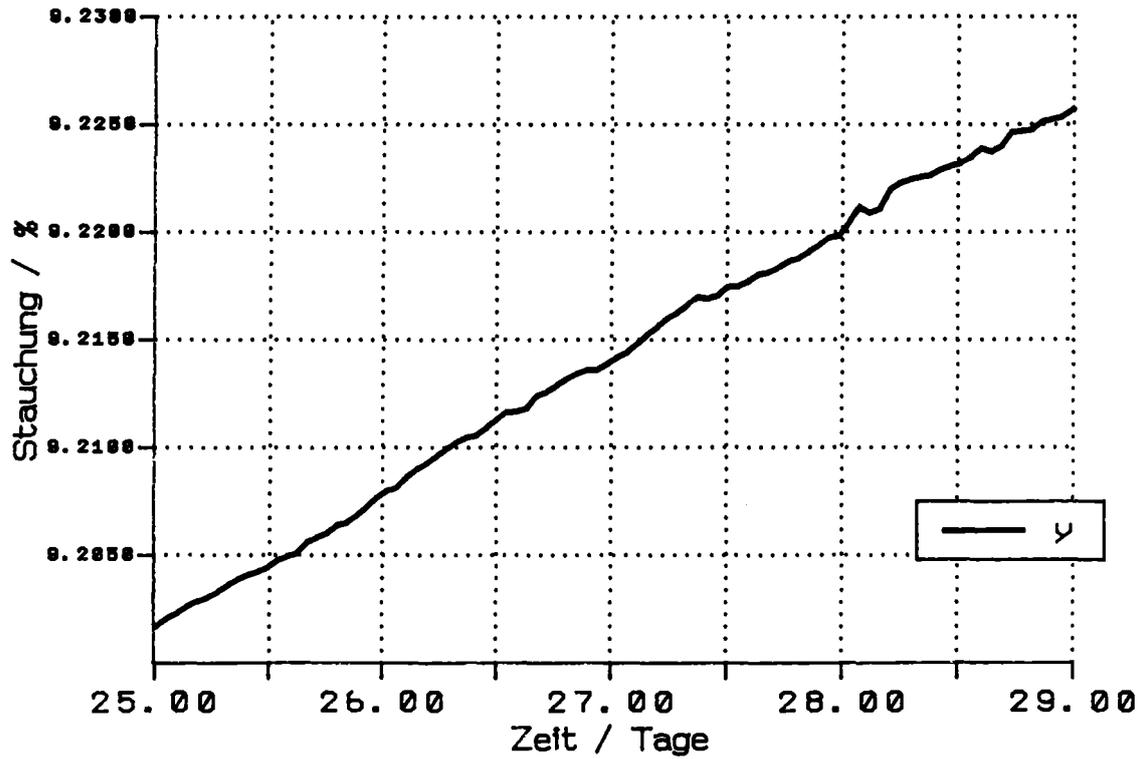


Abb. 3 Zeitverlauf der mit der ÖMB-Methode gemessenen Stauchung in y-Richtung während einer Kriechphase des Versuchs V140494 (150°C)

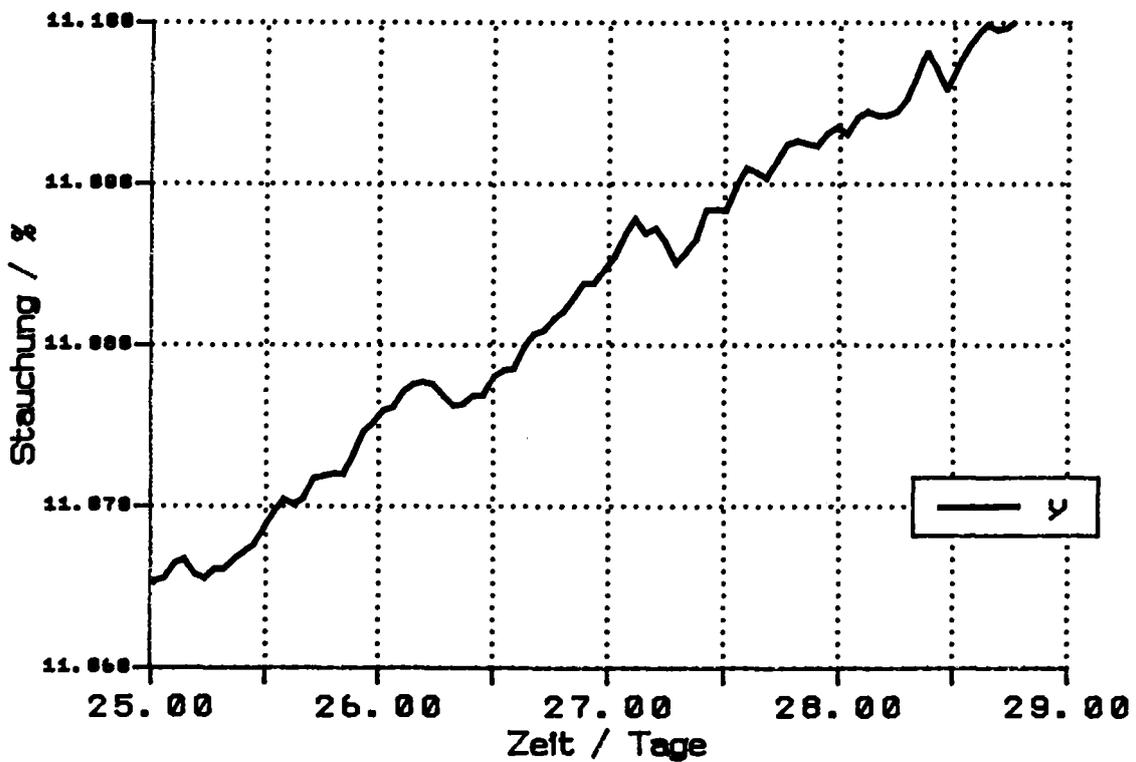


Abb. 4 Zeitverlauf der mit der IWA-Methode gemessenen Stauchung in y-Richtung während einer Kriechphase des Versuchs V140494 (150°C)

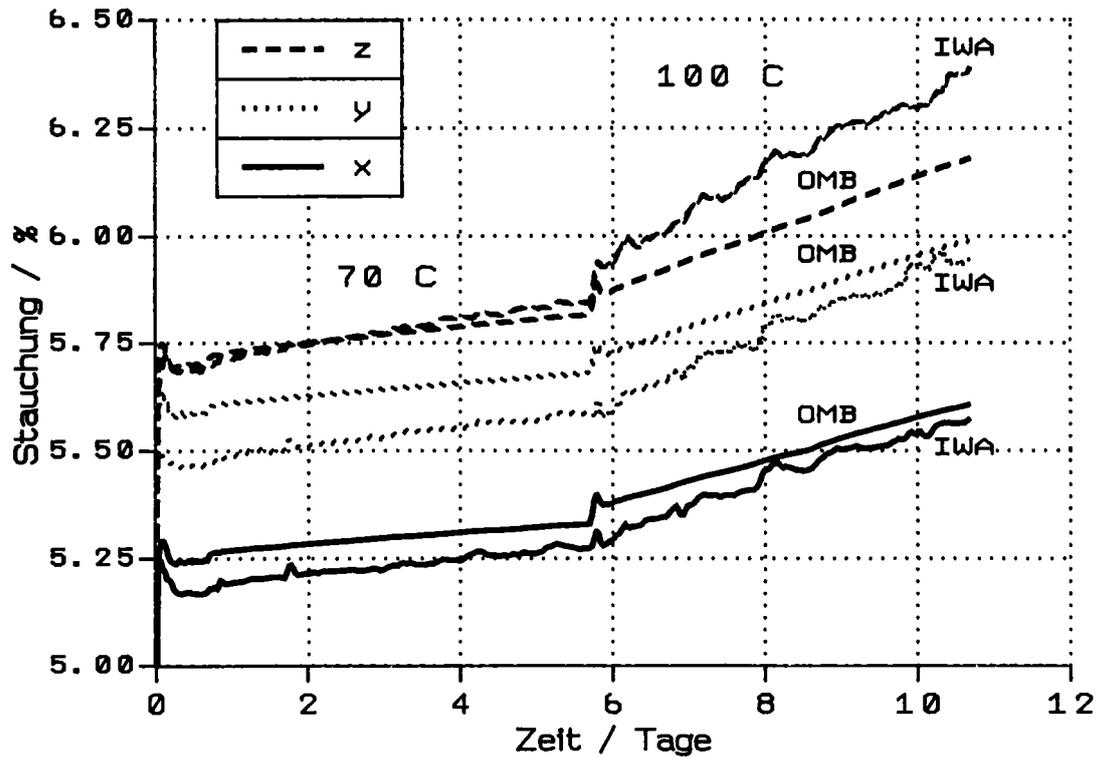


Abb. 5 Verformungsgeschichte des Versuchs V010693 (70°C, 100°C, ÖMB und IWA)

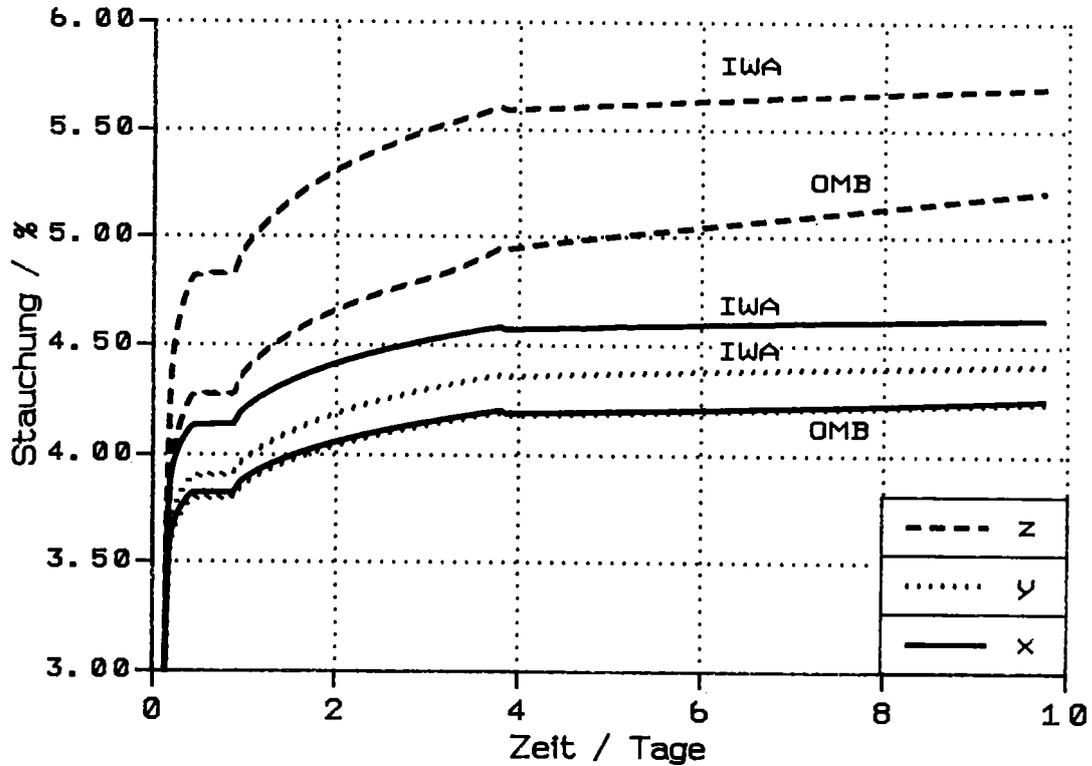


Abb. 6 Verformungsgeschichte des Versuchs V280194 (50°C, ÖMB und IWA)

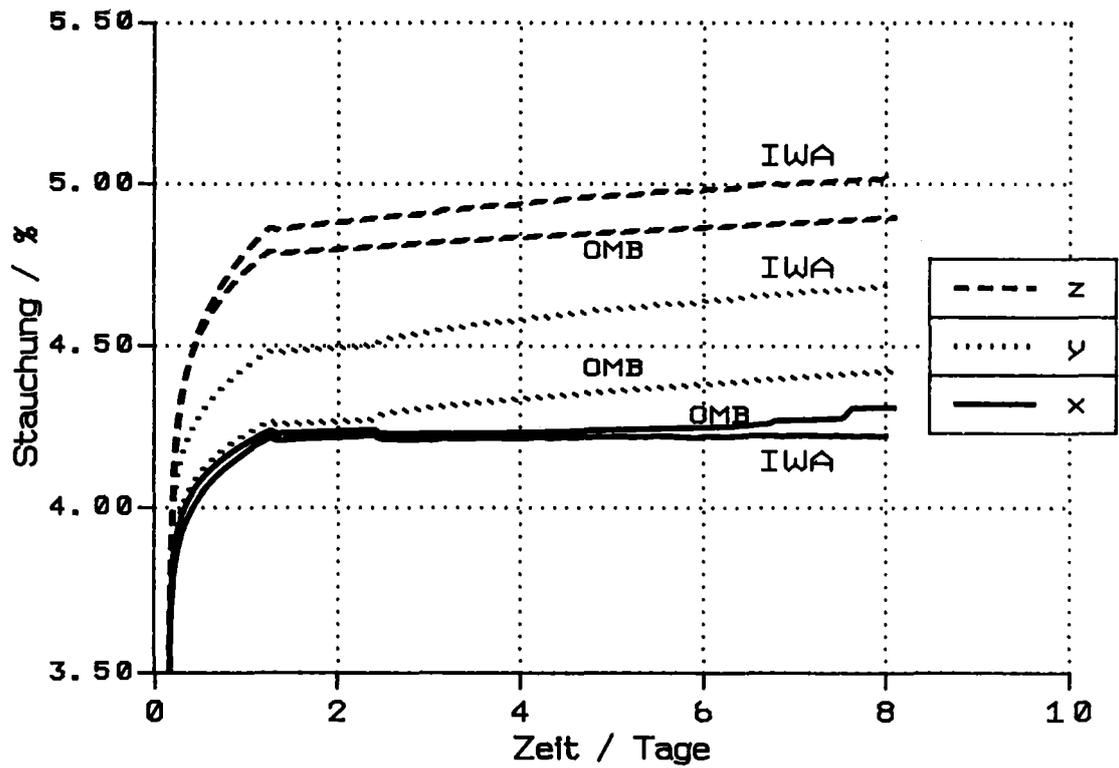


Abb. 7 Verformungsgeschichte des Versuchs V240294 (50°C, ÖMB und IWA)

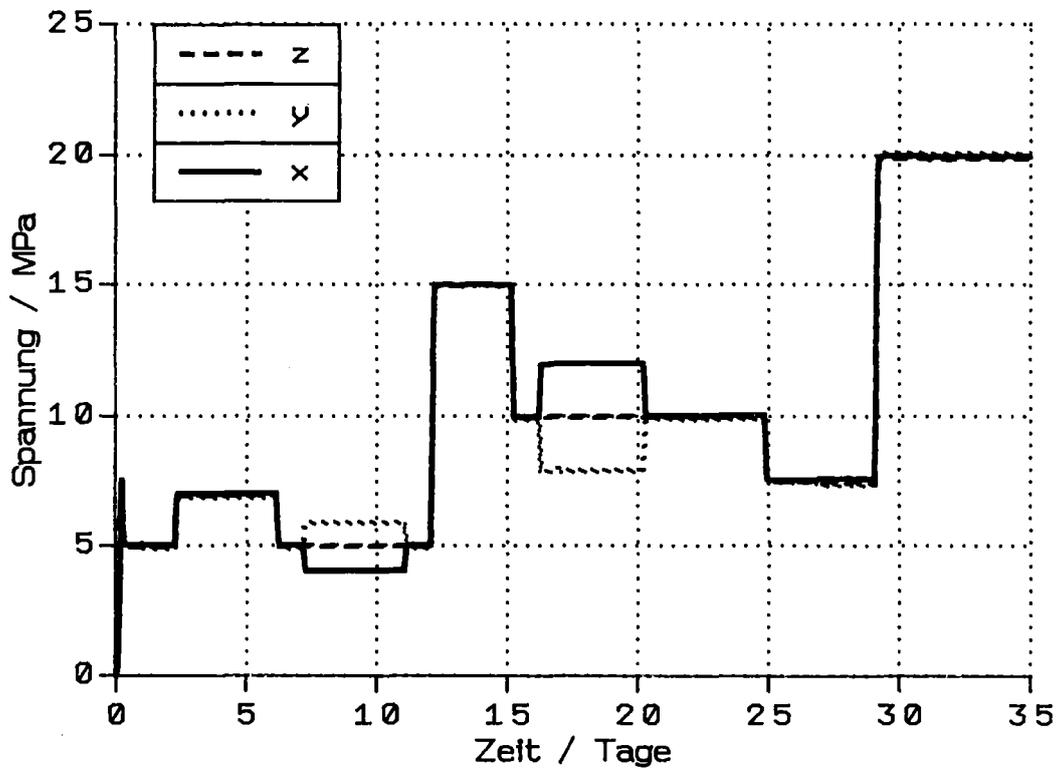


Abb. 8 Belastungsgeschichte des Versuchs V140494 (150°C)

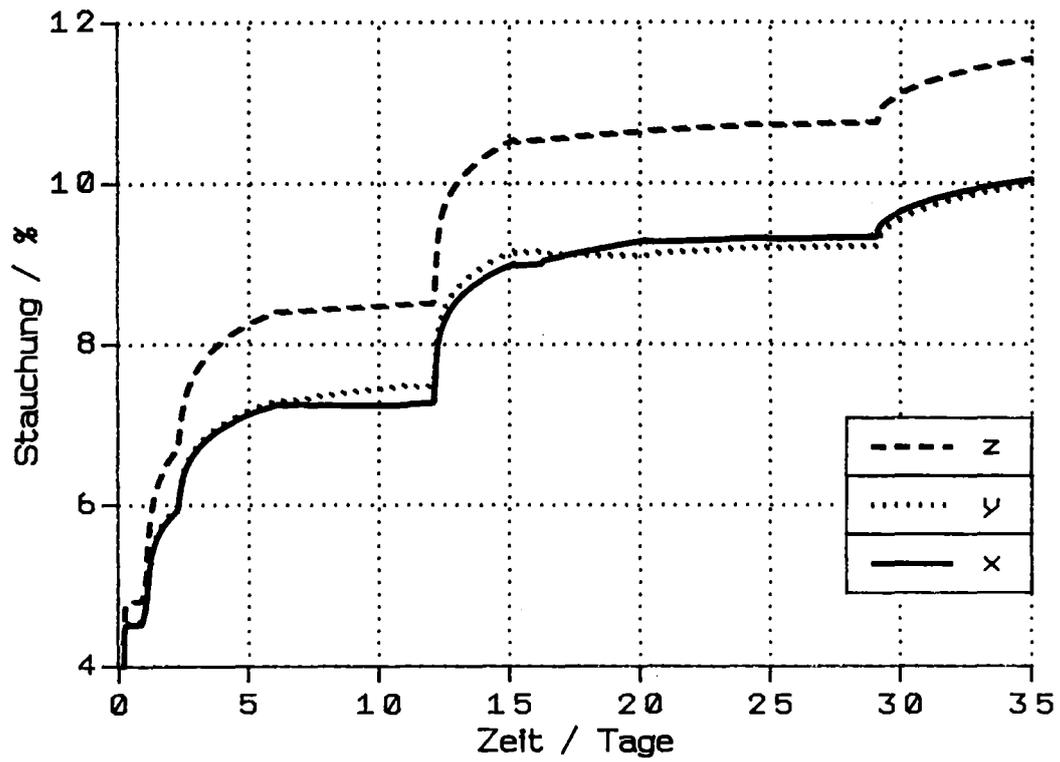


Abb. 9 Verformungsgeschichte des Versuchs V140494 (150°C, ÖMB-Messung)

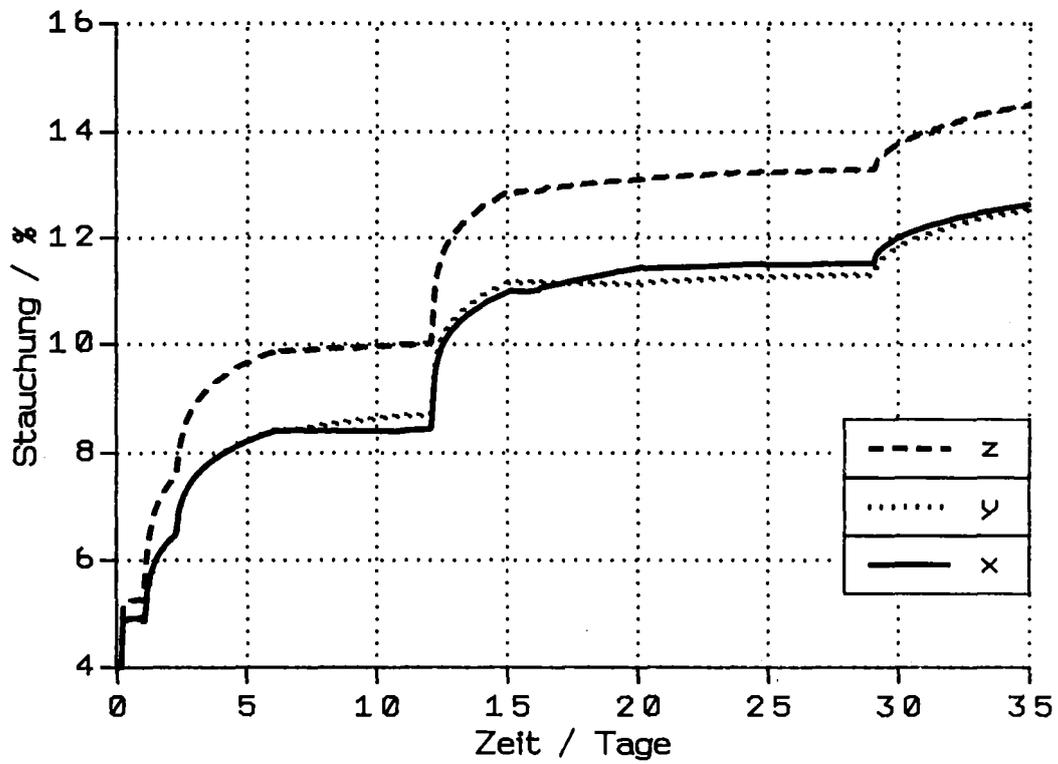


Abb. 10 Verformungsgeschichte des Versuchs V140494 (150°C, IWA-Messung)

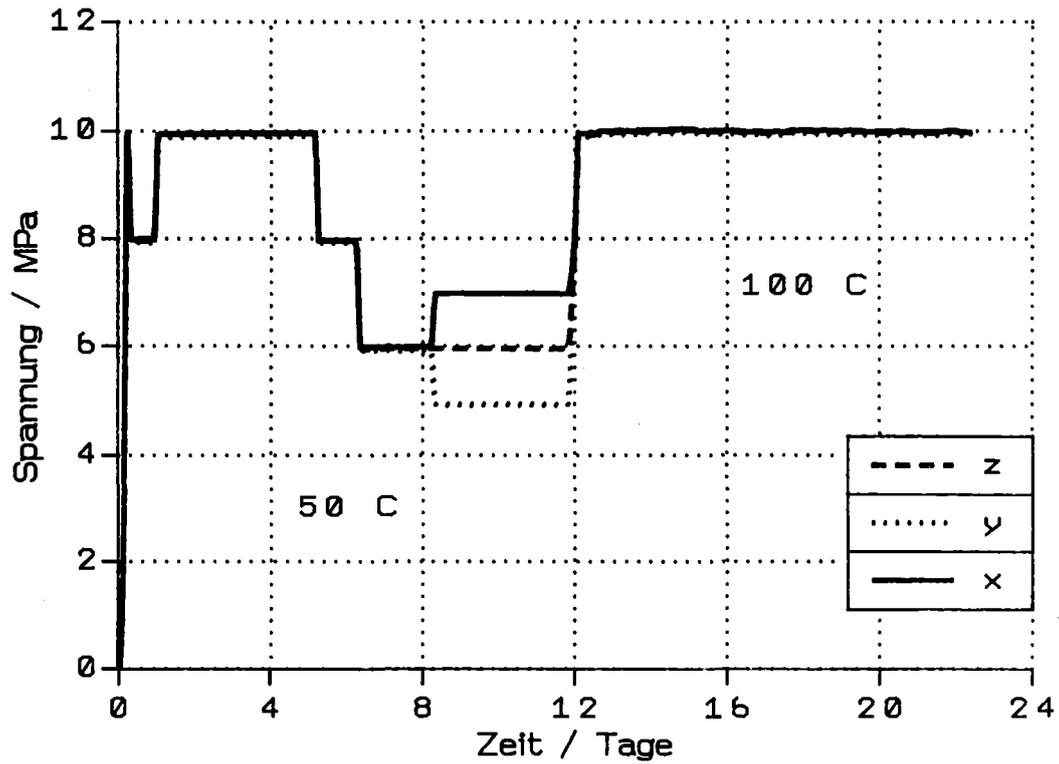


Abb. 11 Belastungsgeschichte des Versuchs V060794 (50°C, 100°C)

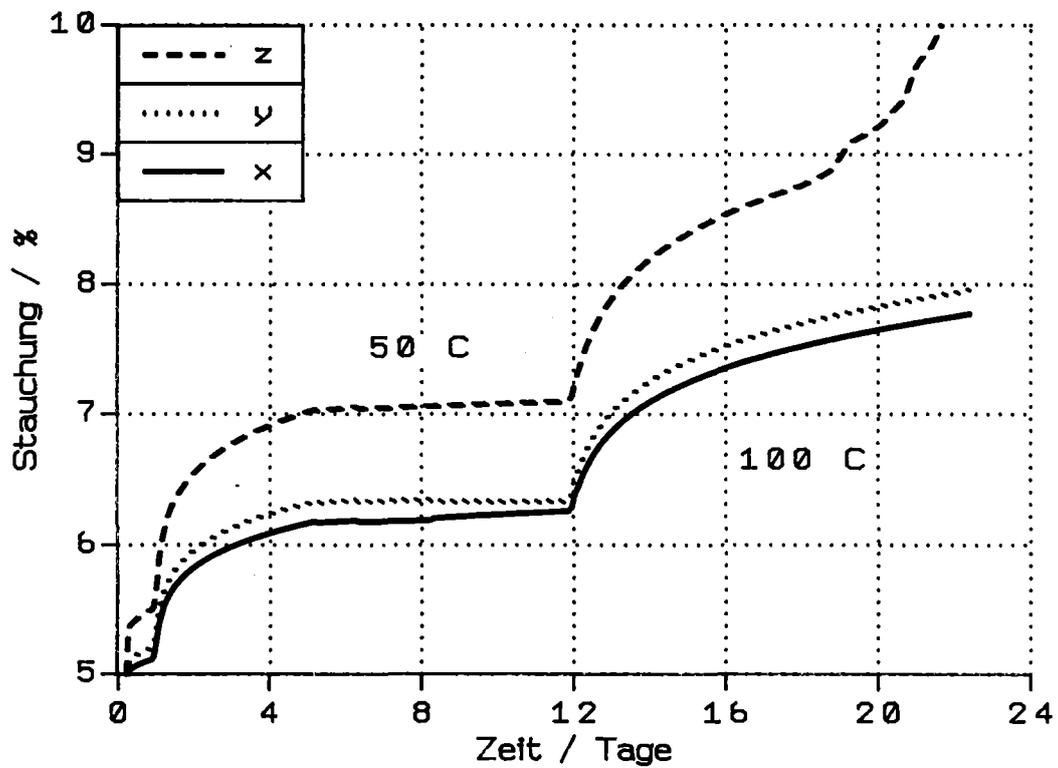


Abb. 12 Verformungsgeschichte des Versuchs V060794 (50°C, 100°C, ÖMB-Messung)

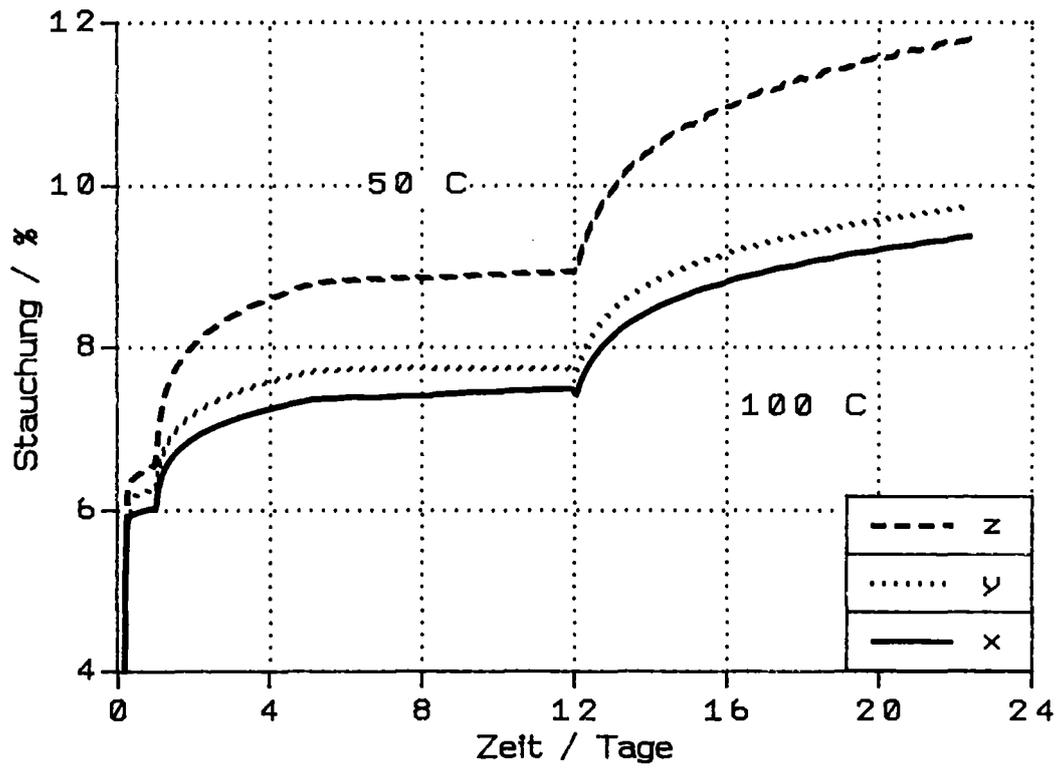


Abb. 13 Verformungsgeschichte des Versuchs V060794 (50°C, 100°C, IWA-Messung)