

KfK 5211
Juli 1993

Eine triaxiale Meßeinrichtung zur Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus

E. Korthaus, W. Schwarzkopf
Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Institut für Nukleare Entsorgungstechnik

KfK 5211

**Eine triaxiale Meßeinrichtung zur Untersuchung des
Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus**

E. Korthaus
W. Schwarzkopf

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

Für die Untersuchung des Kompaktierungsverhaltens von Salzgrus, das in den deutschen Endlagerkonzepten für hochradioaktive Abfälle und abgebrannte Brennelemente eine wichtige Rolle als Versatzmaterial für die Resthohlräume spielt, wurde eine triaxiale Meßeinrichtung entwickelt und in Betrieb genommen. Die Prüfkammer dieser Anlage weist einen würfelförmigen Innenraum mit einer Kantenlänge von 250 mm auf. Sie ist für eine maximale Druckbelastung von 35 MPa ausgelegt. Die Druckbelastung des Prüfmaterials und die Messung der Verformung erfolgt unabhängig in den 3 Raumrichtungen über 6 an den Innenwänden der Prüfkammer angeordnete hydraulische Druckkissen aus Edelstahlblech, die für jede Messung erneuert werden. Der Hydraulikteil für die Beaufschlagung der Druckkissen ist primär für druckgeregelte Versuche (Kriechversuche) ausgelegt, jedoch können auch wegegeregelte Versuche durchgeführt werden. Die Bestimmung der den Druckkissen zugeführten Mengen an Hydraulikflüssigkeit erfolgt mit hoher Genauigkeit, so daß damit die Messung sehr kleiner Verformungsraten, wie sie in einem Endlager in einer Steinsalzformation zu erwarten sind (ca. $10^{-9}/s$), möglich ist.

Eine zusätzliche Messung der Verformungsraten mit Hilfe von induktiven Wegaufnehmern, die die zentrale Auslenkung der Druckkissen erfassen, ist in Erprobung.

Bei Raumtemperatur durchgeführte Testmessungen belegen die Funktionstüchtigkeit der Meßeinrichtung. Die Ergebnisse von Messungen der zeitabhängigen Kompaktierung bzw. Verformung von Salzgrus bei verschiedenen hydrostatischen und deviatorischen Spannungszuständen (3 - 17 MPa) und Endlager-relevanten Kompaktierungsraten werden dargestellt.

Erste Versuche bei Temperaturen bis 150°C zeigten, daß die ungeschützten Druckkissen auf Grund des am Prüfmaterial adsorptiv gebundenen Wassers sehr schnell durch Salzlaugekorrosion angegriffen werden und undicht werden. Mit der Entwicklung eines wirksamen Korrosionsschutzes für die Druckkissen wurde begonnen.

A triaxial measuring apparatus for the investigation of the consolidation behaviour of crushed salt

Abstract

A triaxial testing apparatus has been developed for the investigation of the consolidation behaviour of crushed salt which plays an important role as a backfill material in German disposal plant concepts for high level radioactive waste or spent fuel elements. The apparatus has a cubic testing volume of 250 mm side length and is designed for a maximum pressure loading of 35 MPa. The stress loading of the test material and the measurement of the strains are performed independently in the 3 spatial directions with the aid of 6 hydraulic pressure pads mounted at the walls of the testing volume. The pressure pads are made of stainless steel sheets. They are replaced for each new experiment. The hydraulic device for the supply of the pressure pads is primarily designed for pressure controlled experiments (creep tests), but displacement controlled tests can be performed too. The amounts of hydraulic liquid supplied to the pressure pads are registered with high accuracy, such that very low consolidation rates can be measured as they are expected to occur in nuclear waste repositories in salt formations (about $10^{-9}/s$).

An additional technique for the measurement of the strain rates is installed and is being tested. Here the central deformation of the pressure pads is registered with the aid of 6 inductive linear displacement gages.

Several tests performed at room temperature have demonstrated the functioning of the apparatus. It is reported about the results of measurements of the time dependent consolidation and deformation at various hydrostatic and deviatoric stress states (3 - 17 MPa) and at consolidation rates comparable to repository conditions.

First tests performed at elevated temperatures (150°C) have shown that due to the presence of adsorbed water in the test material the unprotected pressure pads are rapidly attacked by brine corrosion and get untight. Experiments with a corrosion protection for the pressure pads are under way.

Inhaltsverzeichnis	Seite
Zusammenfassung	
1. Einleitung	1
2. Beschreibung der Meßeinrichtung	4
3. Erste Meßergebnisse	5
4. Diskussion und Ausblick	7
5. Danksagung	8
6. Literatur	9
7. Abbildungen	11
Anhang	21
A1 Aufbau und Fertigung der Druckkissen	21
A2 Technische Beschreibung der Prüfeinrichtung	22
Abbildungen	25

1. Einleitung

Das deutsche Konzept zur Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen und abgebrannten Brennelementen in einer Steinsalzformation sieht die Verfüllung der Resthohlräume in den Lager- und Beschickungsstrecken mit granularem Salz (Salzgrus), das beim Auffahren des Grubengebäudes anfällt, vor. Dieses Versatzmaterial erfährt durch die Konvergenz der Strecken unter dem Einfluß des Gebirgsdrucks und der erhöhten Temperaturen im Lagerbereich eine Kompaktierung, die längerfristig zu einer geringen Restporosität und entsprechend geringer Permeabilität für Flüssigkeiten und Gase führt. Das Ausmaß und der zeitliche Verlauf dieses Vorgangs ist für die Sicherheit des Endlagers von wesentlicher Bedeutung, da dadurch im Falle eines nicht auszuschließenden Laugenzutritts sowohl die Menge als auch die Geschwindigkeiten der in die Strecken gelangenden und von dort wieder ausgepreßten Laugen maßgeblich beeinflußt werden.

Weitere für die Endlagersicherheit bedeutsame Wirkungen des Versatzmaterials liegen in der Tragfähigkeit bzw. der Eigenschaft, Kräfte aufzunehmen und zu verteilen. So hat der Versatz eine stabilisierende Wirkung auf das Salzgestein in unmittelbarer Streckenumgebung und kann einer Rißbildung entgegenwirken bzw. die Ausheilung von Rissen und Auflockerungen fördern. Im Falle der Streckenlagerung von abgebrannten Brennelementen bestimmen die Eigenschaften des Versatzmaterials Größe und Verteilung der mechanischen Belastungen der Endlagergebände. In diesem Fall wird auch die Höhe der maximal erreichten Salztemperatur (an der Auflagefläche der Gebände) maßgeblich durch das Versatzmaterial bzw. den Verlauf der Versatzkompaktierung beeinflußt.

Zur Beurteilung der Endlagersicherheit sowie zur Optimierung der Konzepte werden Modellrechnungen benötigt, die eine Extrapolation der Ergebnisse von Labor- und in situ Experimenten auf die großräumigen Verhältnisse im Endlager und auf lange Zeiten ermöglichen müssen. Für das Verhalten des Versatzmaterials in den Strecken sind dies thermomechanische Rechnungen, mit denen die Temperaturen, die Spannungsentwicklung und die Verformungen im Endlagerbereich ermittelt werden können.

Für diese Rechnungen wird ein Stoffgesetz zur Beschreibung des Kompaktierungsverhaltens des Versatzmaterials unter den im Endlager zu erwartenden Bedingungen, d.h. bei Druckbelastungen bis ca. 20 MPa und Temperaturen bis 200°C, benötigt. Dieses Stoffgesetz muß wegen der grossen zu betrachtenden Zeiträume bzw. der niedrigen, durch die Streckenkonvergenz verursachten Kompaktierungsraten speziell das zeitabhängige Kriechverhalten des Materials, das vom viskoplastischen Verhalten der Steinsalzpartikel herrührt, berücksichtigen. Es muß weiter neben dem hydrostatischen Kompaktierungsverhalten auch das komplexe Verformungsverhalten unter deviatorischen Belastungen in hinreichender Näherung beschreiben können, was sich insbesondere anhand der folgenden 3 Aufgabenstellungen einsehen lässt:

- Untersuchung der Verhältnisse in anfangs nicht vollständig verfüllten oder aufgrund von Temperaturgradienten lokal unterschiedlich schnell konvergierenden Streckenabschnitten
- Ermittlung der tatsächlichen Stützwirkungen des Versatzmaterials auf Streckenwände, -sohlen und -firste
- Ermittlung der nichthydrostatischen Druckbelastung der Endlagergebände bei der Streckenlagerung

Für die mathematische Formulierung eines derartigen allgemeinen Stoffgesetzes für Salzgrus liegen bisher nur sehr wenige Vorschläge vor. Die in /1/ angegebene Beziehung basiert auf einem für geologische Materialien verwendeten Ansatz, der für die Berücksichtigung des Kriechverhaltens erweitert wurde. In /2/ werden Beziehungen für das hydrostatische sowie das deviatorische Verhalten angegeben, die zum einen empirische, an Laborergebnisse angepaßte Formeln darstellen, zum anderen mit Hilfe einfacher Modellvorstellungen aus dem Verformungsverhalten der einzelnen Salzpartikel abgeleitet wurden. Bei /3/,/4/ werden entsprechende Stoffgesetzformulierungen aus einem allgemeinen Prinzip zum Verhalten granularer Materialien abgeleitet.

Gemeinsam ist diesen Ansätzen, daß sie eine Reihe von Funktionen bzw. Parametern enthalten, die den Einfluß der Zustandsgrößen des Materials, d.h. des Spannungszustandes, des Kompaktierungsgrads und der Temperatur auf die Verformungsrate beschreiben.

Für die prinzipielle Überprüfung dieser Stoffgesetzformulierungen sowie die quantitative Festlegung der verschiedenen Parameter werden ausführliche Labormessungen zum allgemeinen Verformungsverhalten des Versatzmaterials benötigt.

Die bisher vorliegenden Meßergebnisse sind aus verschiedenen Gründen nur bedingt für diesen Zweck verwendbar. 2 Arten von Versuchen wurden bisher durchgeführt:

- Oedometerversuche bzw. Kompressionsversuche mit verhinderter Seitendehnung
- Konventionelle Triaxialversuche (Manteldruck-Versuche)

Beim klassischen Oedometerversuch wird das Prüfmaterial in einem zylindrischen Druckgefäß durch Stempeldruck einachsig komprimiert. Gemessen wird lediglich die Axialstauchung. In einer erweiterten Form dieses Versuchs, dem sog. Kompressionsversuch mit verhinderter Seitendehnung, wird durch zusätzliche Spannungsmessungen der Einfluß der Wandreibungskräfte, die die Messung beträchtlich verfälschen können, eliminiert.

Diese Versuche haben jedoch stets den prinzipiellen Nachteil, daß die Proben nur in einer (axialen) Richtung belastet und verformt werden und die sich dabei einstellende Radialspannung, die i. a. wesentlich niedriger bleibt als die aufgeprägte Axialspannung, dabei nicht gemessen wird. Diese Messungen sind daher nicht nur für die Ermittlung des deviatorischen Stoffverhaltens unbrauchbar, sondern auch für eine Interpretation hinsichtlich des hydrostatischen Kompaktierungsverhaltens problematisch.

Verschiedene Messungen dieser Art wurden an Salzgrus aus der Schachtanlage Asse durchgeführt, sowohl bei Raumtemperatur /5/,/6/ als auch bei erhöhten Temperaturen /7/,/8/. Das Probenmaterial unterschied sich dabei stark in der Korngrößenverteilung und im Feuchtigkeitsgehalt.

Bei den konventionellen Triaxial-Versuchen befindet sich das Prüfmaterial in einer zylindrischen Manschette aus flexiblem Material. An den Stirnflächen wird die Probe durch die Druckstempel einer Hydraulikpresse eingespannt. Über die flexible Manschette, die an den Druckstempeln gegenüber dem Probenmaterial abgedichtet ist, wird mit Hilfe von Hydraulikflüssigkeit die Radialspannung aufgebracht. Gemessen werden die Axial- und die Radialspannung, die axiale Längenänderung, sowie, wenn auch nicht unproblematisch und nicht immer durchgeführt, die radialen Querschnittsänderungen.

Diese Versuche sind prinzipiell geeignet, die für die Stoffgesetzermittlung benötigten Meßwerte zu liefern. Insbesondere kann mit ihnen auch eine genauere Bestimmung des hydrostatischen Kompaktierungsverhaltens erfolgen, da hier im Gegensatz zu den Ödometerversuchen der gesamte Spannungszustand der Proben bekannt ist bzw. hydrostatisch gewählt werden kann.

Nachteilig für die Untersuchung des deviatorischen Stoffverhaltens ist bei dieser Methode, daß nur 2 unabhängige Belastungen - axial und radial - vorgegeben werden können, und daß bezüglich dieser Richtungen bereits von der Methode her eine zweifache Unsymmetrie besteht: Die axiale Lastaufbringung über starre Druckstempel hat eine unvermeidliche Wandreibung zur Folge, während bei der Aufbringung der Radialspannung auf die Probe über die flexible Manschette im wesentlichen keine Wandreibung wirksam wird. Außerdem wird beim Einfüllen des grobkörnigen Materials, das zur Erzielung einer gleichmässigen Dichte in mehreren Lagen erfolgen muß, zwangsläufig eine gewisse Materialanisotropie erzeugt. Beide Effekte bewirken ein unterschiedliches Verformungsverhalten in axialer und radialer Richtung bereits bei nicht deviatorischer Belastung.

Messungen zum hydrostatischen Kompaktierungsverhalten von Salzgrus mit und ohne Laugenzusatz unter Verwendung einer Triaxial-Anlage wurden bisher in USA durchgeführt /9/,/10/. Zum Kompaktierungsverhalten unter deviatorischer Belastung liegen bisher nur sehr wenige Ergebnisse vor. Sie wurden überwiegend bei sehr niedrigen Radialspannungen und bei Raumtemperatur durchgeführt /5/,/11/ und sind aufgrund der Art der Lastaufbringung als Versuche zum Kurzzeitverhalten zu charakterisieren. Die Interpretation ist zum Teil dadurch begrenzt, daß die radiale Verformung aufgrund der technischen Schwierigkeit nicht gemessen wurde /5/. Messungen zum deviatorischen Stoffverhalten bei Endlager-relevanten Verformungsraten sind bisher nicht bekannt. Lediglich der Einfluß einer schwach deviatorischen Belastung auf die (volumetrische) Kompaktierung wurde an Salzgrus mit Laugenzusatz in 2 vorläufigen Versuchen untersucht /12/. Die Ergebnisse sind widersprüchlich und werden von den Autoren selbst stark in Frage gestellt.

Weitere Versuche dieser Art scheiterten u.a. daran, daß die zur Verfügung stehenden Prüfkörper im Verhältnis zur Korngröße des zu untersuchenden Materials relativ klein waren, was zu ungünstigen Verformungen der Prüfkörper führte /13/.

Aufgrund dieser unbefriedigenden Situation wurde eine neuartige triaxiale Messeinrichtung entwickelt mit dem Ziel, die für die Formulierung eines allgemeinen Stoffgesetzes für Salzgrus notwendigen Messungen durchführen zu können. Dabei wurde die Erfüllung von 5 Hauptforderungen angestrebt:

1. Echt 3-dimensionale Geometrie (würfelförmiges Prüfvolumen)
2. Triaxiale Lastaufbringung symmetrisch in den 3 Raumrichtungen (≥ 30 MPa)
3. Ausreichende Größe der Prüfkammer (im Vergleich zur Korngröße)
4. Messung der Verformungsraten in den 3 Raumrichtungen mit hoher Genauigkeit
5. Betriebsfähigkeit bei Temperaturen bis 200°C

Die Punkte 1 und 2 werden durch die Konzeption der Prüfzelle und die Art der Lastaufbringung in guter Näherung erfüllt. Allerdings kann durch die oben erwähnte, vom Einfüllvorgang herrührende Anisotropie des Probenmaterials eine gewisse Unsymmetrie der vertikalen gegenüber den beiden horizontalen Richtungen hervorgerufen werden.

Der Forderung 3 wird durch die gewählten Abmessungen der Prüfkammer in hinreichendem Maße Rechnung getragen.

Der Punkt 4 ist durch die gewählten Techniken (2 unabhängige Meßverfahren) prinzipiell erfüllt.

Zu Punkt 5 sind noch Zusatzaßnahmen zum Korrosionsschutz der Druckkissen und entsprechende Versuche erforderlich.

2. Beschreibung der Meßeinrichtung

Das Kernstück der Meßeinrichtung besteht aus einem Druckgefäß mit würfelförmigem Innenraum (Kantenlänge von 250 mm), an dessen 6 Seitenflächen je 1 hydraulisches Druckkissen aus Edelstahl angebracht wird (Abb.1). Das Druckgefäß, das für Drücke bis 35 MPa ausgelegt ist, dient lediglich als mechanisches Widerlager und braucht daher nicht dicht zu sein. Die Druckkissen, die für jeden Versuch erneuert werden, sind in ihrer Materialstärke so dimensioniert, daß sie einerseits möglichst flexibel sind, andererseits aber die in dem interessierenden Meßbereich auftretenden Belastungen noch aushalten. Bei dem bisher verwendeten Werkstoff 1.4301 ist dies mit Materialstärken von 0.15 - 0.3 mm zu erreichen. Es wurden bisher 2 Arten von Druckkissen gefertigt und eingesetzt. Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus der Druckkissen und der Fertigungsverfahren wird im Anhang A1 gegeben.

Die weiteren Bestandteile der Meßeinrichtung sind die 3 hydraulischen Pumpen für die Beaufschlagung der 6 Druckkissen, von denen je 2 gegenüberliegende zusammengefaßt sind, die elektronischen Druckmeßgeber in den 3 hydraulischen Zweigen, die elektronische Regelung zur Konstanthaltung des Drucks in den Druckkissen, die 3 elektronischen Waagen zur Bestimmung der den Druckkissen zugeführten Menge an Hydraulikflüssigkeit, sowie die PC-gestützte Datenerfassungseinrichtung, die auch gewisse Kontroll- und Steuerungsfunktionen ausüben kann.

Für die zusätzliche Messung der zentralen Auslenkungen der Druckkissen und damit der entsprechenden Verformungen des Prüfmaterials wurden 6 lineare induktive Wegaufnehmer installiert. Dieses Meßverfahren befindet sich z.Z. in der Erprobung.

Als weiterer Bestandteil der Anlage ist eine hochstabil (0.1°C) geregelte Beheizung der Prüfzelle für Temperaturen bis 200°C zu nennen.

Die Abb.2 zeigt eine Gesamtansicht der Meßeinrichtung. Eine ausführlichere technische Beschreibung der Anlage wird in Anhang A2 gegeben.

Die registrierten Meßgrößen, die Drücke und die den Druckkissen zugeführten Mengen an Hydraulikflüssigkeit, entsprechen bis auf kleine Korrekturen den eigentlich interessierenden Größen, d.h. den dem Prüfkörper aufgeprägten Spannungen und den über die Querschnitte gemittelten Verformungen des Prüfkörpers in den 3 Raumrichtungen.

Die Verformungseigenschaften der Druckkissen ergeben im Fall einer annähernd hydrostatischen Lastaufbringung nahezu ideale Verhältnisse an den Kanten des Prüfkörpers. Im Falle stark einseitiger Belastungen treten durch die Verkürzung der Druckkissen gewisse Randeffekte auf, die als Korrekturen bei der Auswertung der Messungen zu berücksichtigen sind (Abb.3).

Eine ständige Abweichung von der Idealgeometrie wird durch die abgeschrägten Ecken der Druckkissen und die Ausfüllung der Ecken des würfelförmigen Prüfraumes mit tetraederförmigen Formteilen hervorgerufen (siehe Anhang). Dieser Effekt ist jedoch nicht gravierend und kann ebenfalls bei der Auswertung der Messungen berücksichtigt werden.

Eine wichtige Frage bei diesem Meßverfahren wie auch bei den anderen genannten Methoden ist die Wandreibung, durch die eine korrekte Auswertung und Interpretation der Messungen eingeschränkt wird. Bei der hier verwendeten Methode führt die Wandreibung zu Abweichungen von der idealen Probengeometrie, d.h. der Quaderform, dadurch daß Wölbungen der Seitenflächen aufgrund einer ungleichmäßigen Spannungsverteilung auftreten. Bei den bisher durchgeführten Versuchen war dies jedoch nur in geringem Maße zu beobachten (ca. 10 % Verformungsdifferenz zwischen dem Zentrum und der Randzone). Dies ist offensichtlich darauf zurückzuführen, daß sich das dünne Druckkissenmaterial durch Faltenbildung entsprechend der Stauchung des Probenmaterials verkürzt und dazu wesentlich geringere Tangentialspannungen benötigt als die, die an einer starren Wand (ohne spezielle Gleitschichten) aufgrund von Reibungskräften auftreten würden. Diese Stauchung durch Faltenbildung wird durch eine Vorprägung der Druckkissenfrontfläche erleichtert (siehe Anhang A1).

Die Abb.4 und 5 zeigen ein Druckkissen, das eine Auslenkung von ca. 15 mm entsprechend einer Stauchung des Prüfguts von 12 % erfahren hat, sowie eine kompaktierte Salzgrusprobe, die durch eine allseitige Belastung von 20 MPa um etwa 20 % kompaktiert wurde.

Für die Durchführung der Versuche wird die Prüfkammer bei abgenommener Deckplatte nach Anbringung der Druckkissen an der Bodenfläche und an den Seitenwänden mit dem Prüfmaterial befüllt. Dies erfolgt in 6 definierten Lagen, wobei durch Abwägen des Materials und Vorkompaktierung auf die jeweilige Solldicke die gewünschte Anfangsporosität realisiert wird. Nach Auflegen des oberen Druckkissens wird die Kammer mit der Deckplatte verschlossen.

Für die Durchführung von Versuchen mit stark deviatorischer Belastung von Anfang an bzw. für die Simulation von Oedometerbedingungen muss dafür gesorgt werden, daß die Druckkissen an den Seitenwänden vor dem Einfüllen des Probenmaterials bereits etwas vorverformt und mit Hydraulikflüssigkeit befüllt sind, entsprechend einer Verkürzung der Horizontaldurchmesser der Prüfkammer um einige Prozent. Dadurch wird die Messung einer Ausdehnung des Prüfmaterials bzw. eine Druckmessung in diesen Richtungen ermöglicht. Technisch kann dies durch Druckbeaufschlagung der Kissen bei einer Ausfüllung des Kammervolumens mit einem kompakten Körper erreicht werden. Für das Einbringen des Probenmaterials wird in diesem Fall ein Stützrahmen benötigt, der während des Befüllvorgangs sukzessive herausgezogen wird.

3. Erste Meßergebnisse

Im folgenden werden die Ergebnisse von 2 Messungen an Salzgrus bei Raumtemperatur vorgestellt. Der Versuch V130392 war vor allem als Demonstration des Meßverfahrens gedacht und sollte gleichzeitig Informationen über die Spannungsverhältnisse bei Oedometerbedingungen liefern. Der Versuch V090692 war bereits so ausgelegt, daß Meßwerte zum hydro-

statischen und deviatorischen Verformungsverhalten bei Endlager-relevanten Kompaktierungsraten gewonnen werden konnten, d.h. Daten, die zur Anpassung einer Stoffgesetzformulierung herangezogen werden können.

Beide Messungen wurden am sog. Referenzversatz, d.h. Salzgrus aus der Asse, wie er für die Untersuchungen zum Gorleben-Projekt und zu PAE (Projekt Andere Entsorgungstechniken) definiert wurde, durchgeführt. Das Material hatte eine breite Korngrößenverteilung mit einem maximalen Korndurchmesser von 31.5 mm. Der Gehalt an adsorptiv gebundenem Wasser betrug etwa 0.25 Gew.%. Die Anfangsporosität des eingefüllten Probenmaterials wurde durch Vorverdichtung auf 30 % eingestellt.

In beiden Versuchen wurden die sog. Faltkissen (s. Anhang A1) eingesetzt.

Die Abbildungen 6 - 7 zeigen den zeitlichen Verlauf der Spannungen und Verformungen beim Versuch V130392. Nach Aufbringung einer allseitigen Anfangsspannung von 0.3 MPa, die zu Stauchungen von je ca. 2.5 % führte, wurde die Spannung in z-Richtung in 3 Schritten auf 5, 8 und 12 MPa erhöht, während in x- und y-Richtung bis 7 Tage nach Versuchsbeginn die Verformung durch Abschiebern der Druckkissen im wesentlichen konstant gehalten und danach die Spannung auf 10 MPa erhöht wurde. In den Phasen bis 7d stellten sich die Spannungen in x- und y-Richtung auf jeweils etwa 40 % der aufgeprägten z-Spannung ein. Dies ist etwas mehr als in einem vorangegangenen ähnlichem Versuch, bei dem Werte von etwa 30 % gemessen wurden (dort war die Anfangskompaktierung in x- und y-Richtung etwas niedriger). Es ist anzunehmen, daß die Werte bei echten Oedometerbedingungen, d.h. bei verschwindender Anfangsstauchung in Querrichtung, noch niedriger liegen. Dies wird in einem späteren Versuch überprüft werden.

In Abb.8 ist der zeitliche Verlauf der Kompaktierung K, d.h. der Summe der Stauchungen in den 3 Richtungen, im Vergleich zu einer angepaßten Funktion der Form

$$K = a \cdot (\ln t - \ln t_0) + K_0$$

aufgetragen. Dabei ist K_0 die Kurzzeitkompaktierung, die sich nach der Zeit t nach der Last-erhöhung ergibt. Für t_0 wurde hier 1 h gewählt. Dieser funktionale Verlauf entspricht einer $1/t$ - Abhängigkeit der Kompaktierungsrate, was den Beobachtungen bei Messungen anderer Autoren entspricht.

Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Verformungsraten zeigt, daß nach Anhebung der Spannungen in x- und y-Richtung auf 10 MPa die Stauchungsraten in diesen Richtungen höher sind als in der mit 12 MPa belasteten z-Richtung. Dies ist offensichtlich auf ein nicht isotropes Verfestigungsverhalten des Materials zurückzuführen. Nach 12 Tagen wurde noch eine 2-tägige Relaxationsphase angefügt, bei der alle Druckkissen abgeschiebert waren. Man erkennt in Abb.6 die vom Kriechverhalten des Salzgruses herrührende Spannungsabnahme, die in den 3 Raumrichtungen etwa gleich schnell erfolgt.

In den Abbildungen 9 bis 18 sind die Ergebnisse des Versuchs V090692 dargestellt. Bei diesem insgesamt über 49 Tage gelaufenen Versuch wurde das Ziel verfolgt, bei mehreren vorgegebenen Kompaktierungszuständen hydrostatische und deviatorische Spannungen aufzubringen, die zu Endlager-relevanten Verformungsraten führen. Der gewünschte Kompaktierungsgrad wurde dafür durch Aufbringung von deutlich höheren Spannungen während einiger Stunden herbeigeführt.

Um zu überprüfen, inwieweit derartige Zeitrafferversuche realistische Ergebnisse liefern, müssen entsprechende Messungen mit unterschiedlichen Lastpfaden durchgeführt werden, d.h. die Spannungen und Zeiträume, mit denen die angestrebten Kompaktierungsgrade bzw. Porositäten realisiert werden, müssen möglichst stark variiert werden.

In den Abb. 12 und 17 sind die ermittelten Verformungsraten für die 3 Raumrichtungen sowie in Abb. 13 und 18 die Kompaktierungsraten, jeweils für die 1. und 2. Hälfte des Versuchs, aufgetragen. Sie wurden mit Hilfe einer Anpassung von Polynomen 3. Grades an die gemessenen Verformungen während der Kriechphasen ermittelt. Man erkennt hier wie auch in Abb. 10 und 15, daß in den Phasen mit hydrostatischer Lastaufbringung die Verformungsraten in den beiden horizontalen Richtungen sehr ähnlich sind, während in z-Richtung stets deutlich grössere Stauchungen auftreten. Dieser Effekt ist auch in einem früheren Versuch beobachtet worden. Die Erklärung dafür ist vermutlich, daß durch die Art der schichtenweisen Einbringung der Prüfmateriale eine gewisse Anisotropie erzeugt wird, da sich die grösseren, länglich oder flach geformten Salzkörner bevorzugt horizontal ausrichten und damit eine Art Armierung des Granulats gegenüber horizontalen Verformungen darstellen.

In den Darstellungen der Verformungsraten sind in einigen Meßphasen unrealistische Zeitabhängigkeiten zu beobachten ("Überschwingen"). Dies ist im wesentlichen auf eine zu grobe Auflösung bei der Bestimmung der den Druckkissen zugeführten Ölmengen, bedingt durch das bei diesen Versuchen noch relativ große Hubvolumen der Förderpumpen, zurückzuführen. Durch die inzwischen installierten Pumpen mit wesentlich kleinerem Hubvolumen ist dieses Problem gelöst.

Eine vorläufige Auswertung der Kompaktierungsraten ergab, daß eine relativ starke Druckabhängigkeit der Kompaktierungsrate vorliegt (ca. p^5). Ein Vergleich der gemessenen deviatorischen Verformungsraten mit den sekundären Kriechraten von kompaktem Steinalz aus der Asse ergibt, daß diejenigen von Salzgrus etwa um Faktoren von 3000 bis 10^7 grösser sind, bei Porositäten von 13.5 bis 21.5%.

4. Diskussion und Ausblick

Die bisher bei Raumtemperatur durchgeführten Versuche haben gezeigt, daß die neuentwickelte Meßeinrichtung gut geeignet ist, das Kompaktierungsverhalten von Salzgrus unter hydrostatischen und deviatorischen Belastungsbedingungen, wie sie im Endlager zu erwarten sind, zu untersuchen. Insbesondere wurde die Möglichkeit zur Messung kleiner deviatorischer Verformungsraten demonstriert.

Die Wandreibungseffekte scheinen insbesondere bei den bisher überwiegend verwendeten dünnwandigen Druckkissen ("Faltkissen") relativ klein zu bleiben. Die zusätzliche Erfassung der zentralen Auslenkung der Druckkissen wird eine Absicherung der Verformungsmessungen sowie eine bessere Beurteilung der verbleibenden Wandreibungseffekte ermöglichen.

Hauptziel der weiteren Versuche wird es sein, entsprechende Messungen bei erhöhten Temperaturen zu ermöglichen. Dazu muß vor allem ein ausreichender Korrosionsschutz für die Druckkissen realisiert werden. Dieser sollte möglichst so beschaffen sein, daß er das Verformungsverhalten (d.h. der Oberflächenstauchung) der Druckkissen nicht wesentlich beeinträchtigt, so daß auch hier der Einfluß der Wandreibungseffekte klein bleibt.

Weiter werden spezielle Versuche durchgeführt werden mit dem Ziel, extrem deviatorische Belastungen von Anfang an aufzubringen, wobei Ausdehnungen des Prüfmateriale in 1 oder 2

Richtungen auftreten können. Dazu müssen Zusatzmaßnahmen zur Anfangsauslenkung der Druckkissen vor und während der Einbringung des Materials erprobt werden.

Längerfristig ist an die Erweiterung der Meßeinrichtung für Messungen an Salzgrus mit Laugenzusatz (Störfallbedingungen) gedacht, was Zusatzmaßnahmen zur Abdichtung und zum Korrosionsschutz erfordern wird.

5. Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dr. B. Wolters für die Unterstützung bei der Konzipierung und Erstellung der PC-gestützten Datenerfassungsanlage und des Programms zur Auswertung der Meßdaten. Herrn R. Götz danken sie für die wertvolle Hilfe bei der technischen Realisierung der triaxialen Meßeinrichtung.

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/ Sjaardema, G. D., Krieg, R. D.
A Constitutive Model for the Consolidation of WIPP Crushed Salt and its Use in Analyses of Backfilled Shaft and Drift Configurations
SAND87-1977 . UC-70, 1987
- /3/ Hein, H.J.
Entwicklung eines erweiterten Stoffmodells für Versatzmaterial und Einbau in das Finite Elemente Programm MAUS
Abschlußbericht zum Forschungsauftrag 315/07781350/0633 des KfK;
RWTH Aachen, Institut für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft, 1988
- /4/ Hein, H.J.
Ein Stoffgesetz zur Beschreibung des thermomechanischen Verhaltens von Salzgranulat
Dissertation RWTH Aachen, 1991
- /5/ Liedtke, L., Bleich, W.
Convergence Calculations for Backfilled Tunnels in Rock Salt
Computers & Structures Vol.21, No 1/2, pp. 353-378, 1985
- /6/ Gläß, F., Kappei, G., Schmidt, M.W., Schwieger, K., Starke, C., Taubert, E., Wallmüller, R., Walter, F.
Untersuchungen zum Versatz und Verschluß von Kammern und Strecken in einem Endlager im Salz - Abschlußbericht
GSF-Bericht 19/91, 1991
- /7/ Diekmann, N., Stührenberg, D.
Untersuchungen zum Materialverhalten von Versatz unter Berücksichtigung der Wechselwirkung Gebirge/Versatz und anderer Verschlußkomponenten in einem Endlager im Salinar
BGR- Abschlußbericht, KWA 5801/9, 1991
- /8/ Spiers, C.J., Peach, C.J., Brzesowski, R.H., Schutjens, P.M.T.M., Liezenberg, J.L., Zwart, H.J.
Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks
EUR 11848 EN, 1988
- /9/ Holcomb, D.J., Hannum, D.W.
Consolidation of Crushed Salt Backfill Under Conditions Appropriate to the WIPP Facility
SAND82-0630, 1982

- /10/ Holcomb, D.J., Shields, M.E.
Hydrostatic Creep of Crushed Salt With Added Water
SAND87-1990, 1987
- /11/ Ghoreychi, M., Berest, P., Bazargan-Sabet, B.
Thermomechanical Study of the Interaction Between Rocksalt and Crushed Salt
Proceedings of the Joint NEA/CEC Workshop on Sealing of Radioactive Waste
Repositories, Braunschweig, FRG, May 22-25, 1989
- /12/ Zeuch, D.H., Zimmerer, D.J., Shields, M.E.
Interim Report on the Effects of Brine-Saturation and Shear Stress on Consolidation of
Crushed, Natural Rock Salt from the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP)
SAND91-0105 UC-721, 1991
- /13/ Diekmann, N., Stührenberg, D., (BGR Hannover)
Persönliche Mitteilung
-

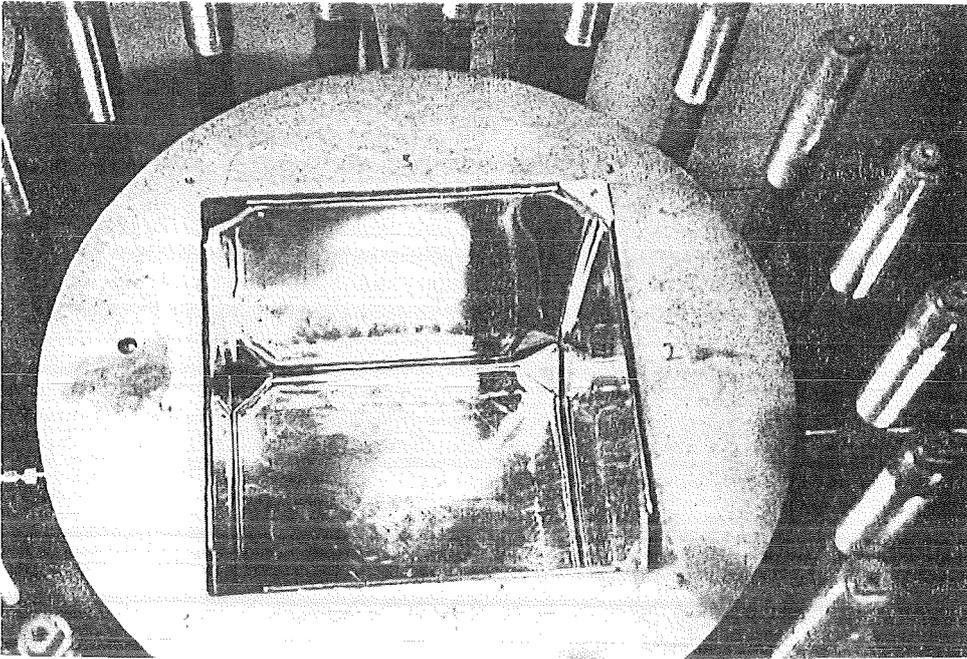


Abb. 1: Prüfzelle mit Druckkissen bei abgenommener Deckplatte

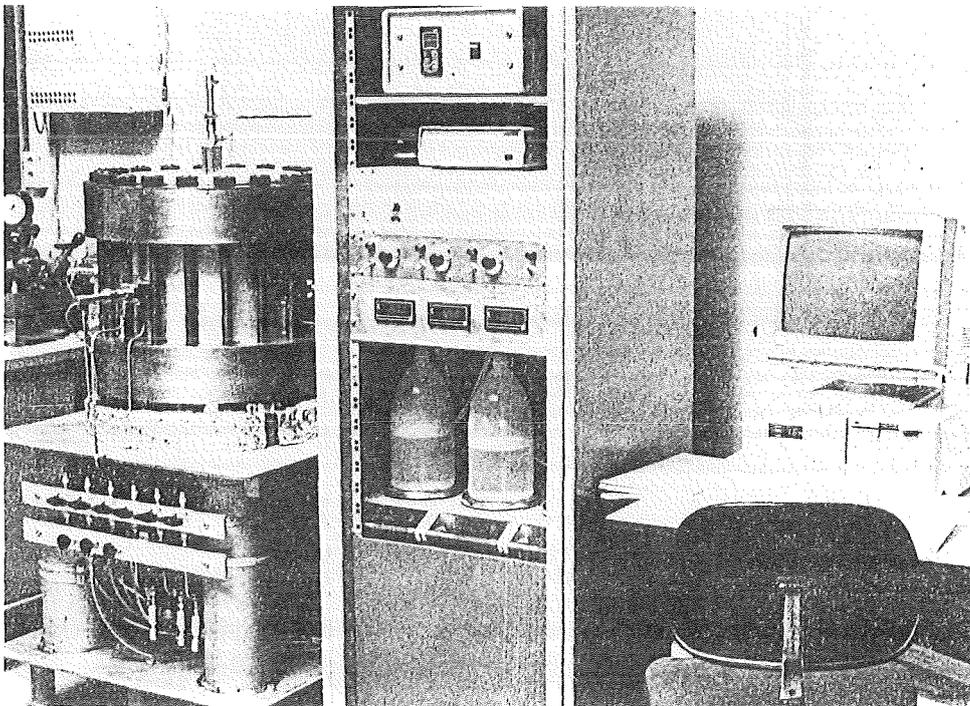


Abb. 2: Gesamtansicht der triaxialen Prüfeinrichtung

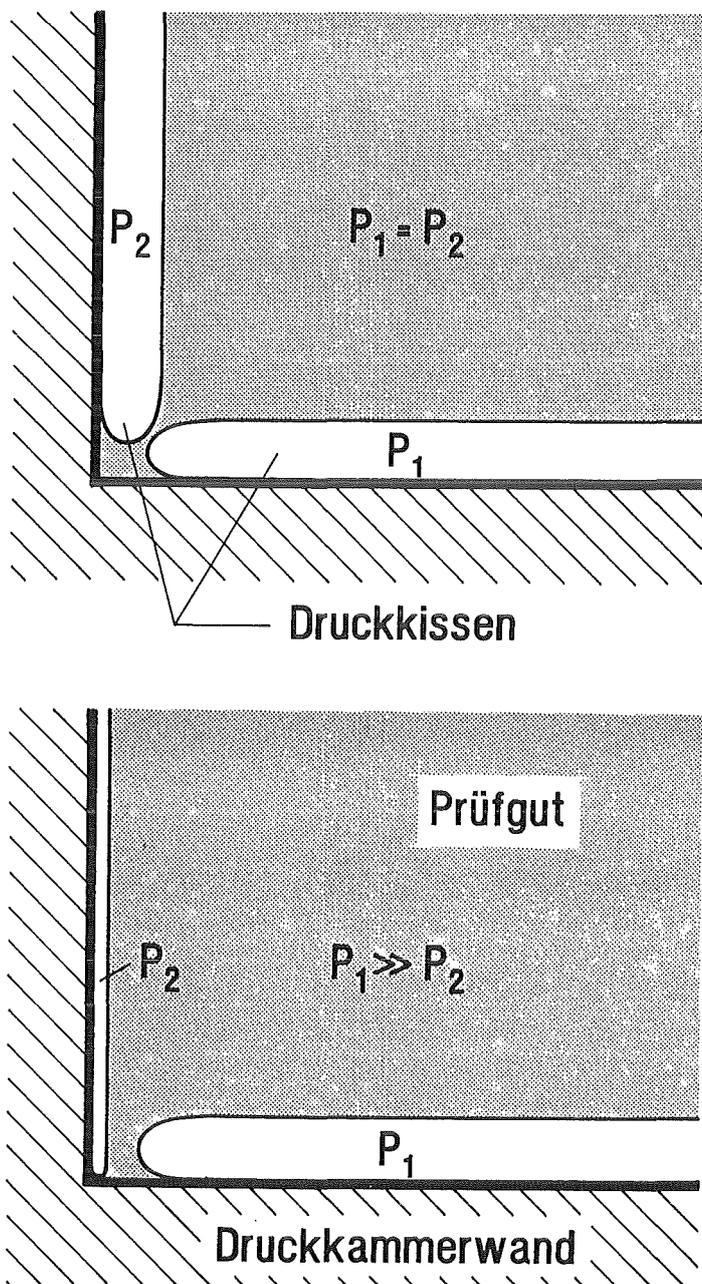


Abb. 3: Schematische Darstellung des Verformungsverhaltens der Druckkissen bei hydrostatischen und stark deviatorischen Lastfällen

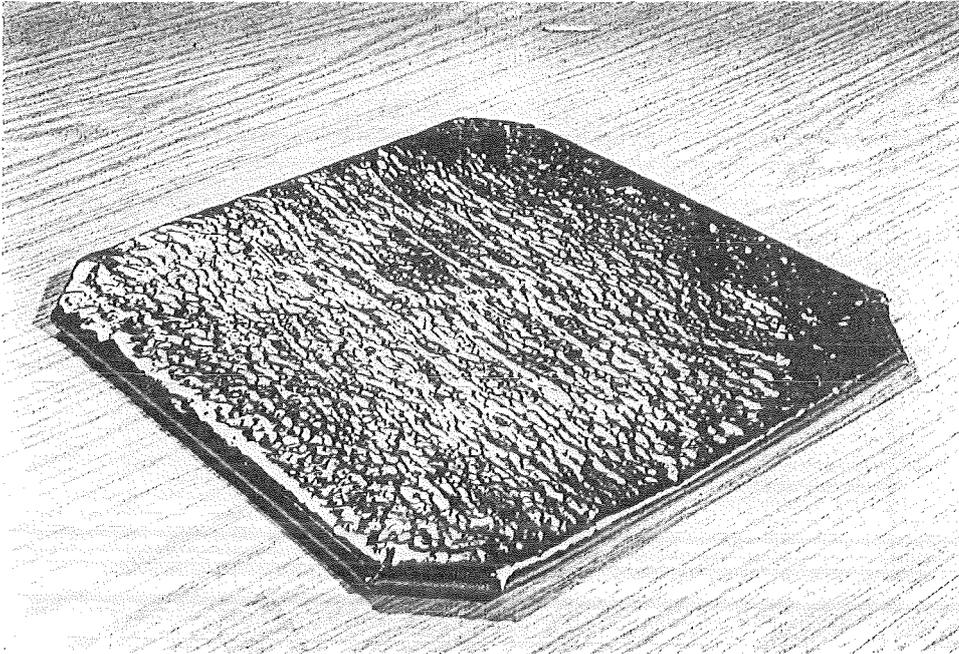


Abb. 4: Druckkissen nach dem Einsatz (Faltkissen, Auslenkung entsprechend einer Stauchung des Prüfmaterials um 12%)

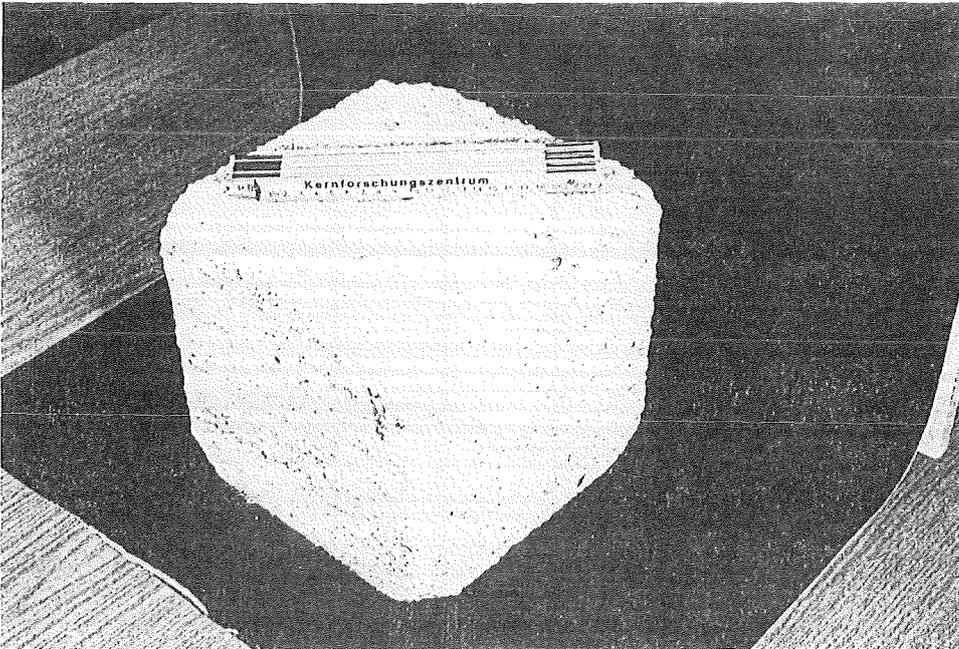


Abb. 5: Prüfkörper nach Kompaktierung des Prüfmaterials um 20%
(Anfangsporosität 30%)

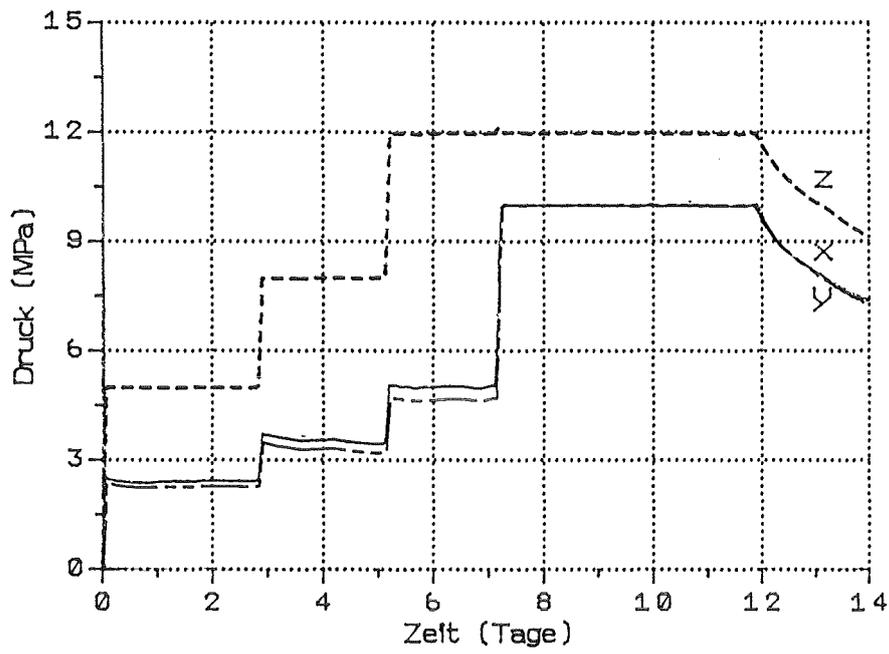


Abb. 6: Zeitlicher Verlauf der Spannungen im Versuch V130392

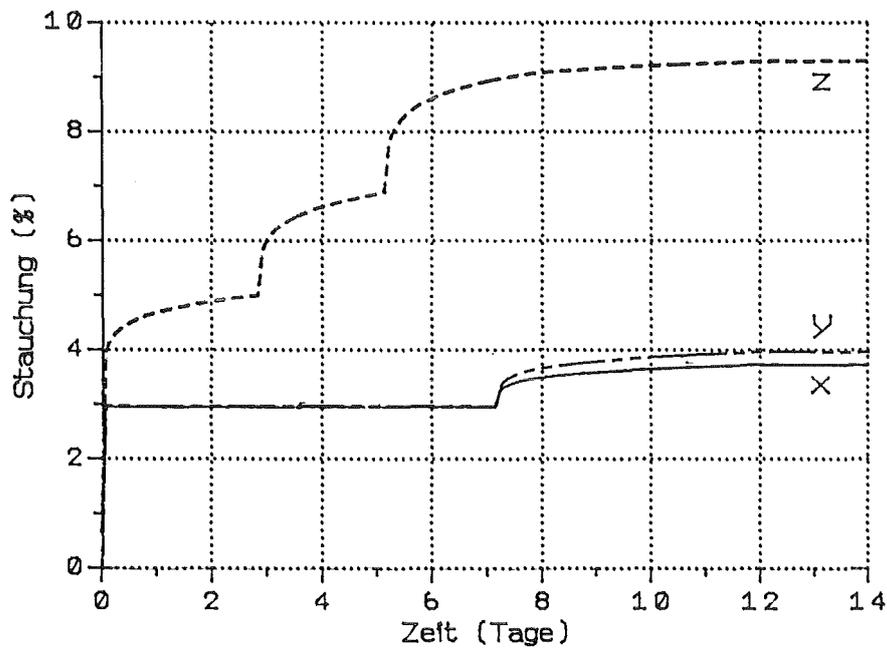


Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Verformungen im Versuch V130392

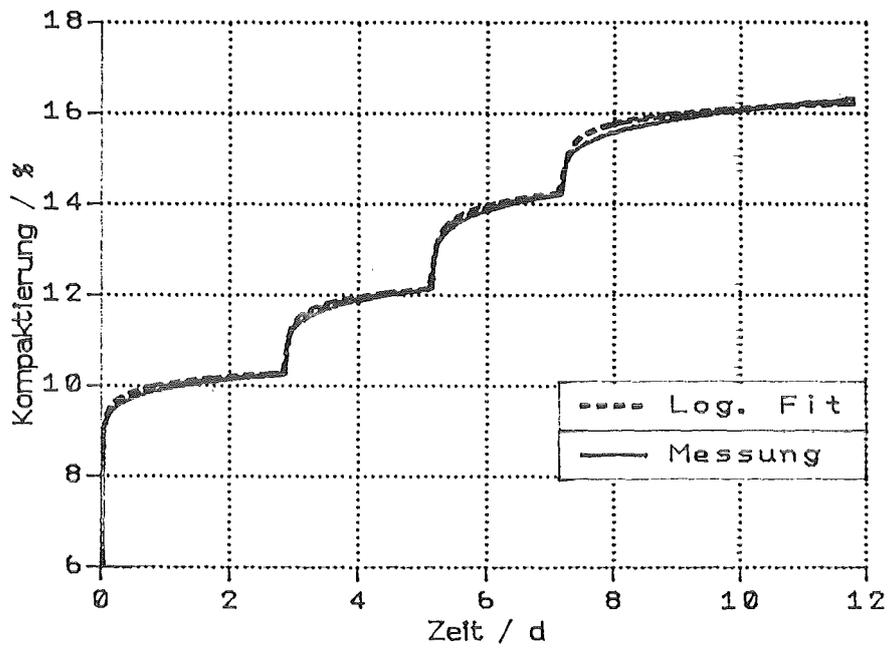


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Kompaktierung im Versuch V130392 im Vergleich mit einer logarithmischen Fit-Funktion (entsprechend einer $1/t$ -Abhängigkeit der Kompaktierungsrate)

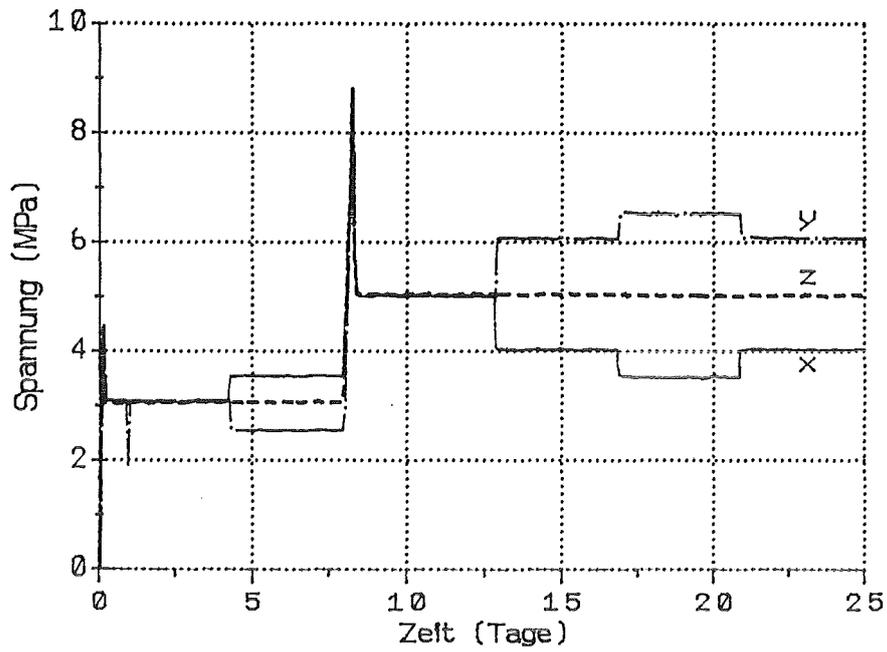


Abb. 9: Zeitlicher Verlauf der Spannungen beim Versuch V090692 (Teil 1)

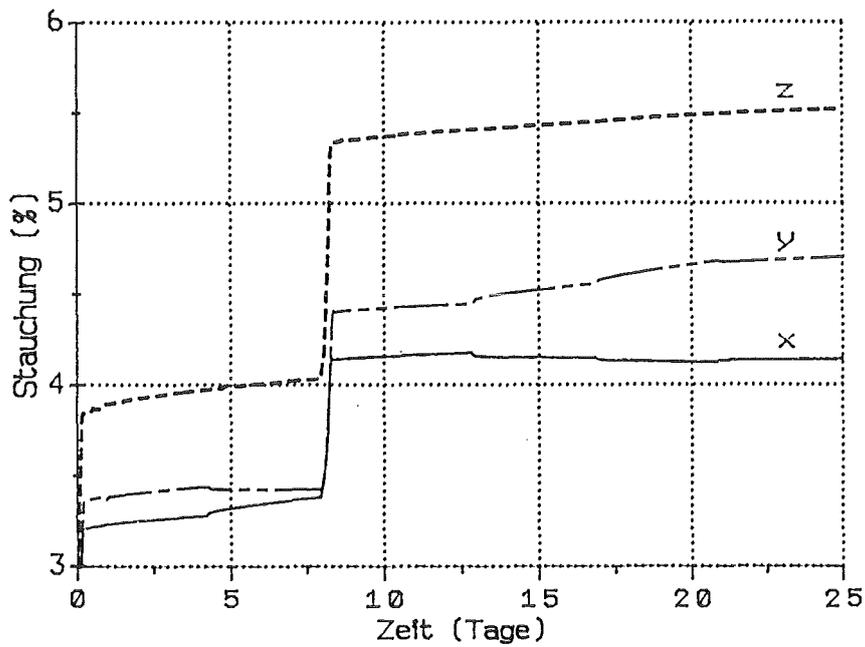


Abb. 10: Zeitlicher Verlauf der Verformungen beim Versuch V090692 (Teil 1)

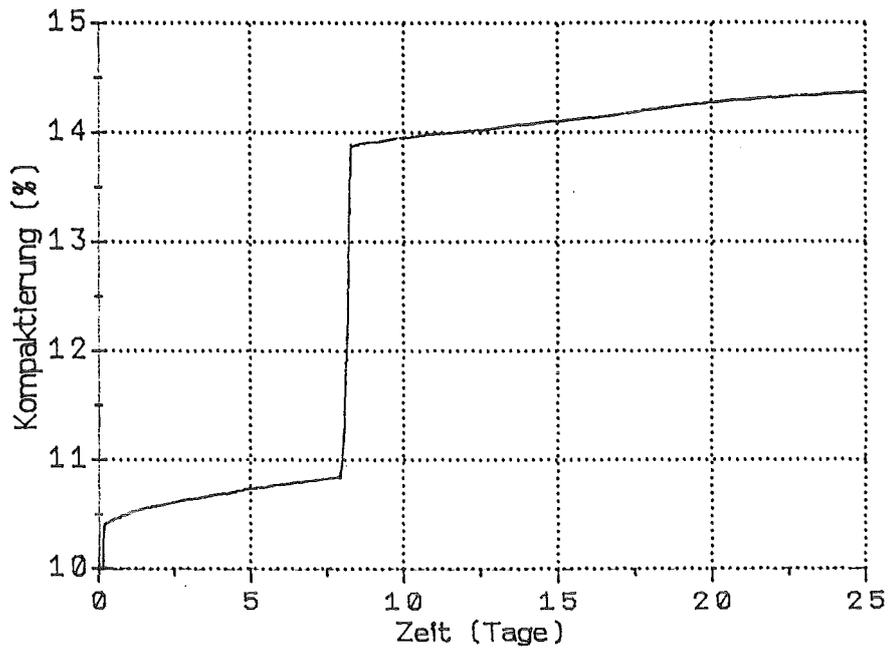


Abb. 11: Zeitlicher Verlauf der Kompaktierung beim Versuch V090692 (Teil 1)

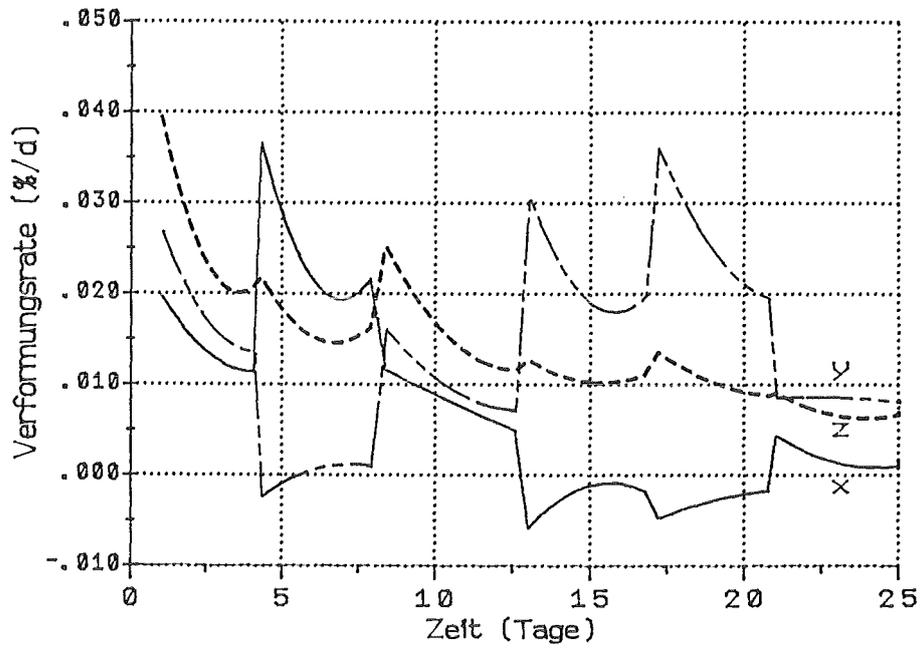


Abb. 12: Zeitlicher Verlauf der Verformungsraten beim Versuch V090692 (Teil 1)

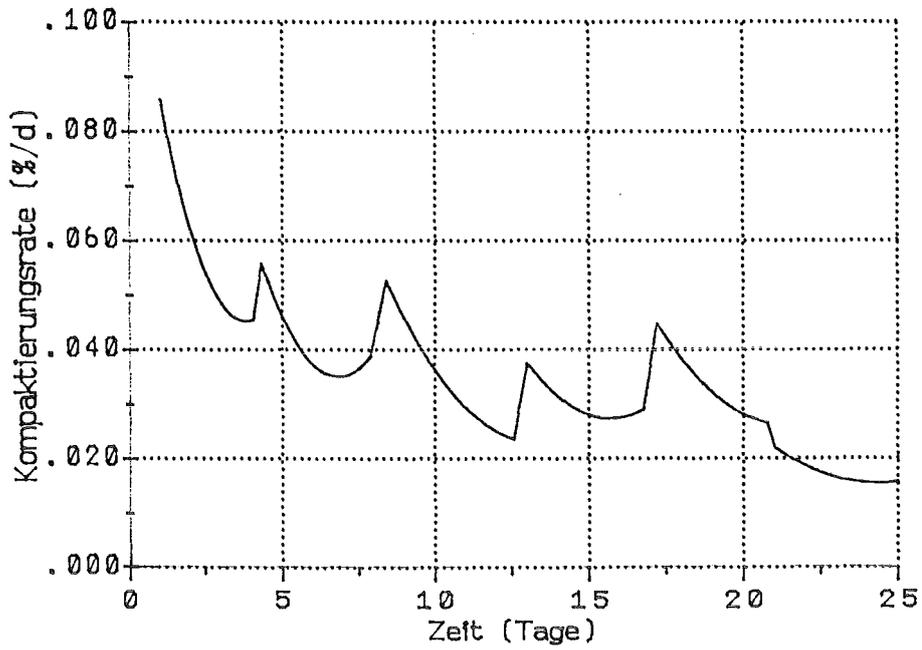


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf der Kompaktierungsraten beim Versuch V090692 (Teil 1)

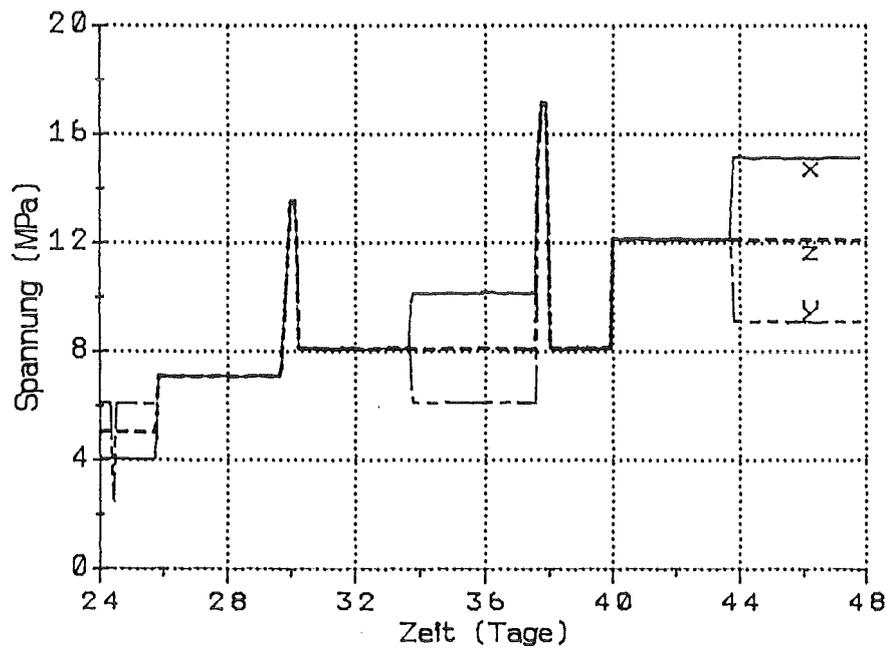


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf der Spannungen beim Versuch V090692 (Teil 2)

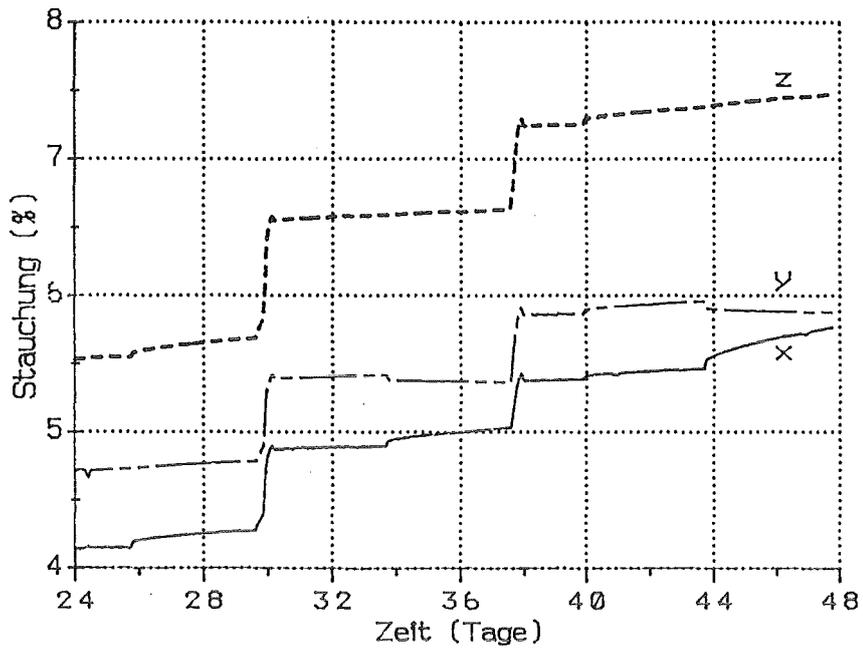


Abb. 15: Zeitlicher Verlauf der Verformungen beim Versuch V090692 (Teil 2)

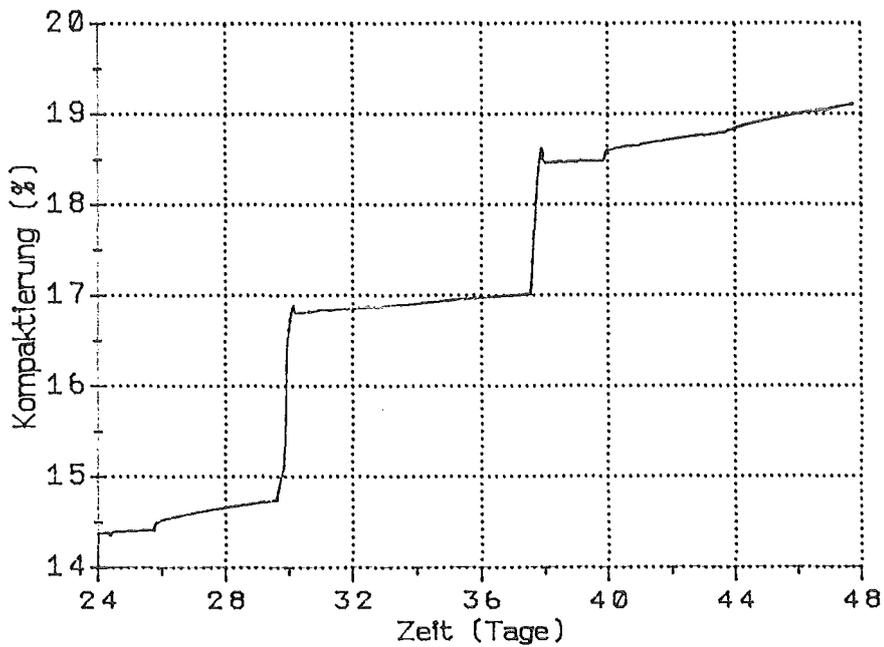


Abb. 16: Zeitlicher Verlauf der Kompaktierung beim Versuch V090692 (Teil 2)

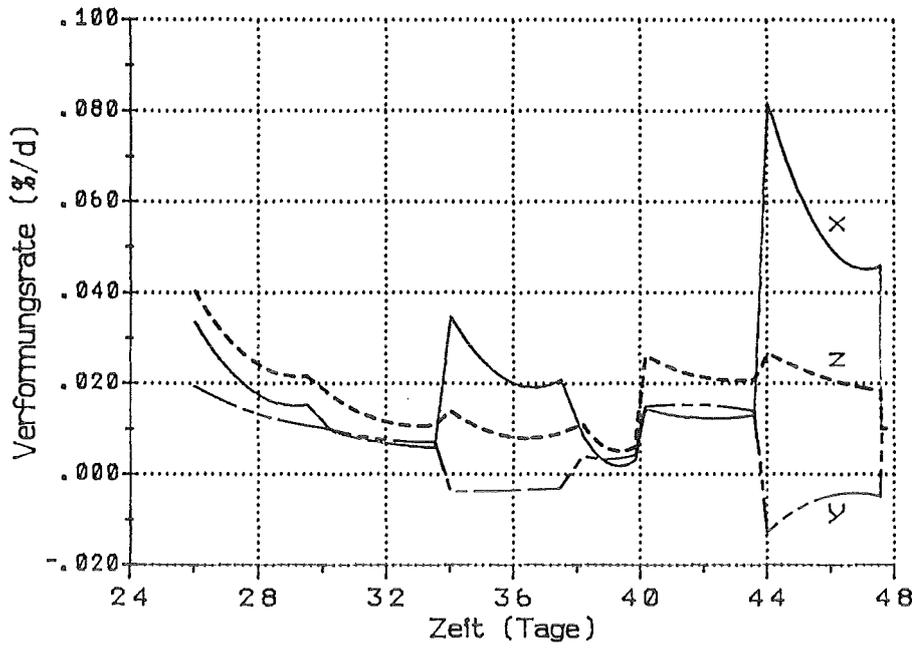


Abb. 17: Zeitlicher Verlauf der Verformungsraten beim Versuch V090692 (Teil 2)

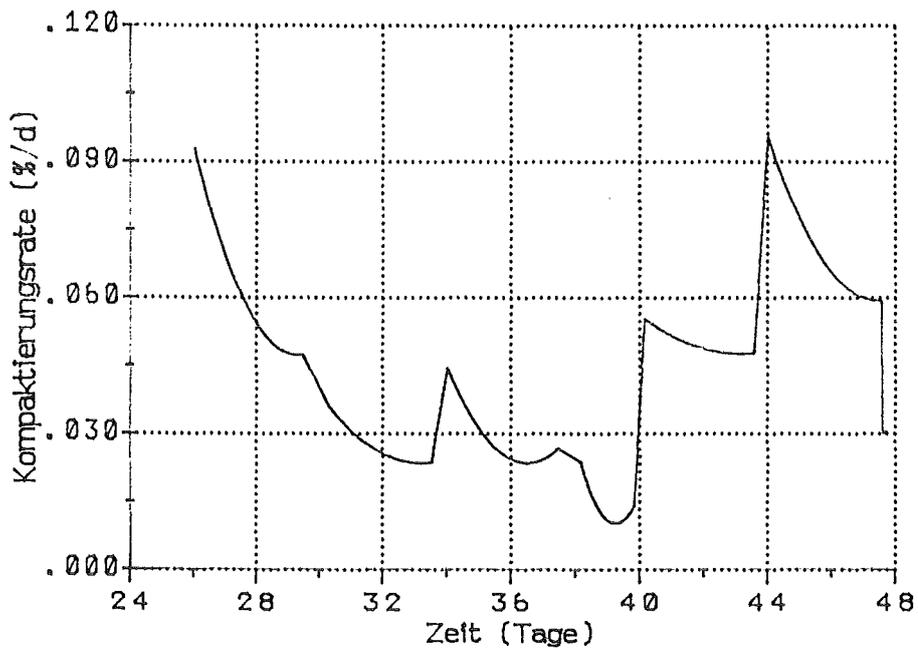


Abb. 18: Zeitlicher Verlauf der Kompaktierungsraten beim Versuch V090692 (Teil 2)

Anhang

A1 Aufbau und Fertigung der Druckkissen

Es wurden bisher 2 Arten von Druckkissen verwendet, die sich in ihrem Aufbau stark unterscheiden. Sie sollen hier unter Bezugnahme auf die spezielle Fertigungstechnik als Faltkissen bzw. Löt-kissen bezeichnet werden. Lediglich der verwendete Werkstoff ist bei beiden Typen identisch, Edelstahl mit der Werkstoff-Nr. 1.4301. Dieses Material ist relativ duktil, so daß es die bei der Kissenfertigung und beim Einsatz auftretenden Biegeverformungen bruchlos übersteht. Gleichzeitig besitzt es eine hohe Zugfestigkeit, was für die Verwendung bei hohen Drücken unerlässlich ist.

Faltpissen:

Die Faltpissen (Abb. A1 - A3) bestehen aus einer 1 mm starken Rückwand (R) und einer Vorderwand (V) aus 0.15 mm starkem Material, die an den Rändern und Ecken umgefaltet und mit der Rückwand mittels Laser-Schweißen dicht verbunden ist. Durch die spezielle Art der Faltung, für deren Realisierung eine aufwendige Biegevorrichtung entwickelt wurde (Abb. A4), wird erreicht, daß die Schweißnähte (S) nicht in der beim Einsatz der Druckkissen stark verformten Randzone liegen und daher nicht übermäßig belastet werden.

Die Kissen werden nach der Fertigung auf Dichtheit geprüft und können im Falle von Lecks nachgeschweißt werden.

Das im Innern um das Zentralloch angeordnete Dahtgitter (G) hat die Aufgabe, zu Beginn der Versuche den Andruck des Prüfmateri- als auf die äußere Dichtfläche (siehe Anhang A2) zu übertragen, ohne den Ölzufluß in die Kissen zu behindern. Diese Druckkissen sind aufgrund der geringen Materialstärke und der speziellen Machart relativ leicht verformbar, so daß sie auch bei relativ niedrigen Drücken einsetzbar sind, ohne daß das Meßergebnis nennenswert durch die Eigensteifigkeit verfälscht wird. Insbesondere sind sie auch in der Lage, Störungen der Spannungsverhältnisse aufgrund von Wandreibungseffekten durch Stauchung der Kissen- vorderwand in Form kleiner Falten klein zu halten. Um diesen Vorgang zu erleichtern, kann die Frontfläche der Kissen mit einer Art Waffelstruktur aus 1mm breiten und 0.5mm tiefen Sicken versehen werden (s. Abb. A2).

Nachteilig an diesem Kissentyp ist dagegen, daß die Anwendung bei hohen Drücken bei gleichzeitig großer Verformung (d.h. starker Kompaktierung des Prüfmateri- als) begrenzt ist. Die bisherigen Versuchserfahrungen zeigen, daß die Grenzbelastbarkeit dieser Kissen bei etwa $p \cdot \varepsilon = 2.0 \text{ MPa}$ liegt, wobei p der Druck und ε die Stauchung des Prüfmateri- als in der betreffenden Richtung sind. Dies ist deutlich mehr, als nach einer einfachen Abschätzung unter Annahme einer halbrohrförmigen Randzone zu erwarten wäre. Die Ursache liegt darin, daß die Randzonen durch das anliegende Prüfgut eine Teilentlastung und eine günstigere Formgebung erfahren.

Fertigungstechnisch ist bei diesem Druckkissentyp auch die Verwendung einer etwas größeren Materialstärke, z.B. 0.2 mm, möglich. Damit könnte der Anwendungsbereich nach höheren Drücken hin erweitert werden.

Lötkissen:

Diese Druckkissen (Abb. A5 - A6) bestehen im wesentlichen aus einer Vorder- und einer Rückwand (V, R) aus 0.3 mm starkem Material, die an den Rändern durch Spaltgaslöten bei etwa 1100°C verbunden sind (L). Für diesen Lötprozeß, der eine sehr hohe Festigkeit erbringt (angeblich höher als die des Grundmaterials), wird die Vorderwand auf die in Abb. A5 gezeigte Art vorgeformt und durch Punktschweißen mit der Rückwand verbunden. Die Randzone wird nach dem Löten bis auf einen schmalen Streifen entfernt. Um bei dem Lötprozeß einen ausreichenden Zutritt des Spaltgases zur Lötzone auch über den Innenraum der Druckkissen zu gewährleisten, wird die eigentliche Rückwand mit einer großen Öffnung versehen. Die Ronde (S), an der auch das Drahtgitter (G) befestigt ist, wird nachträglich aufgeklebt.

Der Vorteil dieser Druckkissen liegt in der höheren Belastbarkeit entsprechend der größeren Wandstärke. Durch diese Wandstärke ergibt sich jedoch auch eine höhere Eigensteifigkeit der Kissen, die sich bei relativ niedrigen Drücken negativ auf die Meßgenauigkeit auswirken kann. Auch setzen sie einer Oberflächenstauchung, die hier nur in Form einer leichten Welligkeit der Frontfläche in Erscheinung tritt, einen wesentlich höheren Widerstand entgegen, so daß mit einem grösseren Einfluß der Wandreibung zu rechnen ist.

Bei diesem Druckkissentyp ist die Verwendung wesentlich geringerer Materialstärken aus Gründen der Löttechnik ausgeschlossen. Eine Wandstärke von 0.25 mm sollte jedoch noch realisierbar sein, so daß zusammen mit den Faltkissen der Bereich von 0.15 bis 0.3 mm abgedeckt werden könnte.

A2 Technische Beschreibung der Prüfeinrichtung

Aufbau der Prüfwelle

Die Prüfwelle besteht aus einem zylindrischen Joch mit quadratischem Ausschnitt sowie den beiden Abdeckplatten, die mit einem Kranz von Dehnungsschrauben miteinander verbunden sind (Abb. A7). Die Prüfwelle ist aus unlegiertem Stahl (St 52-3) gefertigt und für einen maximalen Betriebsdruck von 35 MPa ausgelegt.

Die Fixierung und Abdichtung der Druckkissen an den Innenwänden der Prüfwelle erfolgt durch je 2 O-Ringe, die konzentrisch um die in der Mitte der Wandflächen mündenden Versorgungsrohrleitungen angebracht sind (Abb. A8). Die inneren O-Ringe dienen der dichten Verbindung der Zuleitungskanäle mit den Druckkissen. Die äußeren haben die Aufgabe, den Ringraum zwischen ihnen und den inneren O-Ringen für eine Evakuierung abzudichten, durch welche ein Anpressen der Druckkissen gegen die Wände bzw. gegen die O-Ringe erreicht wird. Auf diese Weise wird eine Fixierung und Abdichtung der Druckkissen ermöglicht, ohne daß zusätzliche konstruktive Maßnahmen an den Druckkissen erforderlich sind. Während der Druckbeaufschlagung der Kissen ergibt sich der erforderliche Anpreßdruck aufgrund der Einspannung der Druckkissen zwischen Wandfläche und Prüfwelle.

Die Ecken des Prüfvolumens werden mit tetraederartigen Formteilen (aus Stahl) mit Kantenlängen von 28 und 40 mm ausgefüllt. Damit wird den abgeschrägten Ecken der Druckkissen Rechnung getragen und das Totvolumen reduziert. Dies ist auch für die Materialbeanspruchung der Druckkissen im Eckbereich vorteilhaft.

Für die Beheizung der Prü fzelle sind an der Außenwand des Jochs sowie an der Boden- und Deckplatte Heizmatten angebracht. Zur Wärmeisolation wird die gesamte Prü fzelle mit einem Isoliermantel aus leicht abnehmbaren Segmenten umgeben.

Die Prü fzelle ist auf ein Untergestell montiert, das in kompakter Form die Hydraulik-Pumpen und die Steuerventile beherbergt.

Hydraulik-Versorgung und Druckregelung

Die Versorgung der Druckkissen mit Hydraulikflüssigkeit (Mineralö raffinat BP Transcal N) erfolgt mit Hilfe von 3 druckluftbetriebenen Mini-Pumpen (Maximator MO 189 mit verkürztem Hub), die ein Druckübersetzungsverhältnis von 1:200 und eine effektives Hubvolumen von weniger als 0.1 ccm aufweisen.

Die Konstantregelung des hydraulischen Drucks in den Druckkissen erfolgt über die Steuerung der Druckluftzufuhr mit Hilfe von Magnetventilen. Damit wird in den Versuchen eine Regeltgenauigkeit von ca. 0.02 MPa erreicht. Die Durchführung von wegegeregelten Versuchen ist durch Steuerung der Magnetventile über die Datenerfassungsanlage (s. unten) möglich.

Für die Versuche, in denen aufgrund stark deviatorischer Belastung in 1 oder 2 Raumrichtungen eine Ausdehnung des Prü fmaterials auftritt und daher ein Rückströmen von Hydraulikflüssigkeit erfolgen muß, ist je 1 handbetriebenes Bypass-Regelventil parallel zu den Förderpumpen angeordnet

Meßtechnik und Datenerfassung

Bei den Versuchen werden folgende Meßgrößen erfaßt:

- Druck der Hydraulikflüssigkeit in den Druckkissen
- Menge der den Druckkissen zugeführten Hydraulikflüssigkeit
- Zentrale Auslenkung der Druckkissen (in Erprobung)
- Temperaturen an der Prü fzelle und an weiteren Positionen der Meßeinrichtung
- Barometerdruck

Die Druck- und Temperaturmessungen erfolgen auf konventionelle Weise und sollen daher nicht näher beschrieben werden.

Zur Bestimmung der den Druckkissen zugeführten Ölmengen wird die in den 3 an die Hydraulikpumpen angeschlossenen Vorratsbehältern befindliche Ölmenge gemessen, unter Ausnutzung der Tatsache, daß die Leckage in den Pumpen vernachlässigbar klein ist. Dazu stehen die Vorratsbehälter auf je einer elektronischen Waage (0.01g Auflösung). Die Ableitung der Flüssigkeit erfolgt über Steigrohre, so daß keine mechanischen Kräfte auftreten, die die Wägung

verfälschen können. Die Langzeitstabilität dieser Mengenbestimmung liegt nach Korrektur von Temperatur- und Auftriebseffekten bei etwa 0.02g . Dies entspricht einer Unsicherheit in der gemessenen Verformung des Prüfmaterials von $1.4 \cdot 10^{-4}$ % (pro Raumrichtung).

Die Messung der zentralen Auslenkung der Druckkissen, die z.Z. erprobt wird, erfolgt mit 6 induktiven Wegaufnehmern (Tasterausführung), die außerhalb der Prüfzelle an die Ölzufuhrkanäle angeflanscht sind und durch in diesen liegende Schubstangen mit der jeweiligen Druckkissen vorderwand gekoppelt sind (Abb. A9-A10).

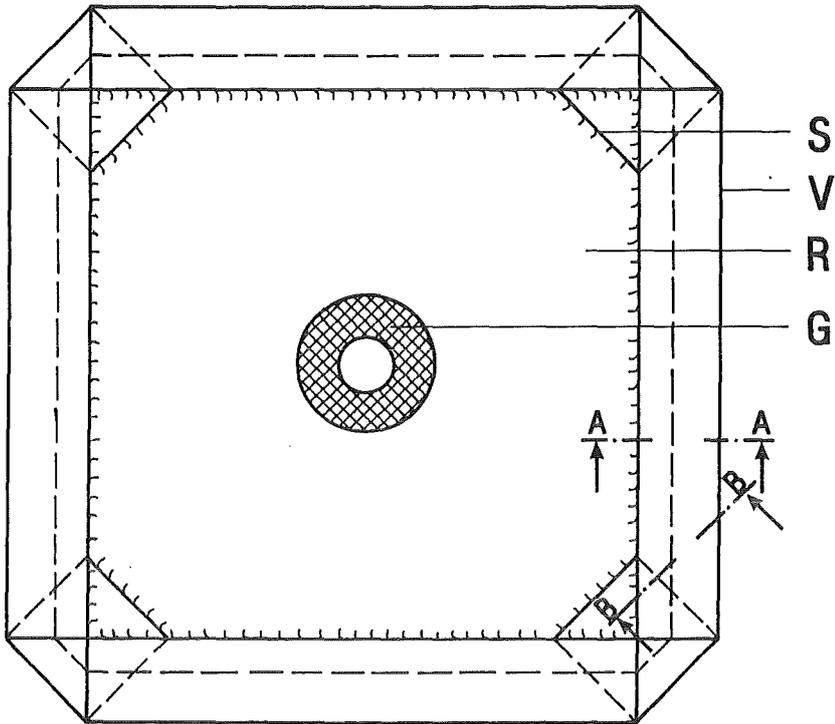
Bedingt durch Temperatureffekte ergibt sich hier eine Begrenzung der Meßgenauigkeit auf etwa 0.001 mm, entsprechend einer Verformung des Prüfmaterials von $8 \cdot 10^{-4}$ % in der entsprechenden Richtung (bei einer Unsicherheit von 0.1°C in der Temperatur).

Die anfallenden Daten werden in einem PC gespeichert. Während die digitale Information der 3 elektronischen Waagen direkt in den PC gegeben wird, werden die übrigen als Analogsignale anfallenden Meßgrößen über einen Meßstellenumschalter und AD-Wandler geführt.

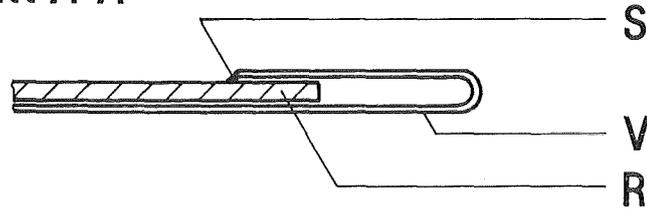
Mit dem Rechner können in Abstimmung mit den ermittelten Ölmengen in den Druckkissen die Hydraulikpumpen gesteuert werden, um wegegeregelte Lastpfade zu realisieren.

Außerdem können mit dem Rechner verschiedene Grenzwerte überwacht und z.B. eine automatische Abschaltung im Fall einer grösseren Leckage veranlaßt werden.

□



Schnitt A-A



Schnitt B-B

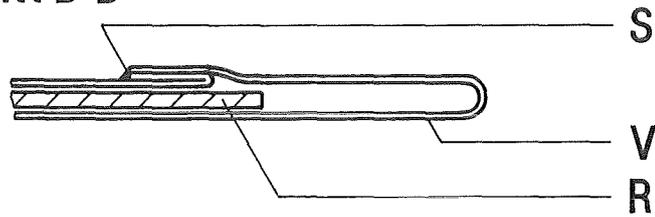


Abb. A1: Konstruktiver Aufbau der Faltkissen (Prinzipzeichnung)

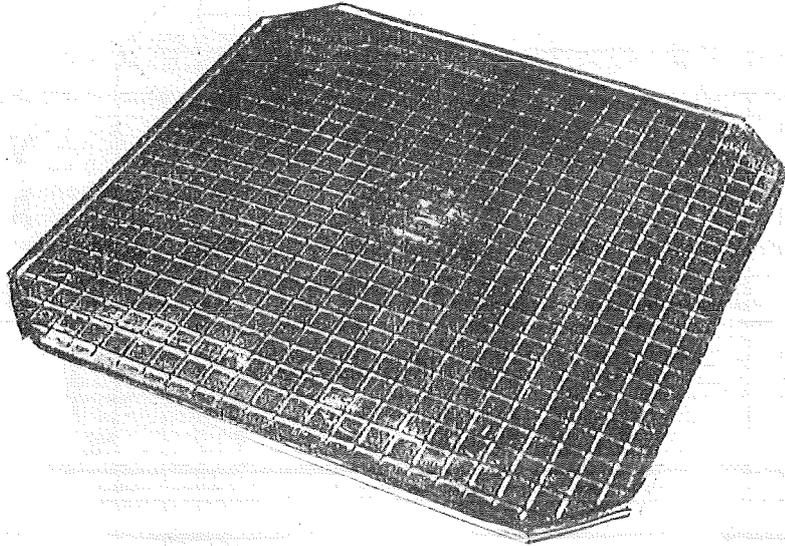


Abb. A2: Vorderansicht eines Faltkissens

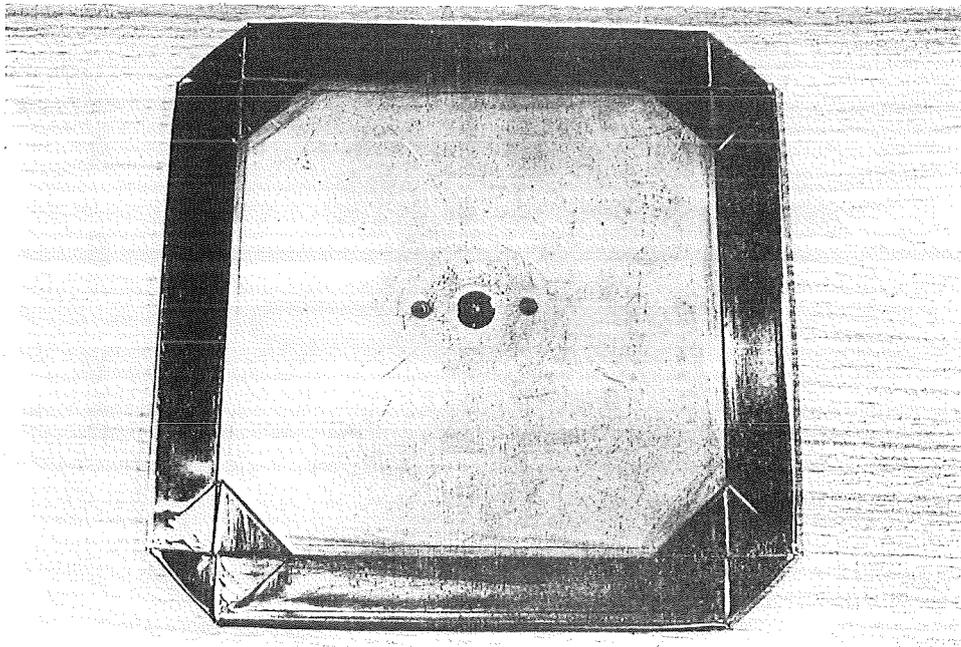


Abb. A3: Rückansicht eines Faltkissens

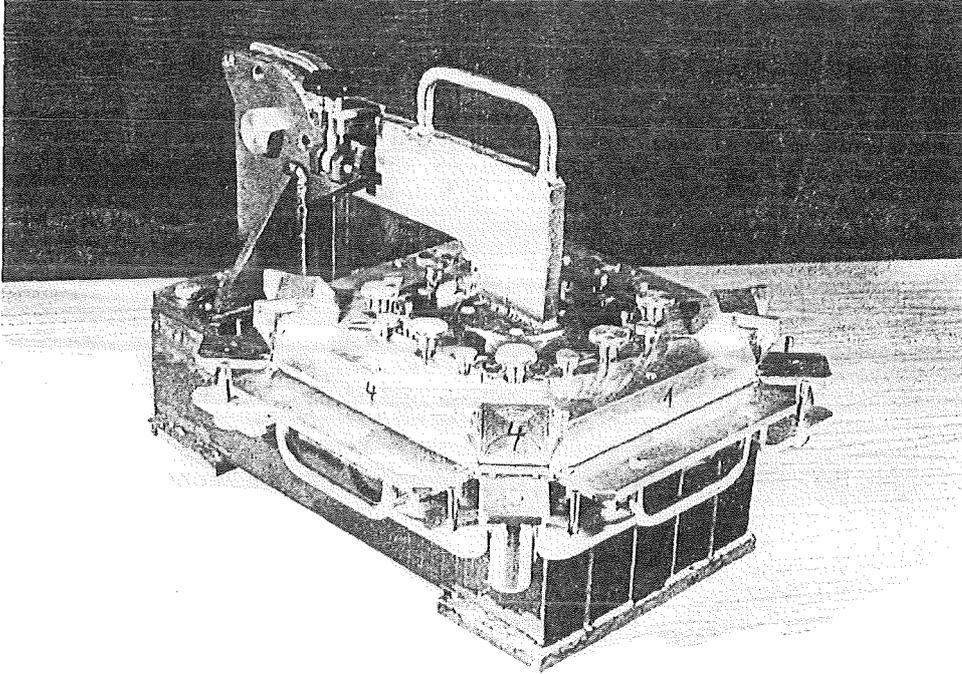


Abb. A4: Ansicht der Biegevorrichtung für die Fertigung der Faltkissen

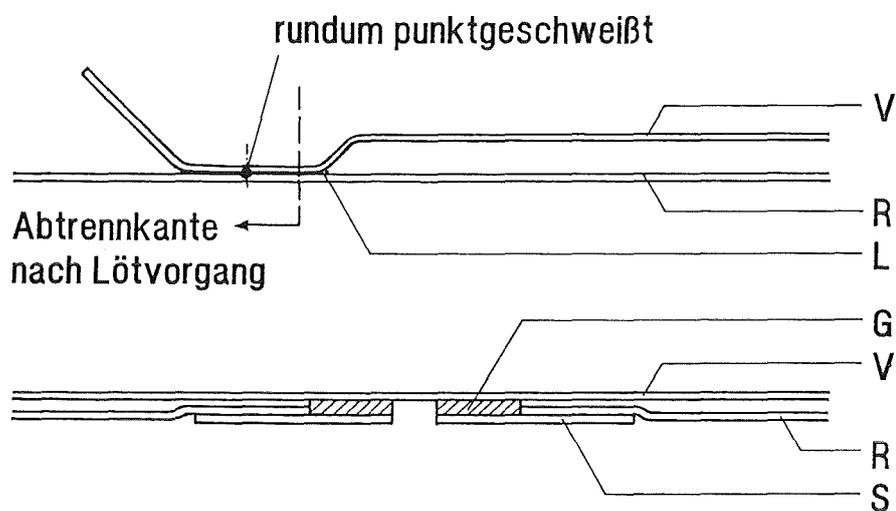


Abb. A5: Querschnitte eines Lötstücks (Schemazeichnung)

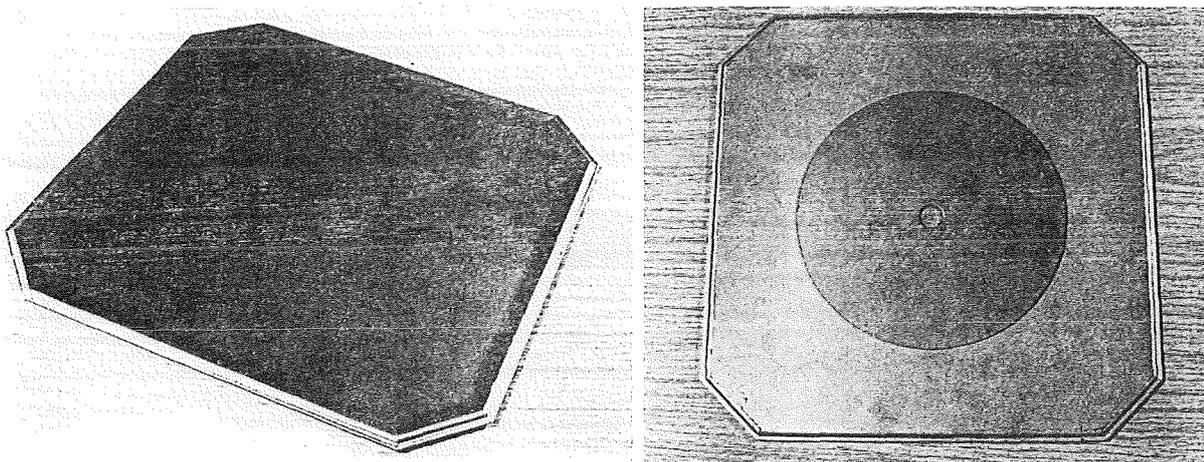


Abb. A6: Vorder- und Rückansicht eines Lötstücks

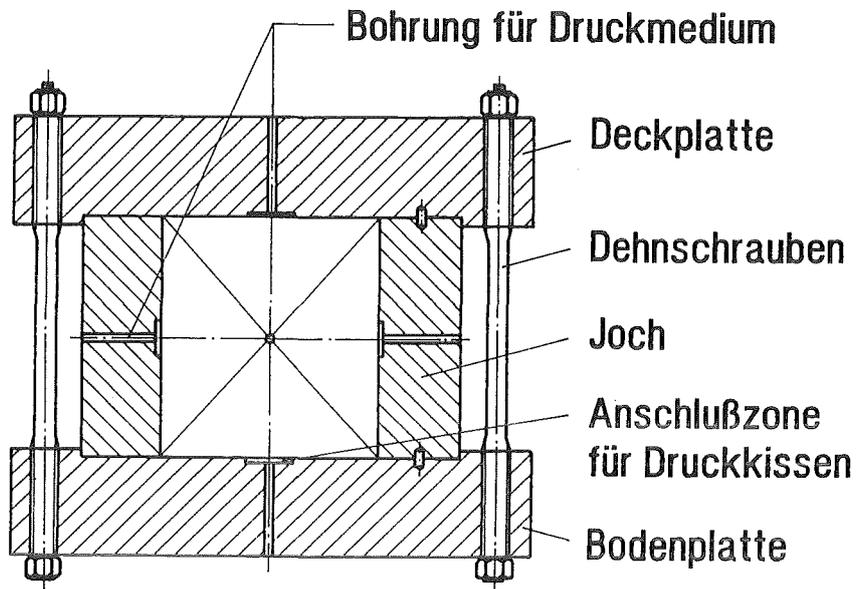


Abb. A7: Konstruktiver Aufbau der Prüfwelle

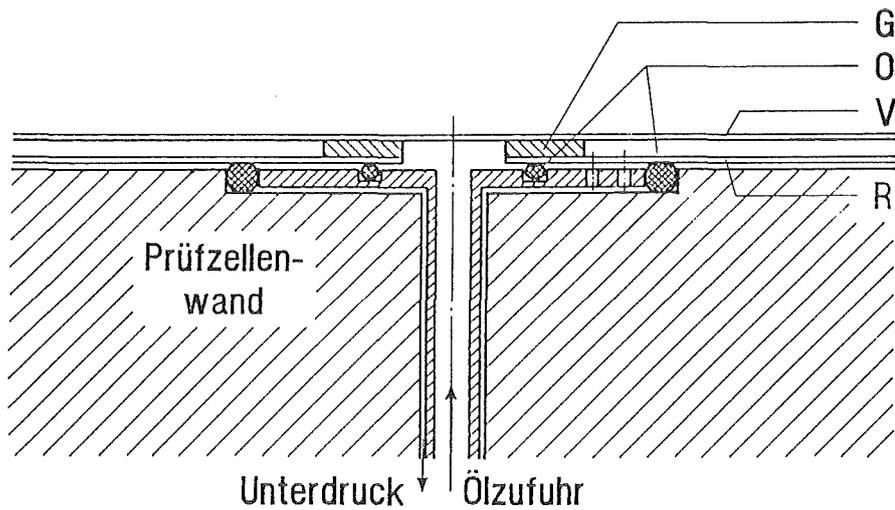


Abb. A8: Anschlußzone für Fixierung und Abdichtung der Druckkissen in der Prüfwelle (Schemazeichnung)

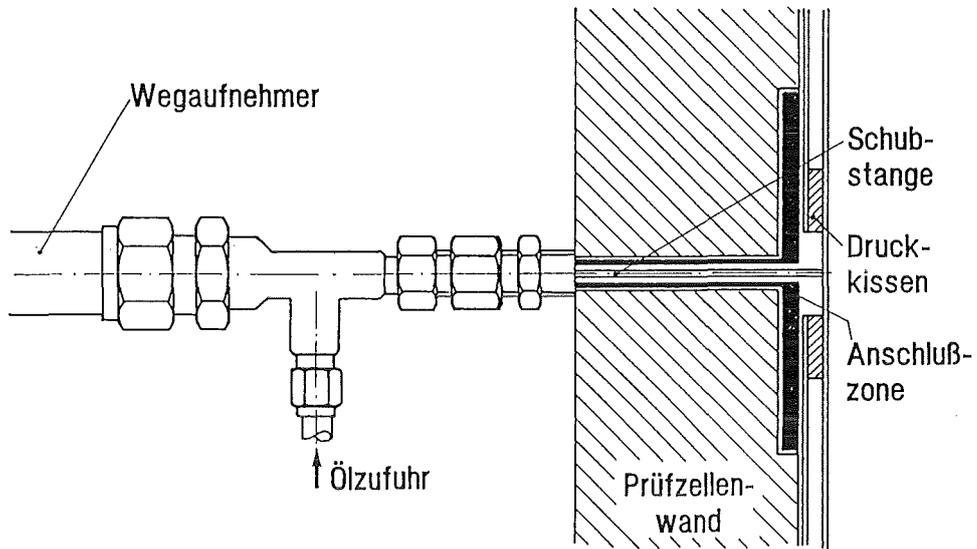


Abb. A9: Schemazeichnung der Meßanordnung mit induktivem Wegaufnehmer

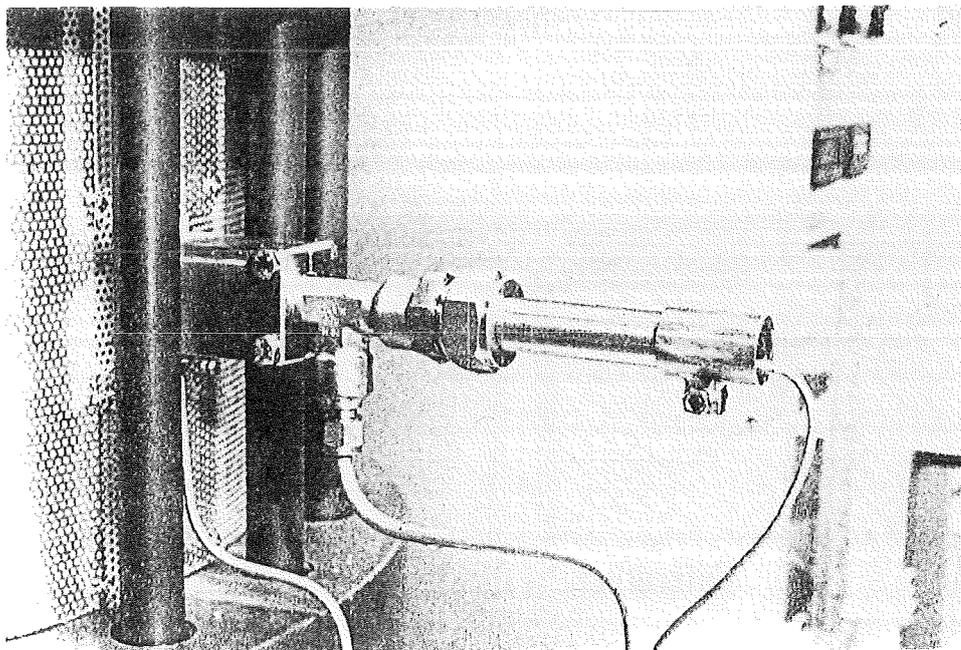


Abb. A10: Ansicht eines installierten induktiven Wegaufnehmers