Nagra
Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra
Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra
Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

TECHNISCHER BERICHT 84-18

QUELLDRUCK VON HOCHVERDICHTETEN BENTONITEN

F. Bucher
U. Spiegel

Dezember 1984

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich

Parkstrasse 23 5401 Baden/Schweiz Telephon 056/20 55 11

Nagra
Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra
Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra
Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive

TECHNISCHER BERICHT 84-18

QUELLDRUCK VON HOCHVERDICHTETEN BENTONITEN

F. Bucher
U. Spiegel

Dezember 1984

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich

Parkstrasse 23 5401 Baden/Schweiz Telephon 056/20 55 11

Der vorliegende Bericht wurde im Auftrag der Nagra erstellt. Die Autoren haben ihre eigenen Ansichten und Schlussfolgerungen dargestellt. Diese müssen nicht unbedingt mit denjenigen der Nagra übereinstimmen.

Le présent rapport a été préparé sur demande de la Cédra. Les opinions et conclusions présentées sont celles des auteurs et ne correspondent pas nécessairement à celles de la Cédra.

This report was prepared as an account of work sponsored by Nagra. The viewpoints presented and conclusions reached are those of the author(s) and do not necessarily represent those of Nagra.

KURZE ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Bericht sind Quelldruckmessungen zusammengestellt, welche an hochverdichteten Proben aus im Handel erhältlichen Bentoniten (Na-Bentonit MX-80 von Wyoming and Ca-Bentonit von Bayern) wie auch aus Metabentonit von Kinnekulle (Schweden) und aus Illit vom Massif Central (Frankreich) durchgeführt wurden. Der Quelldruck ist stark abhängig von der reduzierten Trockendichte der Probe (ermittelt im aufgequollenen Zustand) und ergibt für die Bentonite Werte von etwa 5 MPa bei einer reduzierten Trockendichte von 1.6 Mgm^{-3} bis 40 MPa bei einer reduzierten Trockendichte von 2.0 Mgm^{-3}. Im Bereich dieser Trockendichten weist der Ca-Bentonit etwas höhere Quelldrücke als der Na-Bentonit auf; die Temperaturabhängigkeit und der Einfluss der Wasserzusammensetzung bis zu einem Gehalt an Mineralien von 3.5 g/l sind klein. Bei einer Erhöhung des Wasserdruckes ist die Zunahme des gemessenen totalen Quelldruckes oberhalb reduzierter Trockendichten von 1.7 Mgm^{-3} etwas geringer als der zusätzlich aufgebrachte Wasserdruck. Der untersuchte Metabentonit und Illit weisen ein beachtliches Quellpotential auf, welches durch eine Ultraschallbehandlung der Probenmaterialien noch erhöht wird. Die wenigen Messungen der Durchlässigkeitswerte ergaben für den untersuchten Na-Bentonit Werte von ca. $5 \cdot 10^{-14}$ ms^{-1} und für den Illit Werte von ca. 10^{-12} ms^{-1}.

RESUME SUCCINCT

On présente dans ce rapport des mesures de pression de gonflement faites sur des échantillons hautement compactés de bentonites disponibles sur le marché (Na-bentonite MX-80 du Wyoming et Ca-bentonite Montigel de Bavière) ainsi que sur des échantillons de métabentonite de Kinnekulle (Suède) et d'illite du Massif Central (France). La pression de gonflement dépend fortement de la masse volumique finale de l'échantillon (déterminée après l'achèvement du processus de gonflement) et atteint pour les bentonites des valeurs allant de 5 MPa pour une masse volumique finale de 1.6 Mgm^{-3}, à 40 MPa pour une masse volumique finale de 2.0 Mgm^{-3}. Dans cet intervalle de masses volumiques, la Ca-bentonite montre une pression de gonflement quelque peu supérieure à celle de la Na-bentonite; l'influence de la température et celle de l'eau jusqu'à des teneurs en minéraux de 3.5 g/l sont petites. Lors d'une augmentation de la pression d'eau, et pour des masses volumiques finales supérieures à 1.7 Mgm^{-3}, l'accroissement de la pression totale mesurée reste quelque peu inférieur à la pression d'eau supplémentaire appliquée. La métabentonite et l'illite examinées montrent un important potentiel de gonflement qui est encore augmenté par un traitement des éprouvettes aux ultra-sons. Quelques mesures de la perméabilité ont donné pour la Na-bentonite examinée des valeurs d'environ $5 \cdot 10^{-14}$ m/s et pour l'illite des valeurs d'environ 10^{-12} m/s.

ABSTRACT

Swelling pressure measurements carried out on highly compacted samples of commercially available bentonites (Na-bentonite MX-80 from Wyoming and Ca-bentonite Montigel from Bavaria) as well as of metabentonite from Kinnekulle (Sweden) and of illite from the Massif Central (France) are reported. The swelling pressure depends strongly on the final density of the sample (determined after completion of the swelling process) with values for the bentonites ranging from 5 MPa at a final dry density of 1.6 Mgm^{-3} to about 40 MPa at a final dry density of 2.0 Mgm^{-3}. In this density range the Ca-bentonite has a somewhat higher swelling pressure than the Na-bentonite; the temperature dependence and the influence of the water composition up to mineralisation levels of 3.5 g/l are small. When increasing the water pressure the difference in the measured total swelling pressure is, for final dry densities above 1.7 Mgm^{-3}, somewhat smaller than the increase in the applied water pressure. The metabentonite and the illite samples investigated exhibit a significant swelling potential that is further enhanced by subjecting them to ultrasonic treatment. The few measurements of the hydraulic conductivities gave values of about $5 \cdot 10^{-14}$ m/s for the Na-bentonite and about 10^{-12} m/s for the illite investigated.

KURZE ZUSAMMENFASSUNG I

RESUME SUCCINCT II

ABSTRACT III

INHALTSVERZEICHNIS IV

VERZEICHNIS DER BEILAGEN V

ZUSAMMENSTELLUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN VI

1. Einleitung 1

2. Quellmechanismen 2

3. Quelldruckapparatur 6

3.1 Beschrieb der Messeinrichtung 6
3.2 Einfluss der Kraftmessung auf den gemessenen Quelldruck 11

4. Versuchskonzeption 14

4.1 Materialien 14
4.2 Parameter 14
4.3 Versuchstypen 16

5. Auswertungen 20

5.1 Einfluss der Materialtypen 21
5.2 Einfluss von Temperaturänderungen 23
5.3 Einfluss des Wasserdruckes 26
5.4 Einfluss der Ionenart des Wassers 28
5.5 Zeitverlauf des Quelldruckes 30
5.6 Einfluss der Verdichtungsart 32
5.7 Einfluss des Versuchsablaufes 34
5.8 Durchlässigkeitswerte 36

LITERATURANGABEN 38

BEILAGEN 39-53

VERZEICHNIS DER BEILAGEN

Beilage 1 : 13 Datenblätter mit den Tabellen der Versuchskennwerte

Beilage 2 : Zusammenhang zwischen der reduzierten Trockendichte ρ_{red} und dem Ausbauwassergehalt w_A

ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Eine im Auftrag der NAGRA durchgeführte Projektstudie für die Endlagerung hochaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen sowie Literaturstudien haben gezeigt, dass sich Bentonit für das von der NAGRA vorgesehene Endlagerkonzept für hochaktive Abfälle und schweizerische Verhältnisse als Verfüll- und Versiegelungsmaterial eignen könnte.

In der Folge hat die NAGRA das Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH-Zürich (IGB) mit der Untersuchung von verschiedenen Bentoniten beauftragt.

In das Versuchsprogramm wurden der auch in Schweden untersuchte Na-Bentonit MX-80 aus den USA, und der für die Schweiz näher gelegene Ca-Bentonit Montigel aus Bayern aufgenommen. Der vorliegende Bericht befasst sich mit dem Quelldruck dieser Bentonite in hochverdichteter Form unter dem Einfluss verschiedener Parameter.

Zudem sind Versuche mit Umwandlungsprodukten des Bentonites, Metabentonit und Illit, durchgeführt worden, um Aussagen über das Verhalten hochverdichteter Bentonite über sehr lange Zeiträume zu ermöglichen.

- Einfluss der Bentonitdichte

Der Quelldruck hochverdichteter Bentonite ist vor allem beeinflusst durch die Trockendichte des verdichteten Materials.

Massgebend ist die Trockendichte bei Versuchsende, d.h. unter Einbezug einer möglichen Volumenausdehnung der anfänglich eingebauten Probe.
Diese Trockendichte wird im Folgenden als reduzierte Trockendichte ρ_{red} bezeichnet (Abb. 12).

Die Quelldruckzunahme bei Erhöhung der reduzierten Trockendichte ρ_{red} ist bis zu $\rho_{red} \sim 1.7$ Mg/m^3 gering im Vergleich zu Dichten über 1.7 Mg/m^3 (Abb. I).

Durch die Wahl der Dichte nach Verdichtung und durch Einbau mit verschiedenem Hohlraumgehalt zwischen den Formstücken aus hochverdichtetem Bentonit lassen sich praktisch beliebige Quelldrücke bis etwa 60 N/mm^2 erzielen. Die Quelleigenschaften der möglichen Umwandlungsprodukte, Metabentonit und Illit, lassen allerdings hohe Ausgangsdichten wünschenswert erscheinen.

- Einfluss der Bentonitart

Im Bereich der technisch interessanten Trockendichten von über 1,7 Mg/m^3 erreicht der Montigel grössere Quelldrücke als der MX-80.

- Einfluss der Temperatur

Erhöhte Temperaturen beeinflussen die Grösse des Quelldruckes nur wenig, wenngleich bei bestimmten Versuchsabläufen, die auf die Endlagerbedingungen allerdings kaum übertragbar sind, merkliche Einflüsse resultieren.

- Einfluss der Ionenart des Wassers und der Verdichtungsart

Die Einflüsse der Ionenart des angebotenen Wassers (stark Na-haltiges Wasser) im Vergleich zu entmineralisiertem Wasser und der Verdichtungsart (einaxial und allseitig gepresste Proben) sind ebenfalls gering.

- Langzeitstabilität

Im Hinblick auf die Langzeitstabilität des Quelldruckes der Bentonite ist bei den in der Natur vorkommenden Umwandlungsprodukten, Metabentonite und Illit, bei grösseren Dichten noch ein beachtlicher Quelldruck feststellbar.

- Einfluss des Wasserdruckes

Bei einer Wasserdruckerhöhung nimmt der gemessene Quelldruck bei höheren Dichten nicht im vollen Ausmass der Wasserdruckerhöhung zu.

Die Bestimmung der effektiven Zusatzspannungen, d.h. auch die Frage nach der Gültigkeit des Gesetzes über die effektiven Spannungen, ist noch nicht geklärt.

Ein Vergleich der vorliegenden Daten mit den Resultaten der schwedischen Untersuchungen am MX-80 /5, 10/ ist nur beschränkt möglich. Einerseits wurde in Schweden die Probe bei der Messung des Quelldruckes zusammengedrückt, bis die Kraftmessdose entspannt war. Zudem wurde die Versuchstemperatur während den Versuchen nicht in gleicher Weise verändert wie in den Versuchen der Serien 1 und 2. Auch wurde der Quelldruck in Funktion der Feuchtdichte ausgewertet. Legt man einem Vergleich eine vollkommene Wassersättigung der schwedischen Proben zugrunde, so liegen die schwedischen Quelldruckwerte, insbesondere bei hohen Dichten, über den hier ermittelten Werten. Dieses Ergebnis ist in seiner Tendenz aus den Unterschieden in der Versuchsdurchführung erklärbar.

In Abb. I zeigt sich zusammenfassend die grosse Abhängigkeit des Quelldruckes von der red. Trockendichte, wie auch die Bandbreite der geringeren Einflüsse der Bentonitarten und verschiedener Temperaturen.

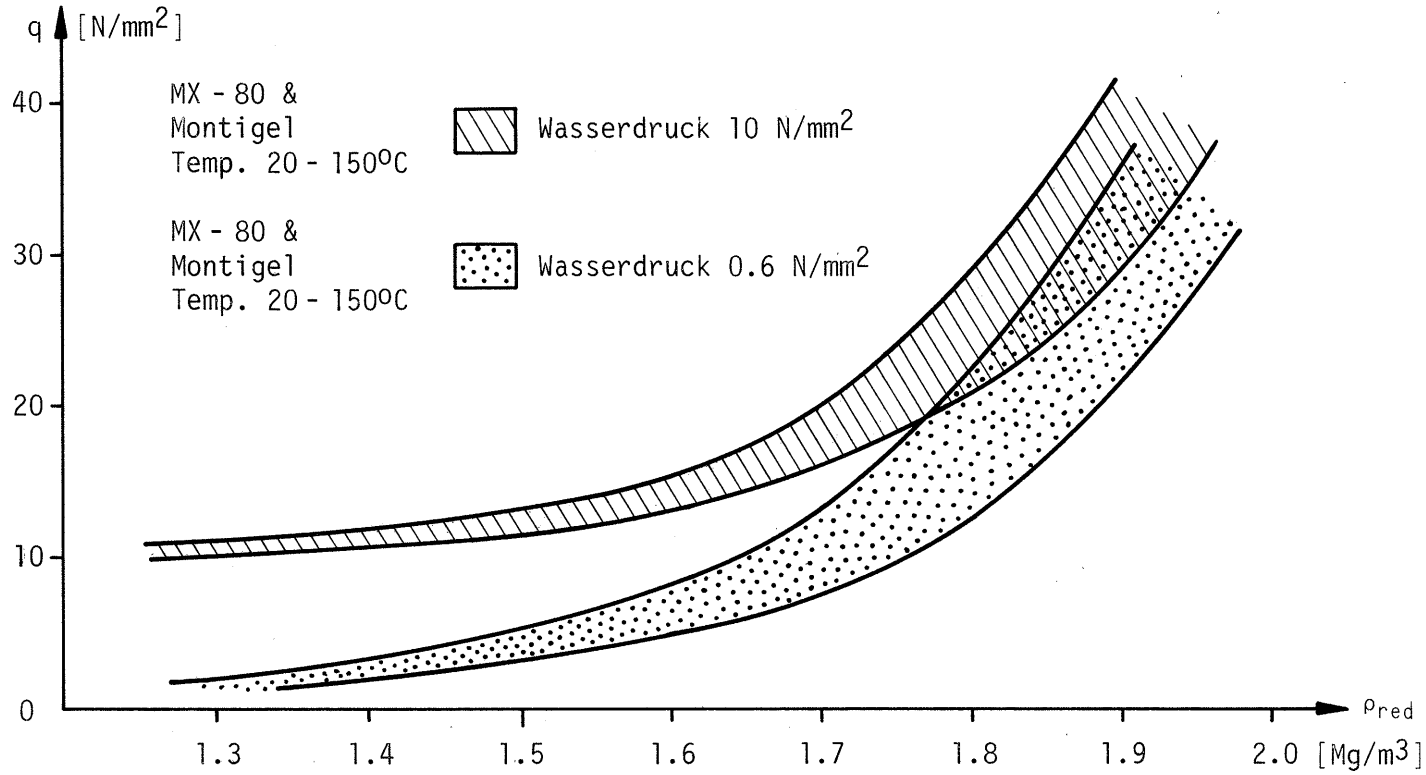


Abb. I: Gemessener Quelldruck q in Funktion der reduzierten Trockendichte ρ_{red}

In Ergänzung der Quelldruckmessungen wurden an MX-80 noch Durchlässigkeitsversuche durchgeführt.
Der mittlere k-Wert ist zu $4 \cdot 10^{-14}$ m/s (Temperaturen von 90 und 150°C, Trockendichte 1,89 Mg/m³) bestimmt worden.

1. EINLEITUNG

Um die im Endlager enthaltenen radioaktiven Stoffe an ihrer Ausbreitung zu hindern, ist nach dem Mehrfachbarrierenkonzept ein Verfüllmaterial zwischen Matrixbehälter und Wirtgestein vorgesehen.

Hochverdichteter Bentonit als mögliches Verfüllmaterial quillt bei Wasserzutritt und dichtet so eventuell entstandene Fugen und Risse. Hochverdichteter Bentonit weist eine sehr kleine Durchlässigkeit auf, so dass Wasserbewegungen sehr stark verlangsamt werden.

Im Institut für Grundbau und Bodenmechanik der ETH Zürich sind bis jetzt die Herstellung und Homogenität von Proben aus hochverdichtetem Bentonit /1/, /2/, die Wärmeleitfähigkeit der betrachteten Materialien /3/ sowie deren mineralogischen Eigenschaften /4/ untersucht worden.

Die im folgenden beschriebenen Untersuchungen des Quellverhaltens befassen sich mit dem auch in Schweden untersuchten Na-Bentonit MX-80 /5/ aus Wyoming und dem für die Schweiz näher gelegenen Ca-Bentonit Montigel aus Bayern.

Der Anlieferungszustand des Montigel ist hierbei pulverförmig, da die Granulatform trotz der besseren Verdichtbarkeit grössere Inhomogenitäten in der verdichteten Probe aufwies /2/.

Um Aussagen über das Langzeitquellverhalten von Bentoniten machen zu können, sind zudem Untersuchungen mit möglichen Umwandlungsprodukten des Bentonites, Metabentonit und Illit, durchgeführt worden.

2. QUELLMECHANISMEN

Bentonite enthalten hauptsächlich Montmorillonit, ein sehr feinkörniges, hochquellfähiges Tonmineral. Jedes Montmorillonit-Teilchen besteht aus etwa 10 bis 20 parallel angeordneten Schichten. Jede Schicht ist etwa 10 Å * dick und besteht aus einer Oktaeder- und zwei Tetraederschichten (Abb. 1). Die Oktaeder bestehen aus Aluminium im Zentrum und Sauerstoff, bzw. Hydroxyl-Gruppen an den Ecken. Die Tetraeder sind aus Silizium und Sauerstoff aufgebaut. Durch den teilweisen Ersatz des Aluminium durch Magnesium erhalten die Schichten eine negative Ladung, die durch Anlagerung austauschbarer Kationen ausgeglichen wird. Der Zusammenhalt der Schichten ist im Montmorillonit so schwach, dass Wasser zwischen die Schichten dringen kann. Durch diese innerkristalline Quellung kann die Oberfläche bis 800 m^2/g zunehmen. Dabei ist das Besondere, dass der grösste Teil der Oberfläche auf so kurze Entfernung parallel angeordnet ist, dass die Oberflächen miteinander in Wechselwirkung treten.

Die Quellung des Montmorillonits findet in zwei Abschnitten statt: Die innerkristalline Quellung auf kurze Entfernung und die osmotische Quellung /6/.
Die innerkristalline Quellung auf kurze Entfernung ist auf die Anlagerung von vier Wasserschichten (Schichtdicke etwa 2,5 Å), d.h. eine Aufweitung auf 10 Å beschränkt. Massgebend ist dabei die Adsorptionsenergie der Oberfläche, vor allem die Hydratationsenergie der Kationen. Im ofentrockenen Montmorillonit liegen die Schichten dicht aufeinander, und die Kationen sitzen in den hexagonalen Vertiefungen der Tetraederschicht. Die Schichten werden durch die verhältnismässig schwache Van der Waals-Anziehung zusammengehalten, die noch durch die Abstossung der in die Schichten eingelassenen Kationen geschwächt wird. Zur Bildung der ersten Wasserschicht ordnen sich vier Wassermoleküle planar um die Kationen an (Abb. 2). Die Vierer-Koordination geht dann zur Bildung der Zweifachschicht in eine Sechser-Koordination über, d.h. jedes Kation ist dann oktaedrisch von sechs Wasser umgeben (Abb. 3). Die Kationen heben sich aus den hexagonalen Vertiefungen und ordnen sich auf der Mittelebene zwischen den Schichten an. Die Schichten werden nun neben der Van der Waals-Anziehung durch die auf der Mittelebene zwischen den Schichten liegenden Kationen zusammengehalten. Die hohen Quelldrücke der ersten und zweiten Wasserschicht entsprechen weitgehend der Differenz der Hydratationsenergie der Kationen und der Anziehung der Schichten. Mit der Bildung der zweiten Wasserschicht ist die Hydratation

---

* 1 Å = 10^{-8} cm = 10^{-7} mm.

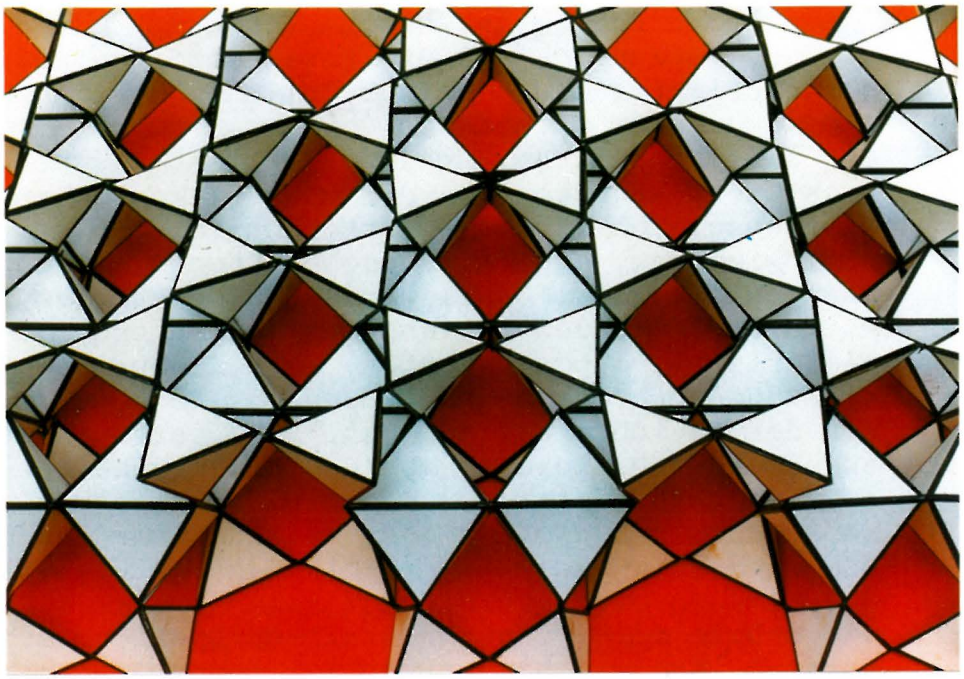
abgeschlossen. Nach Auffüllung der Zwischenräume wird je eine Wasserschicht durch Wasserstoffbrücken an die Sauerstoffebene der Tetraederschichten angelagert. Mit der Bildung der dritten und vierten Wasserschicht, d.h. mit der Verdoppelung des Montmorillonitvolumens, wird die Osmose zur treibenden Kraft.

Die osmotische Quellung beruht auf der unterschiedlichen Ionenkonzentration im Zwischenschichtraum und im Porenwasser. Gewöhnlich ist die Kationenkonzentration im Zwischenschichtraum und an der Teilchenoberfläche wesentlich grösser als im umgebenden Porenwasser. Da die Kationen den Zwischenschichtraum aus elektrostatischen Gründen nicht verlassen können, diffundiert Wasser zum Konzentrationsausgleich in den Zwischenschichtraum und drückt die Schichten bzw. die Teilchenoberflächen benachbarter Teilchen auseinander. Dabei wandern die Kationen von der Mittelebene zu den Schichtoberflächen und bilden mit ihnen elektrische Doppelschichten. In den Doppelschichten nimmt die Konzentration der Kationen mit zunehmender Entfernung von der Schichtoberfläche ab. Es entsteht also ein mit zunehmender Entfernung von der Oberfläche abnehmendes, negatives Potential. Ueberschneiden sich die Potentiale benachbarter Schichten oder Teilchenoberflächen, stossen sie sich ab. Diese Doppelschichtabstossung entspricht dem osmotischen Druck. Die osmotischen Drücke sind kleiner als die Drücke durch innerkristalline Quellung auf kurze Entfernung, und sie hängen von der Ionenkonzentration im Porenwasser und von der Wertigkeit und dem Radius der Gegenionen ab. Die osmotische Quellung nimmt mit steigender Elektrolytkonzentration im Porenwasser und mit steigender Wertigkeit und grösser werdendem Radius der Gegenionen ab.

Der Ausbauwassergehalt lag bei unseren Quelldruckuntersuchungen meist unter 30 % (s. Beilage 2). Der Montmorillonitgehalt betrug im Wyoming Bentonit MX-80 75 % und im Montigel 66 % (NTB 83-12). Nimmt man nach van Olphen (1975) im Durchschnitt 0,1 g Wasser pro Gramm Montmorillonit zur Ausbildung einer Wasserschicht an, dann wurde das Quellpotential bei unseren Untersuchungen an hochverdichtetem Bentonit vorwiegend durch innerkristalline Quellung auf kurze Entfernung erzeugt.

Der maximale Quelldruck stellt sich ein, wenn bei der Wasseraufnahme jegliche Deformation verhindert wird. Werden Deformationen (Volumenvergrösserungen) zugelassen, so sinkt der Quelldruck.

Abb. 1: Montmorillonit-Schicht, 10 Å dick, bestehend aus einer Oktaeder- und zwei Tetraederschichten, mit hexagonalen Oeffnungen in den Tetraederschichten.



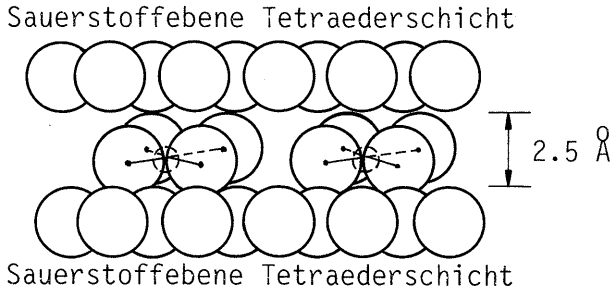


Abb. 2: 1. Wasserschicht mit planarer Anordnung von vier Wassermolekülen um jedes Kation. Aufweitung des Schichtabstandes um etwa 2.5 Å.

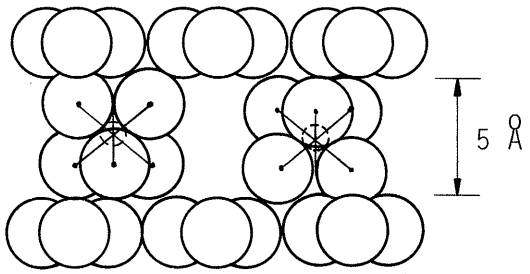


Abb. 3: 1. und 2. Wasserschicht mit oktaedrischer Anordnung von sechs Wassermolekülen um jedes Kation. Aufweitung des Schichtabstandes auf etwa 5 Å. Die Kationen liegen auf der Mittelebene zwischen den Schichten.

3. QUELLDRUCKAPPARATUR

3.1 Beschrieb der Messeinrichtung

Die hochverdichteten Bentonitproben (Ø 56.4 mm, Höhen von 15 bis 30 mm) quellen bei Wasserzutritt auf.

Um die hierbei entstehenden Drücke, bis 60 N/mm^2 bzw. 150 kN (auf 25 cm^2 Fläche), unter Berücksichtigung weiterer Anforderungen (s. Seite 7) messen zu können, ist die in den Abbildungen 4 und 5, sowie der Schnittzeichnung in Abb. 6 dargestellte Apparatur im Jahre 1981 in der Werkstatt des IGB konstruiert worden.

Insgesamt stehen heute 13 Quelldruckapparaturen zur Verfügung, zuzüglich 4 gleiche Apparaturen, jedoch ohne Quelldruckmessung, für die Versuche über Ionendiffusion.

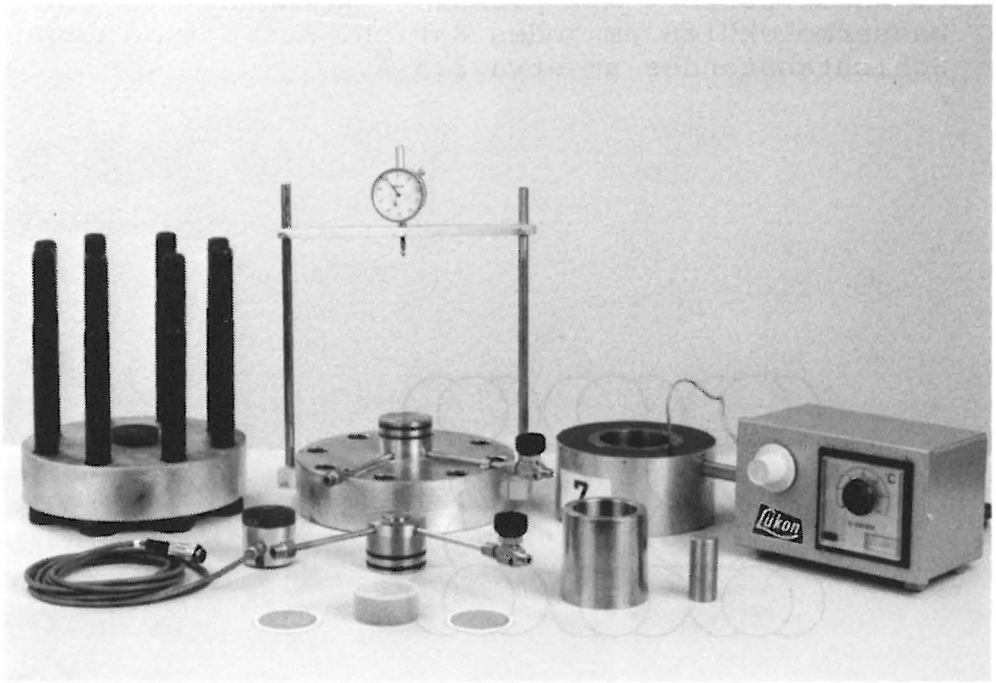


Abb. 4: zerlegte Quelldruckapparatur

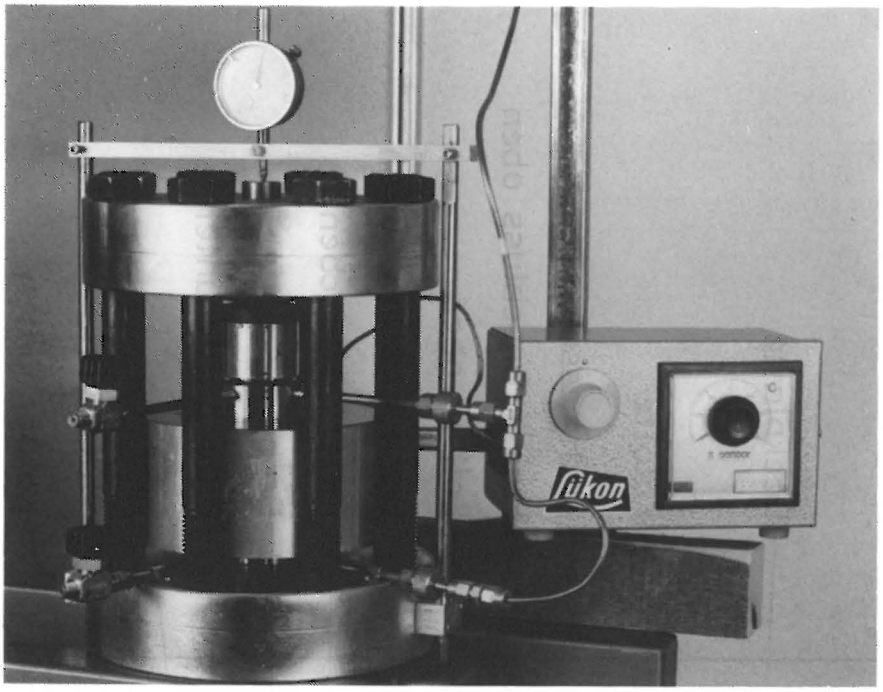


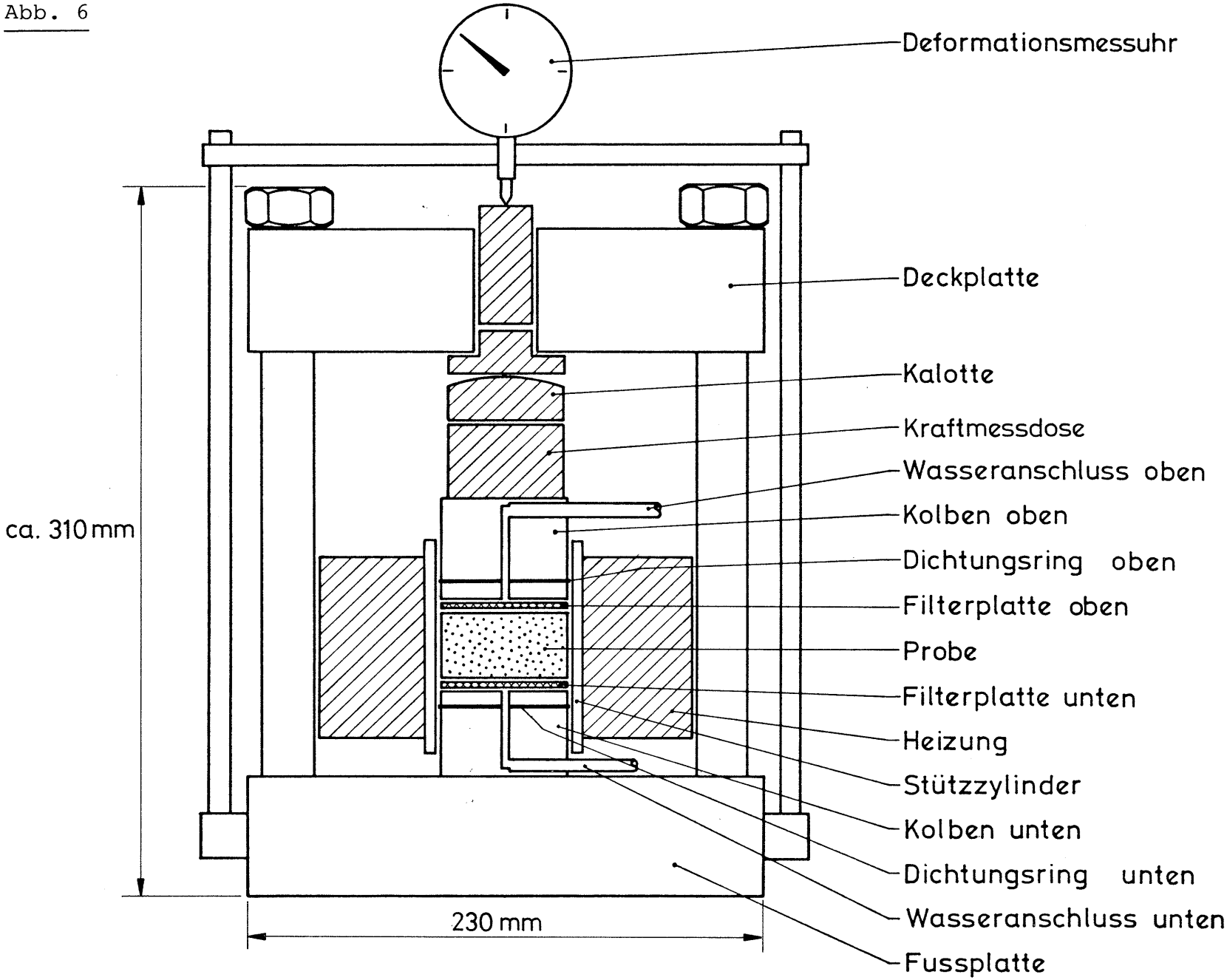
Abb. 5: im Betrieb stehende Quelldruckapparatur

Die wichtigsten Anforderungen an die Einrichtung waren:

- Nur sehr geringe vertikale Deformationen (Grössenordnung wenige Zehntel-Millimeter). Radiale Deformationen werden durch den Stützzylinder weitgehend verhindert.
- Wasserzugabe oben und unten an der Probe mit Drücken bis zu 10 N/mm^2.
- Probentemperaturen bis zu 150°C realisierbar.
- Kräfte von maximal 150 kN messbar.

Prinzipiell wird hierzu die im Stützzylinder verdichtete Probe zwischen 2 massiven Platten eingespannt, und der Quelldruck in vertikaler Richtung wird von einer dazwischenliegenden Kraftmessdose bestimmt.

Abb. 6



Schnitt durch die Quelldruckapparatur

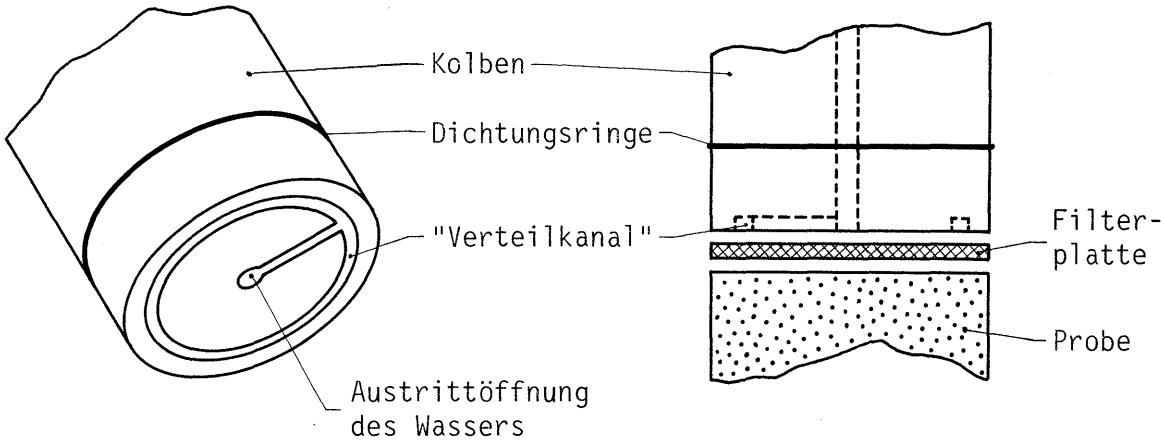


Abb. 7: Detail der Apparatur; Verteilung des Wassers auf die gesamte Probenoberfläche

Ein Problem für die Kraftmessung ist die relativ hohe Innentemperatur von 115°C, der die selber hergestellten Druckdosen ausgesetzt sind, wenn die Bentonit-Probe auf 150°C erhitzt wird.

Einige dieser als Hohlzylinder mit Dehnmessstreifen bestückten Druckdosen hielten denn auch offensichtlich den mechanischen Anforderungen (Temperaturen über 100°C, Kräfte bis 150 kN während mehreren Monaten) nicht stand.

Dies zeigte sich in den Versuchswerten an einem starken Druckabfall, der auf das übermässige Kriechen des Kraftmesssystemes zurückzuführen sein dürfte.

Diese Schwierigkeit, besonders bei der Langzeitkraftmessung, wurde durch den Einbau eines Wärmeableitbleches und der Umdisposition der Kalotte teilweise behoben (Abb. 8).

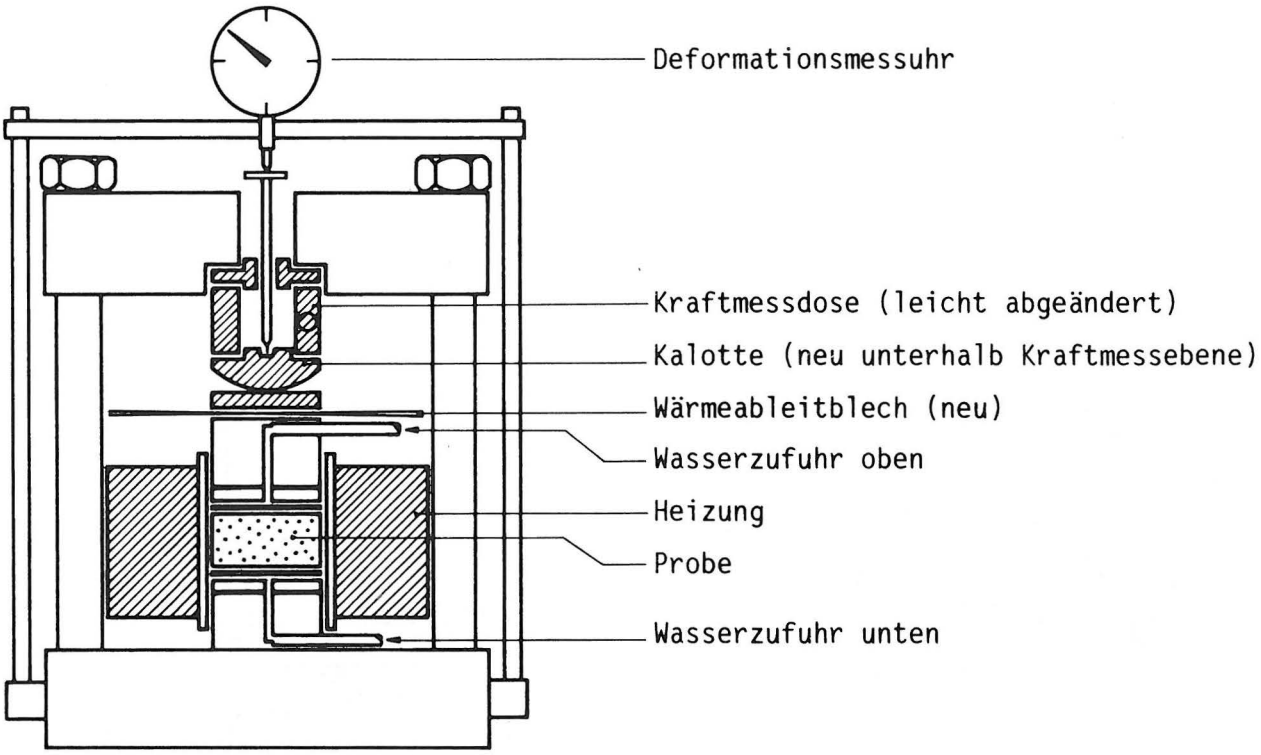


Abb. 8: Schnitt durch die umgebaute Quelldruckapparatur

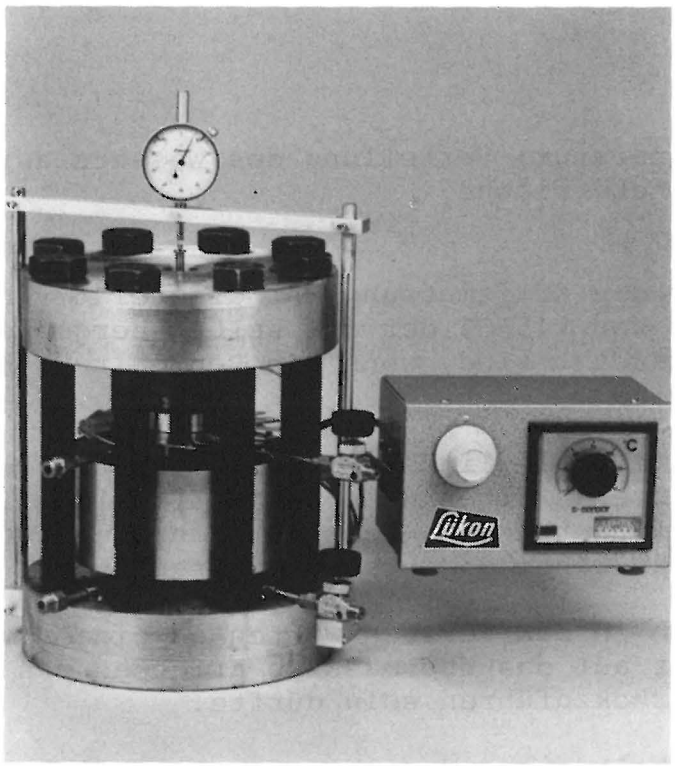


Abb. 9: umgebaute Quelldruckapparatur

Die Temperatur der Druckdose konnte mit den aus Abb. 8 ersichtlichen Massnahmen auf 75°C gesenkt werden.

Im übrigen sind in den neu hergestellten Kraftmessdosen noch zusätzliche Dehnmessstreifen und mechanisch wiederstandsfähigere Drähte eingebaut.

Diese so veränderten Druckdosen kamen ab Herbst 1983 zum Einsatz.

Ueber die Kennwerte der Kraftmessdosen gibt Pkt. 3.2 Auskunft.

Für die im Januar 1984 begonnenen Langzeitquellversuche sind zudem 2 Druckdosen der Firma HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, BRD) eingesetzt.

Wie aus Abb. 8 ebenfalls ersichtlich, ist das Deformationsmesssystem (für die Versuche ab Herbst 83) leicht abgeändert worden.

3.2 Einfluss der Kraftmessung auf den gemessenen Quelldruck

Die Druckdosen sind in der Werkstatt des IGB 1981 konstruiert und gefertigt worden.

Geeicht wurden die Kraftmessdosen bei verschiedenen, kurzzeitig wirksamen Laststufen bei einer bestimmten Temperatur.

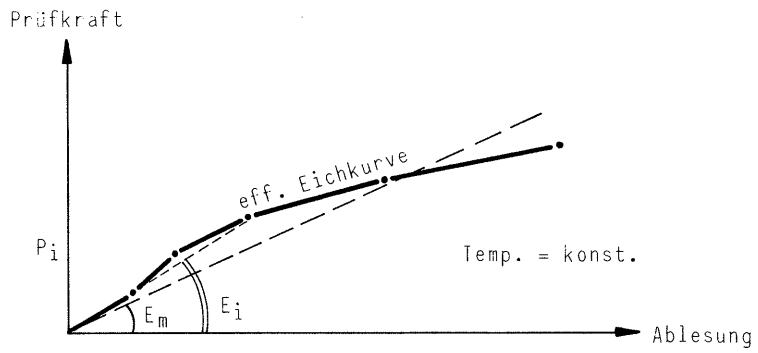


Abb. 10: Eichkurve

Für die Berechnung der Kräfte aus den Ablesungen während der Versuche ist für den ganzen Temperaturbereich ein mittlerer Eichwert E_m eingesetzt worden.

Versuche haben aber gezeigt, dass sich daraus im Bereich von 20°C bis 150°C Fehler ergeben, die bei kleinen Spannungen (10 N/mm²) etwa ± 10 %, dann abnehmen und über 40 N/mm² noch etwa ± 5 % betragen.

Besonders im unteren Kraftbereich weisen die vom IGB hergestellten Druckdosen z.T. beträchtliche Differenzen zu E_m auf, wobei zu bemerken ist, dass ca. 70 % der Versuchswerte (Quelldrücke) im Bereich der grössten Abweichungen von E_m liegen, d.h. bei Spannungen <16 N/mm².

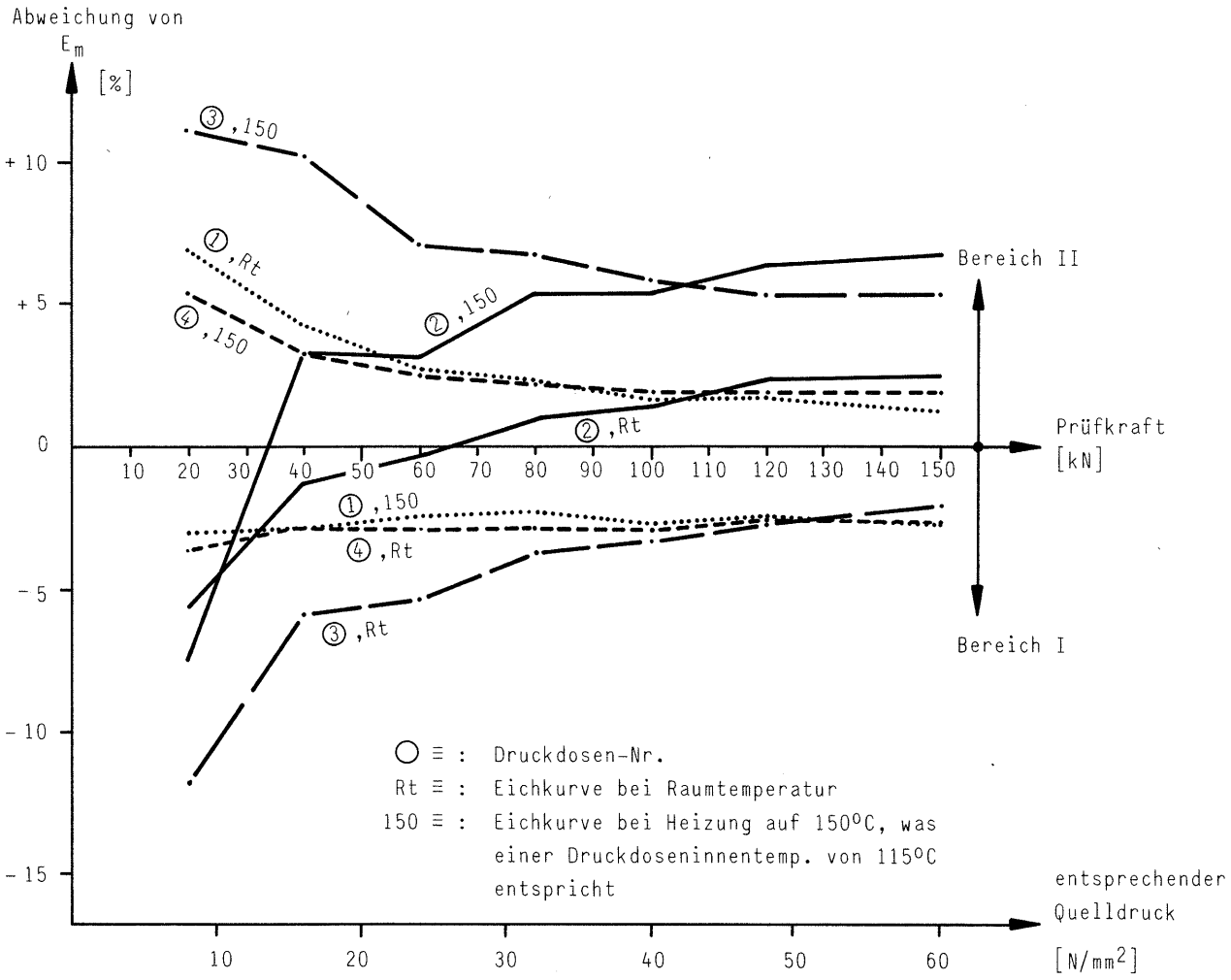
Nebst der Linearitätsabweichung (vgl. Abb. 10) bei kurzzeitiger Eichung sind noch weitere Faktoren erwähnenswert:

- Verschiebung des Messwertes (Nullpunkt oder unter Last) inf. Aufheizen der Kraftmessdosen
  Bsp. Erhitzen der Druckdosen von
  20 → 115°C Innentemperatur ergibt
  Verschiebungen von 1 - 6 kN im
  Mittel

- Versuche, bei denen während mehrerer Stunden die Last konstant gehalten wird, ergeben infolge Kriechen abfallende Ablesungen
  Bsp. Last : 150 kN
  Temperatur: Raumtemperatur
  Abfälle von 1 - 2 % innert 24 Stunden;
  Tendenz weiter fallend.
  Für erhöhte Temperatur wird das
  Kriechen noch stärker, für kleinere
  Lasten nimmt es ab.

- Die mittleren Eichwerte der Eichung im Sommer 1982 (nur bei Raumtemperatur) weichen um 5 - 10 % von denjenigen (derselben Druckdose) im Herbst 83 (bei Raumtemperatur bestimmten) ab.

Diesen Fehlerquellen bei der Kraftmessung, die besonders auch durch die z.T. hohen Versuchstemperaturen verursacht sind, kommt insofern keine grosse Bedeutung zu, als die genaue Grösse des Quelldruckes von untergeordneter Bedeutung ist. Es wurden daher auch keine Korrekturgrössen in den Auswertungen berücksichtigt.



Bereich I : Bereich, wo mit E_m die effektive Kraft (mit E_i berechnet) unterschätzt wird

Bereich II : Bereich, wo mit E_m die effektive Kraft (mit E_i berechnet) überschätzt wird

Abb. 11: Abweichungen des Eichwertes bei einer bestimmten Laststufe vom mittleren Eichwert E_m

4. VERSUCHSKONZEPTION

4.1 Materialien

Wie schon in der Einleitung erwähnt, wurden der Na-Bentonit MX-80 aus Wyoming, USA (Granulatform), und der Ca-Bentonit Montigel aus Bayern (pulverförmig) auf ihr Quellpotential hin untersucht.

Ebenso wurden 2 Umwandlungsprodukte des Bentonites, Metabentonit und Illit, untersucht, dies im Hinblick auf das Langzeitverhalten von Bentoniten.

Der Metabentonit (mit der Bezeichnung Probe B) stammt aus Kinnekulle (Südwest-Schweden), der Illit aus dem Massif Central (Frankreich). Details zur Herkunft dieser Proben geben Referenzen /1/, /4/ und /9/.

4.2 Parameter

Die folgenden Einflüsse auf den Quelldruck der Bentonite wurden untersucht:

Einfluss
- der Trockendichte
- der Temperatur
- der zugelassenen Volumendeformation
- der verschiedenen Materialtypen
- der Ionenart des Wassers
- des Wasserdruckes
- der Verdichtungsart
- des Versuchsablaufes
- der Zeit
- der Messeinrichtung

Durch die Verknüpfung von Trockendichte und Volumendeformation zu einer sog. reduzierten Trockendichte konnte die Auswertung etwas übersichtlicher gestaltet werden. Es hat sich ergeben, dass die Einflüsse von zugelassenen Volumendeformationen durch die reduzierte Trockendichte beschrieben werden können. D.h. aufgrund der Versuche ist der Quelldruck von der Trockendichte am Ende des Versuches, der sogenannten reduzierten Trockendichte, abhängig.

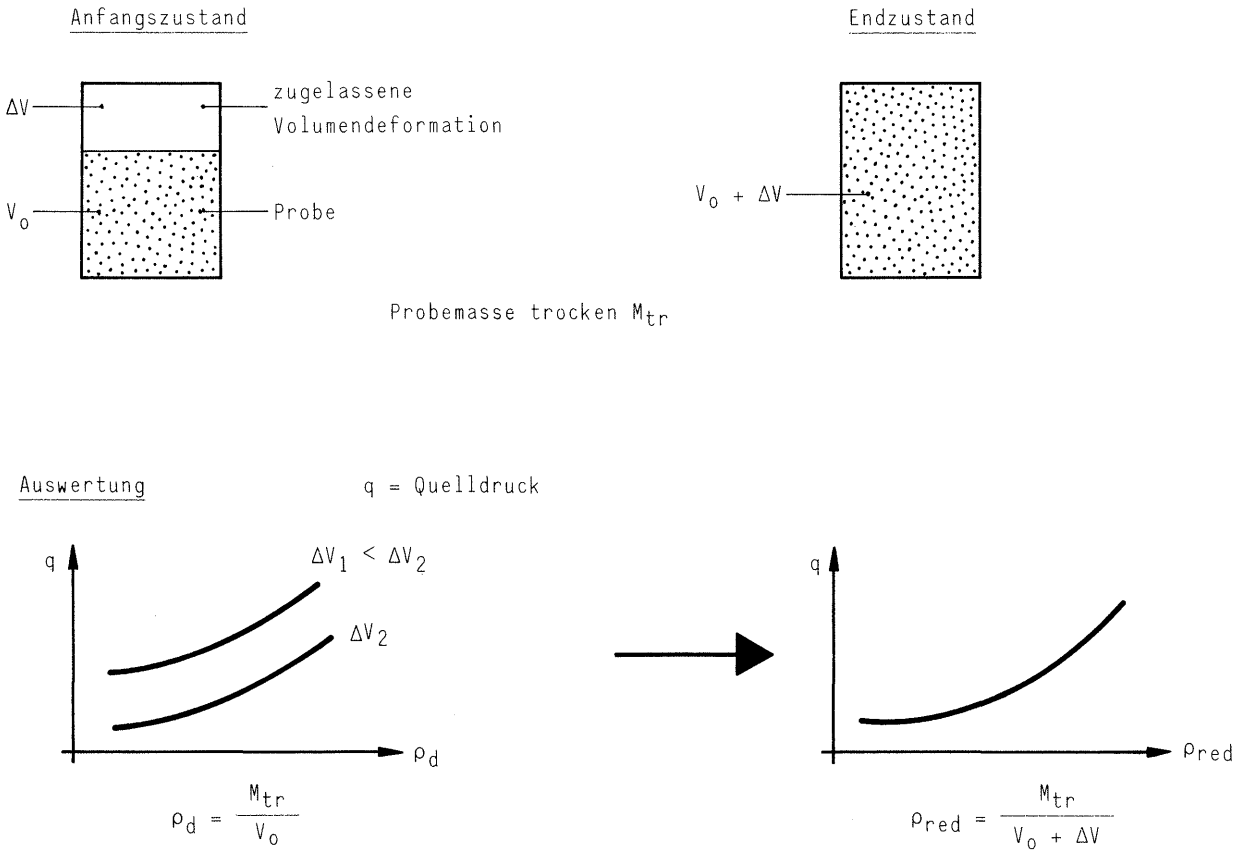


Abb. 12: Erklärung der Grösse von ρ_{red} (reduzierte Trockendichte)

4.3 Versuchstypen

4.3.1 Vorversuche

Die Ziele waren:

- Erprobung der neuentwickelten Apparatur,
- evtl. notwendige Aenderungen vornehmen zu können,
- die Grössenordnung der zu erwartenden Quelldrücke zu erfassen,
- sowie den notwendigen Gegendruck auf das entmineralisierte Wasser bei erhöhter Temperatur (bis 150°C) zu bestimmen.

Hierzu wurden ca. 29 Vorversuche zwischen Juli und November 81 durchgeführt (an MX-80 und Montigel). Die Details befinden sich in Beilage 1, S. 49 und 50.

4.3.2 Serie 1/2

Der Versuchsablauf ist anhand der im Endlager zu erwartenden Endlagerbedingungen in Zusammenarbeit mit der NAGRA zusammengestellt worden.

- Zu Beginn hohe Temperaturen,
- Vorerst ohne, dann mit Wasser,
- Anschliessend Temperaturabnahme und ein zunehmender Wasserdruck.

Diese prinzipiellen Ueberlegungen führten zur Abfolge der Versuchszustände der Serien 1 und 2.

SERIE 1

Wasserdruck N/mm^2	ohne Wasser	0.6	10	0.6	10	10
Temperatur ^oC	150	150	150	90	90	20

1.Woche	2.Woche	3.Woche	4.Woche	5.Woche	6.Woche

SERIE 2

Wasserdruck N/mm^2	ohne Wasser	0.6	10	10
Temperatur ^oC	90	90	90	20

Abb. 13: Zustandsänderungen bei Ablauf nach Serie 1/2

Der Unterschied der beiden Abläufe liegt in der höheren Temperatur und der grösseren Anzahl von Zustandsänderungen bei Serie 1.

Die oben beschriebenen Versuchsabläufe sind für MX-80 und Montigel angewendet worden; je 6 Versuche pro Material und Versuchsablauf.

Für Metabentonit und Illit ist ein reduziertes Versuchsprogramm zur Durchführung gekommen, mit je 8 Versuchen analog Serie 2, wobei die anfängliche Temperatur nicht 90°C, sondern 50°C betrug und zudem auf das Vorheizen verzichtet wurde. Dies ist dadurch begründet, dass die Umwandlung von Bentonit, wenn überhaupt, sehr langsam vor sich geht. Umwandlungsprodukte sind, wenn überhaupt, also erst vorhanden, wenn die Temperaturen niedriger sind.

4.3.3 Versuche zu einzelnen Einflüssen

Es sind insgesamt 56 solcher Versuche durchgeführt worden.

Versuchsziel	Material	Anzahl
Einfluss grosser Volumendeformationen	MX-80 Montigel	5 5
Einfluss der Vorheiztemperatur	MX-80 Montigel	6 6
Einfluss der Zwischenaustrocknung	MX-80 Montigel Illit	3 2 2
Einfluss der Ionenart	MX-80	5 [1]
Einfluss der Zeit (Langzeitstabilität)	MX-80 Montigel	2 [2] 4 [1]
Einfluss chem./mechan. Behandlungen	Meta-bentonit	4
Einfluss verschiedener Wasserdrücke	MX-80	4
Einfluss der Temperatur	Montigel	2
Einfluss der Verdichtungsart	Montigel MX-80	3 3

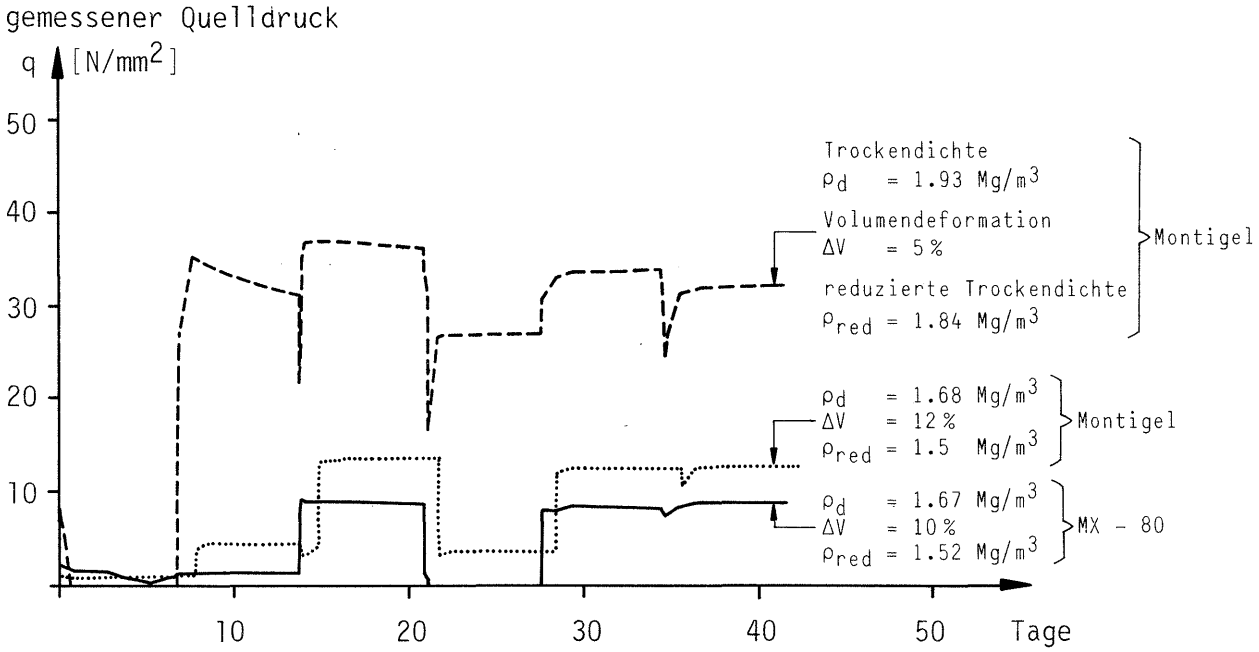
1: 3 davon vorzeitig abgebrochen

2: 1 davon vorzeitig abgebrochen

Tab. 14: Tabelle der Einzelversuchsziele und -anzahl

Serie 1

ohne Wasser	0.6	10	0.6	10	10	Wasserdruck [N/mm^2]
150	150	150	90	90	20	Temperatur [°C]



Serie 2

ohne Wasser	0.6	10	10	Wasserdruck [N/mm^2]
90	90	90	20	Temperatur [°C]

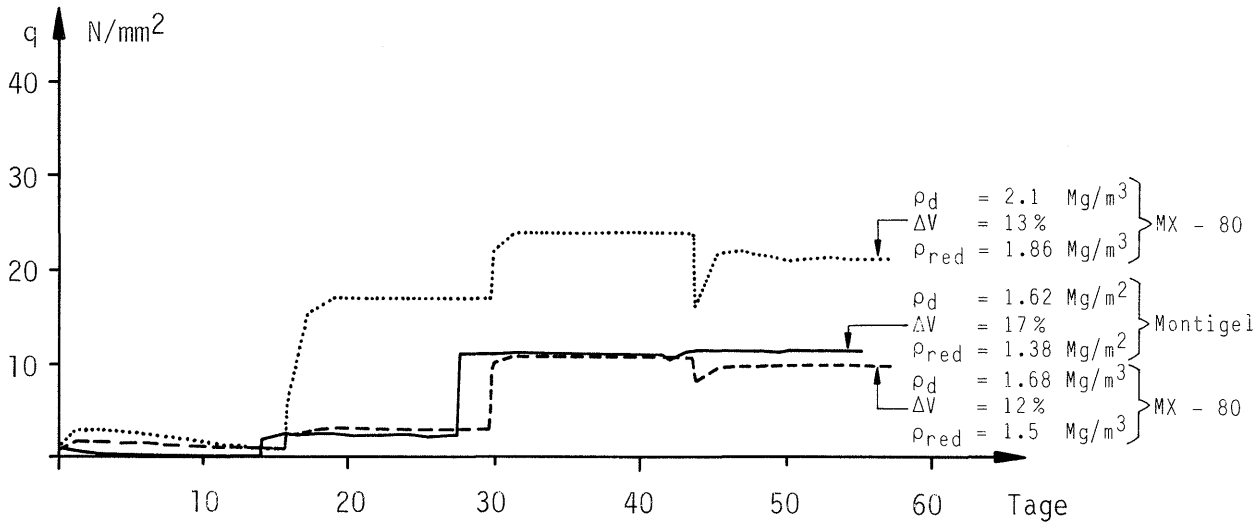


Abb. 15: Typische Quelldruckverläufe Serie 1 & 2

5. AUSWERTUNGEN

In den folgenden Diagrammen sind die Werte aus den einzelnen Versuchen durch Kurven approximiert, um so Abhängigkeiten deutlicher sichtbar zu machen.

Es sei darauf hingewiesen, dass in sämtlichen wiedergegebenen Diagrammen der gemessene Quelldruck sich aus dem effektiven Quelldruck und einem Anteil des äusserlich aufgebrachten Wasserdruckes zusammensetzt. Dies kann gut der Abb. 15 entnommen werden: Bei Wasserdruck-Aenderungen ändert sich auch der gemessene Quelldruck q, jedoch nicht immer um gleich viel wie der Wasserdruck. Im übrigen wird ein Quelldruck überhaupt erst gemessen, wenn Wasser zugegeben wird.

Falls nicht ausdrücklich erwähnt, sind die Proben mit unserer Verdichtungsmulde, d.h. einaxial gepresst, und für die Quellung ist entmineralisiertes Wasser benützt worden.

Als wichtigster Einfluss hat sich die Trockendichte des Materials herausgestellt.
Dazu gehört auch der Einbezug von Volumendeformationen, die wie in Abb. 12 dargestellt, mit der bei Versuchsbeginn bestimmten Trockendichte ρ_d zu einer sog. reduzierten Trockendichte ρ_{red} verbunden worden sind.

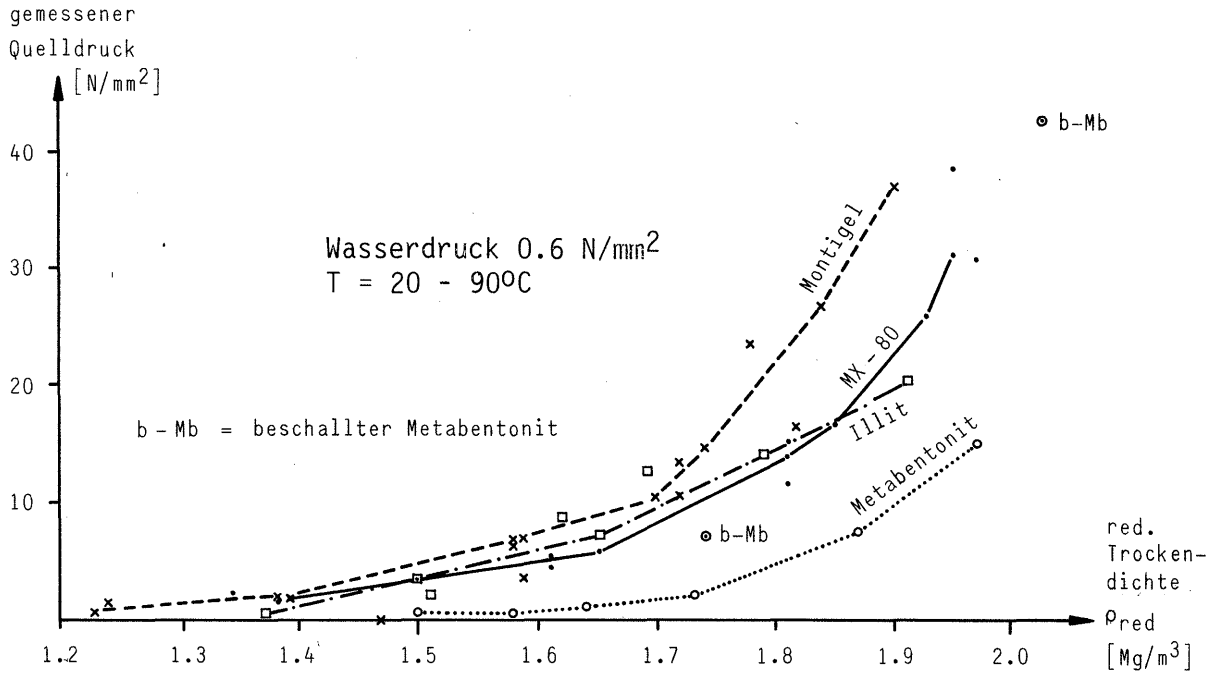
5.1 Einfluss der Materialtypen

Wie aus der Abb. 16 ersichtlich, liefert der bayerische Montigel einen grösseren Quelldruck als der MX-80.

Auffallend ist der hohe Quelldruck des Illites und der niedrige Quelldruck des Metabentonites. Zu erwarten wäre eher, dass der Metabentonit, eine Wechsellagerung von Montmorillonit und Illit, den höheren Quelldruck aufweist, als die letzte Stufe der Umwandlung, der durch Ka-Fixierung entstandene Illit.

Die Ursachen für den verhältnismässig hohen Quelldruck des Illits sind noch nicht bekannt.

Dagegen scheint das niedrige Quellpotential des Metabentonites auf eine unvollständige Wasseraufnahme zurückzuführen zu sein. Dispergiert man den Metabentonit durch Ultraschallbehandlung /8/, steigt der Quelldruck bei einer Trockendichte von 1,74 Mg/m^3 von 1,8 auf 7,3 N/mm^2 und bei einer Trockendichte von 2,02 Mg/m^3 von 17,7 auf 43 N/mm^2 (Abb. 17).



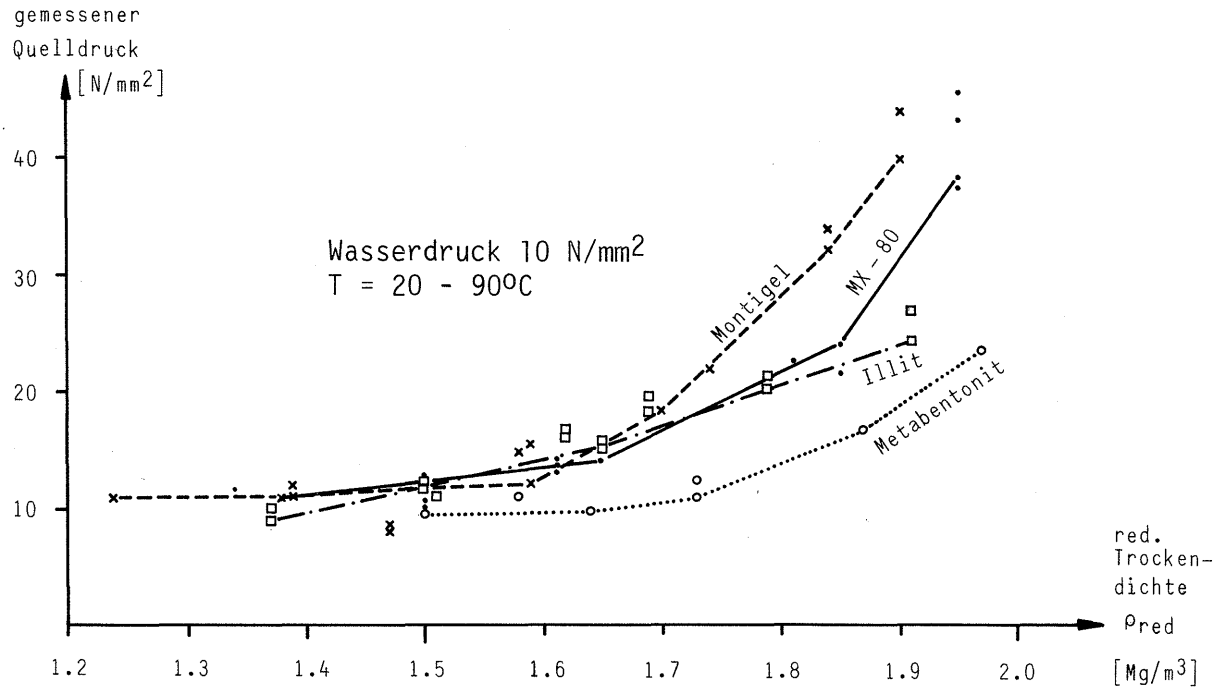


Abb. 16: Vergleich der Quelldrücke verschiedener Materialien

5.2 Einfluss von Temperaturänderungen

5.2.1 Einfluss einer Temperaturänderung aufgrund der Serien 1 und 2

In Serie 1 wurden die Temperaturen 150, 90 und 20°C, in Serie 2 90 und 20°C in ihrem Einfluss auf den Quelldruck untersucht. Im allgemeinen haben sich dabei bei höheren Temperaturen in geringem Masse höhere Drücke ergeben. Die typischen Versuchsabläufe von Abb. 15 sind Beispiele für diesen Sachverhalt. So wurde etwa an Montigel (Versuch B 100 jeweils bei einem Wasserdruck von 10 N/mm^2) bei 150°C ein Druck von 36.7 N/mm^2, bei 90°C 33.6 N/mm^2 und bei 20°C 31.9 N/mm^2 gemessen. Für alle weiteren Versuche der Serien 1 und 2 gehen die ermittelten Werte aus Beilage 1 im Detail hervor.

Allerdings sind die ermittelten Druckunterschiede zum grösseren Teil versuchstechnisch bedingt. Die Temperaturen von 150°C haben bei der in den Serien 1 und 2 vorhandenen Anordnung der Druckdosen zu Doseninnentemperaturen von ca. 115°C geführt. Diese Temperaturen konnten sowohl eine Nullpunktverschiebung wie auch eine Messwertveränderung zur Folge haben und damit Druckunterschiede von etwa 1 N/mm^2 bis 5 N/mm^2 bewirken. Die gemessenen Druckunterschiede sind daher - mindestens zu einem beachtlichen Teil - nicht eine Folge des Materialverhaltens.

5.2.2 Einfluss einer Temperaturzunahme aufgrund von Einzelversuchen

In einzelnen Versuchen wurde der Temperaturablauf gegenüber den Serien 1 und 2 verändert, indem die Temperatur während dem Versuch zuerst stufenweise erhöht wurde. Als Beispiel ist ein Versuch in Abb. 17 schematisch dargestellt.

Allerdings entsprechen solche Temperatur-Zyklen kaum den Endlagerbedingungen, bei denen die Temperatur des Verfüllmaterials zuerst ansteigt und später abnimmt. Diesen Bedingungen sind die Serien 1 und 2 angepasst.

Beim ersten Ansteigen der Temperatur tritt eine Abnahme des gemessenen Quelldruckes ein, wenn man die Probe zuerst bei Raumtemperatur und ohne grossen Druck quellen lässt. Dies ist im Gegensatz zu den Resultaten aus Serie 1/2.

Erst nach Auffinden einer "stabilen Lage" stellt sich bei Temperaturzunahme eine Quelldruckzunahme ein.

Aufgrund verschiedener Einzelversuche, deren Ablauf prinzipiell wie folgt aussieht:

1. Quellen bei Raumtemperatur	Quellen bei erhöhter Temp.	2. Quellen bei Raumtemperatur
q_o	$- \Delta q$	q_1

ergibt sich, wie auch aus Abb. 17 ersichtlich, eine Quelldruckabnahme von im Mittel 20 - 30 % bezogen auf q_o , und nicht eine Quelldruckzunahme $+ \Delta q$, wie aufgrund Serie 1/2 zu erwarten wäre (für MX-80 und Montigel).

5.2.3 Einfluss des Vorheizens von Proben

Das Trocknen der Proben vor Versuchsbeginn hat keinen signifikanten Einfluss auf die Quelldrücke. Dies aufgrund von Versuchen zum Einfluss der Vorheiztemperatur. Wird hingegen eine bereits im Versuchsgerät aufgequollene Probe wieder ausgetrockent, so ergibt sich bei erneuter Quellung ein kleinerer Quelldruck als ursprünglich. Der Abfall beträgt im Mittel für MX-80, Montigel und Illit 20-40 %. Allerdings ist ein derartiger Ablauf von Quellung, anschliessende Trocknung und wiederum Quellung für das Endlager kaum von Bedeutung.

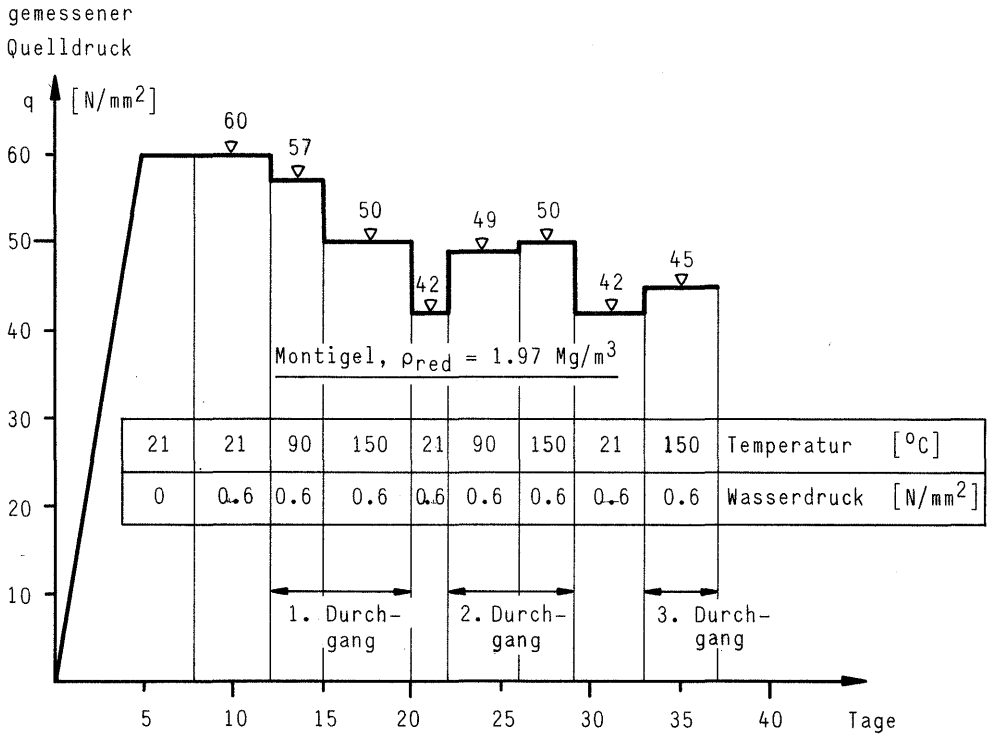


Abb. 17: Beispiel zum Temperatureinfluss

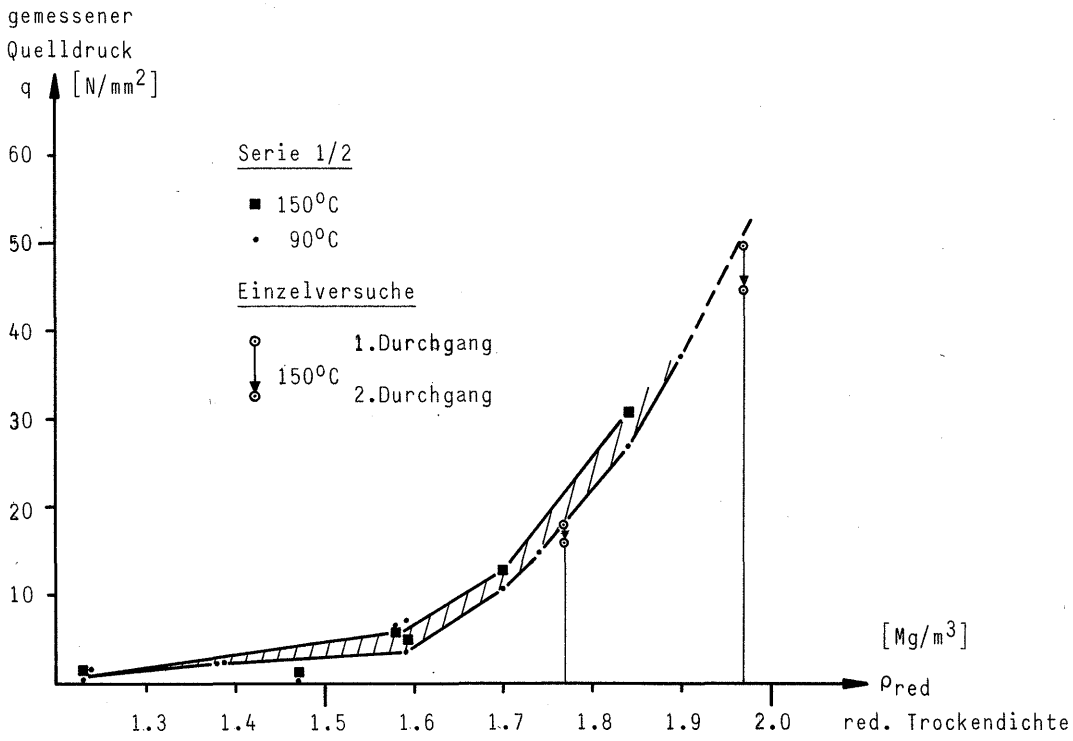


Abb. 18: Vergleich mit den Werten aus Serie 1/2
nur Montigel, Wasserdruck 0.6 N/mm2

5.3 Einfluss des Wasserdruckes

Wird der Wasserdruck von 0.6 auf 10 N/mm² erhöht, so entspricht die Differenz der totalen gemessenen Quelldrücke vorher und nachher nur 60 - 100 % der Wasserdruckerhöhung, d.h. nur 5.5 bis 9.4 N/mm².

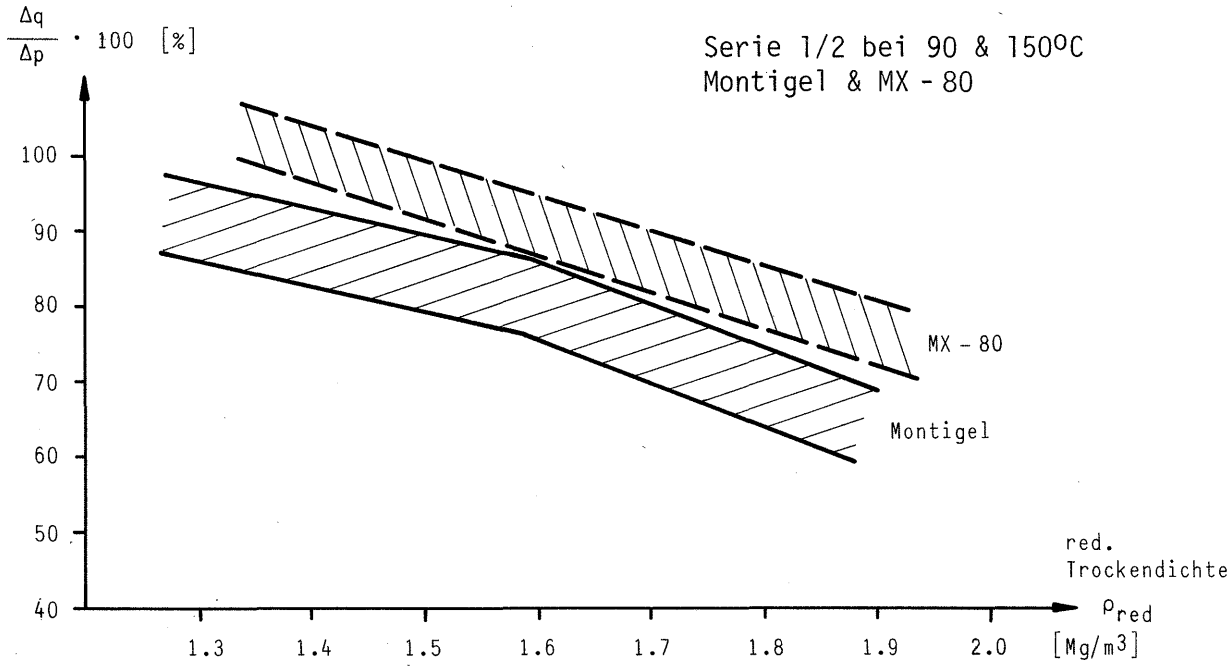
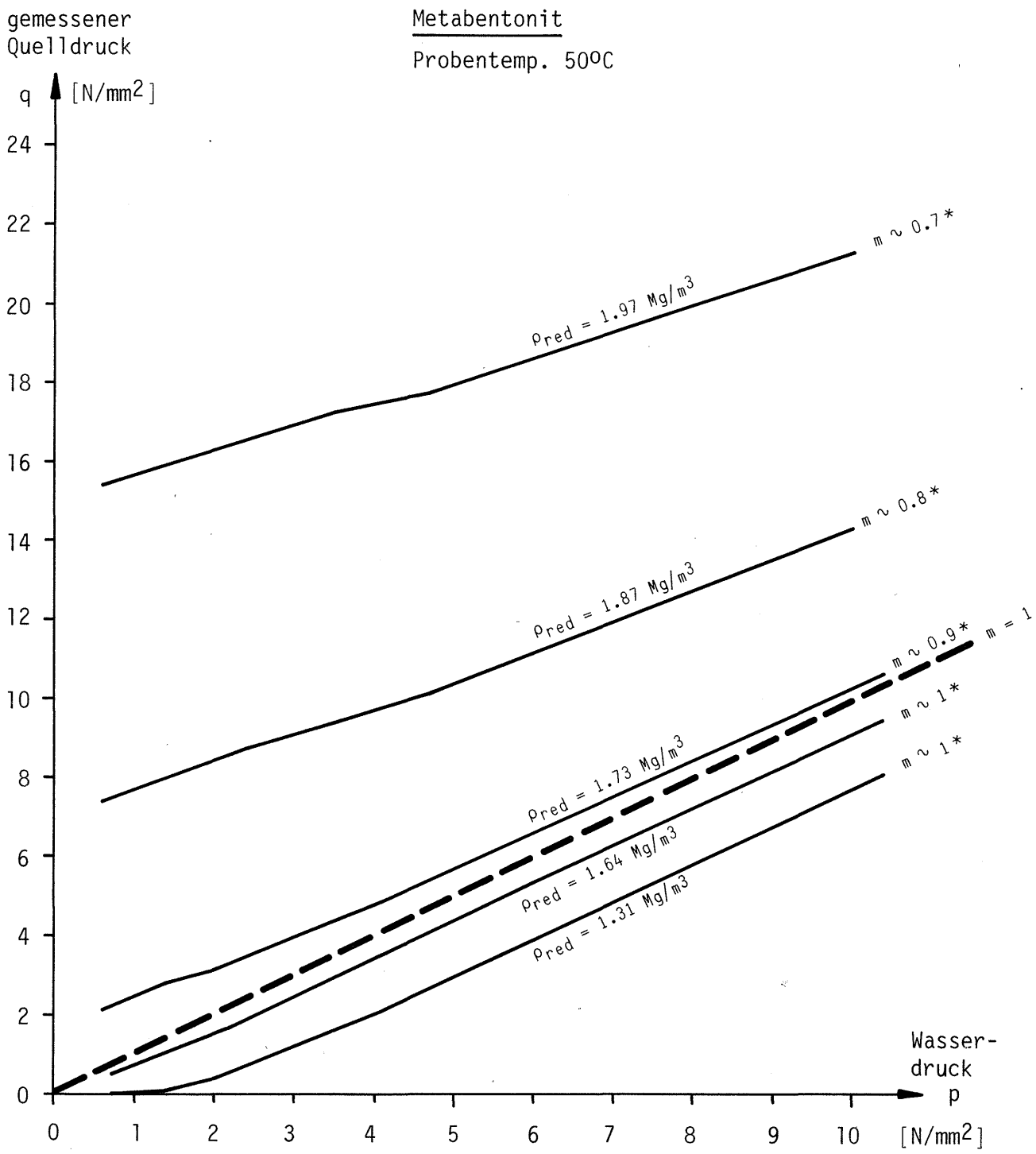


Abb. 19: Gemessene Quelldruckänderung Δq im Verhältnis zur aufgebrachten Wasserdruckänderung Δp in Funktion der Dichte

Mit zunehmender Dichte wird immer weniger von der Wasserdruckänderung angezeigt (Abb. 19).

Dasselbe Verhalten ist auch aus Abb. 20 ersichtlich.

Eine Erklärung für diese Erscheinung kann nicht gegeben werden. Sie dürfte erst möglich sein, wenn die Frage der Bedeutung der totalen und effektiven Spannungen in einem hoch verdichteten Bentonit geklärt ist.



* Annahme: Approximation der Werte durch Geraden $q = m \cdot p + q_0$

Abb. 20: Quelldrücke von Metabentonit in Funktion des aufgebrachten Wasserdruckes

5.4 Einfluss der Ionenart des Wassers

5.4.1 MX-80

Um den Einfluss der Wasserzusammensetzung auf den Quelldruck zu erkennen, ist bei 2 Versuchen mit MX-80 ein stark Na-haltiges Wasser, das sog. "Säckinger-Wasser" anstelle des sonst üblicherweise verwendeten entmineralisierten Wassers eingesetzt worden.

Das Wasser wurde von einer Seite unter höherem Druck zugegeben als von der anderen Seite, um zusätzlich über die Durchlässigkeit des Bentonites Auskunft zu erhalten (vgl. Punkt 5.8).

Die Versuchsdauer betrug total 9 Monate, wobei ca. 3 Monate bei Raumtemperatur und ca. 4 Monate bei 90°C. Infolge apparativer Schwierigkeiten ist der Versuch bei 150°C nach weiteren 2 Monaten abgebrochen worden.

Anhand des Parallelversuches mit entmineralisiertem Wasser konnte kein signifikanter Unterschied beim MX-80 festgestellt werden, was auch aus dem Vergleich mit den Ergebnissen von Serie 1/2 und Einzelversuchen aus der nächsten Darstellung (Abb. 28) hervorgeht.

5.4.2 Illit

Dasselbe Ergebnis kann für Illit aus Vorversuchsdaten festgehalten werden.

5.4.3 Umgewandelter Montigel

Zwei umgewandelte Montigel-Proben, bei denen die Ca-Gegenionen durch Na ausgetauscht wurden, werden seit Januar 84 mit Säckinger-Wasser auf Quellung untersucht. Dies aus der Ueberlegung heraus, dass im Extremfall durch das Na-haltige Säckinger-Wasser die Ionengarnitur ausgetauscht würde. Dieser Austauschvorgang ist aus Zeitgründen im Tonmineralogischen Labor beschleunigt durchgeführt worden.

Die bisherigen Ergebnisse, die in Zukunft noch ergänzt werden und als provisorisch zu betrachten sind, zeigen, dass der gemessene Quelldruck dieser umgewandelten Montigel-Proben in demselben Bereich liegt wie derjenige des nicht umgewandelten, mit der normalen Ionengarnitur bestückten Montigels.

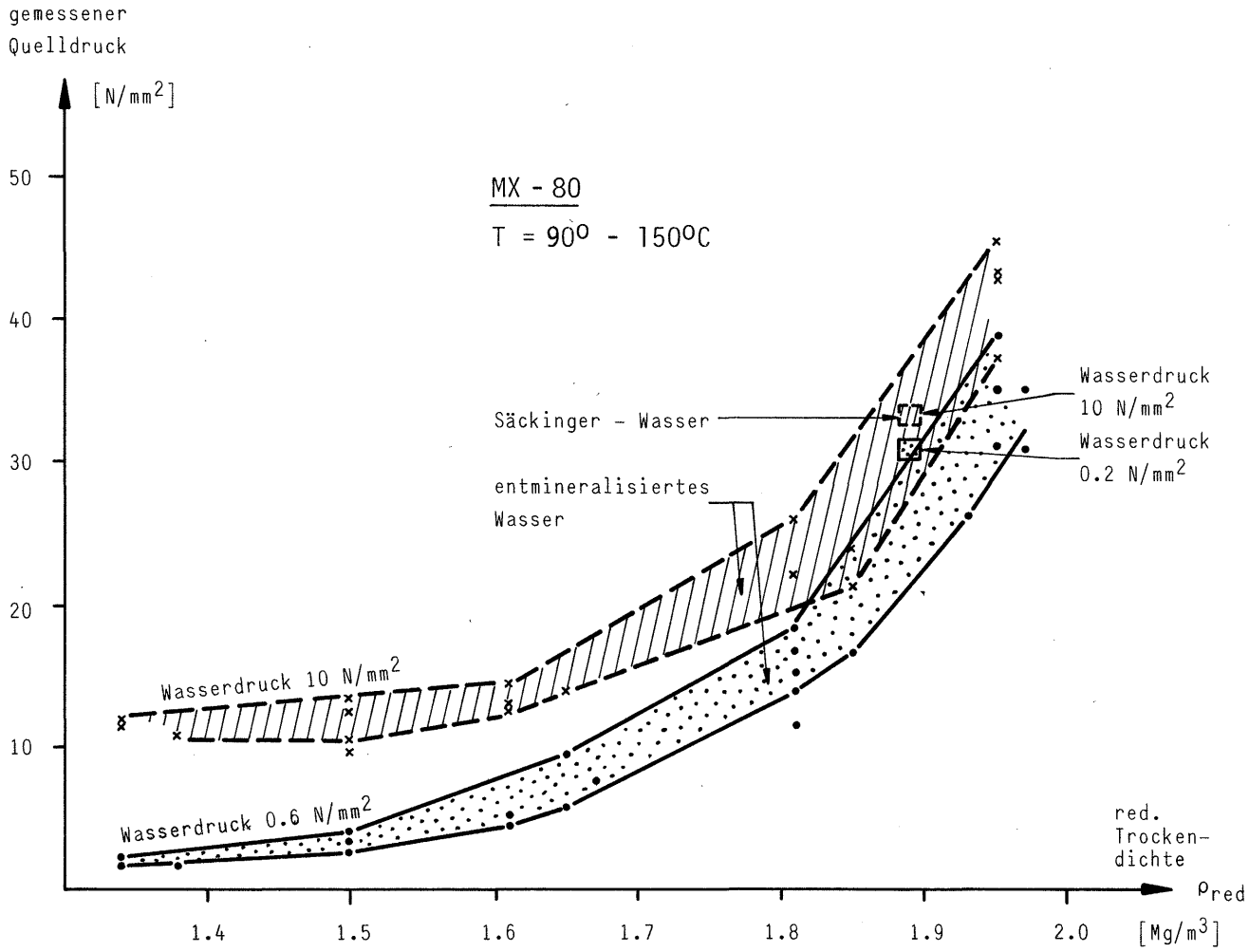


Abb. 21: Quelldruckvergleich beim Einsatz von entmineralisiertem und sog. "Säckinger-Wasser"

5.5 Zeitverlauf des Quelldruckes

Zielsetzung dieser Versuche war, während einer begrenzten Zeit (einige Jahre) allfällige Aenderungen des Quelldruckes zu erfassen. Die Aussagefähigkeit solcher Versuche darf allerdings nicht überbewertet werden: die Langzeitstabilität des Quelldruckes über Jahrtausende kann anhand von Quellversuchen allein, auch über mehrere Jahre, nicht hinreichend nachgewiesen werden. Dennoch lassen sich allfällige Trends feststellen sowie möglicherweise Hinweise auf die entsprechenden Mechanismen ableiten.

Die Versuche mussten wegen apparativer Schwierigkeiten nach höchstens 9 Monaten unterbrochen werden. Die Ergebnisse müssen somit als provisorisch betrachtet werden; weitere Untersuchungen werden nach Aufbesserung der Messeinrichtung geplant.

Im Laufe der durchgeführten Vorversuche konnten folgende Feststellungen gemacht werden:

Bei zwei von vier untersuchten Proben wurde über eine Periode von 9 Monaten eine Abnahme des gemessenen Quelldruckes gemessen:

- um rund 20 % bei einer Probe mit ρ_{red} = 1.98 Mg/m^3 (von 57 N/mm^2 auf 50 N/mm^2, Wasserdruck 0,6 N/mm^2), wobei nach rund 4 Monaten die Temperatur von 20°C auf 90°C heraufgesetzt wurde,

- um rund 20 % bei einer anderen Probe mit ρ_{red} = 1.65 Mg/m^3 (von 17 auf 14 N/mm^2, Wasserdruck 10 N/mm^2) über 9 Monate bei einer Temperatur von 150°C.

Bei den übrigen zwei Proben (ρ_{red} = 1.98 Mg/m^3, 20°C, 120 Tage, Wasserdruck 0.6 N/mm^2 und ρ_{red} = 1.69 Mg/m^3, 150°C, 280 Tage, Wasserdruck 10 N/mm^2) wurde keine signifikante Aenderung des Quelldruckes beobachtet (s. Abb. 22).

Die Vermutung liegt nahe, dass die beobachtete Abnahme an der Hälfte der untersuchten Proben auf Kriechen der Kraftmesseinrichtung zurückzuführen ist. Belastbare Aussagen können jedoch erst nach Wiederholung der Versuche mit verbesserter Druckerfassung gemacht werden.

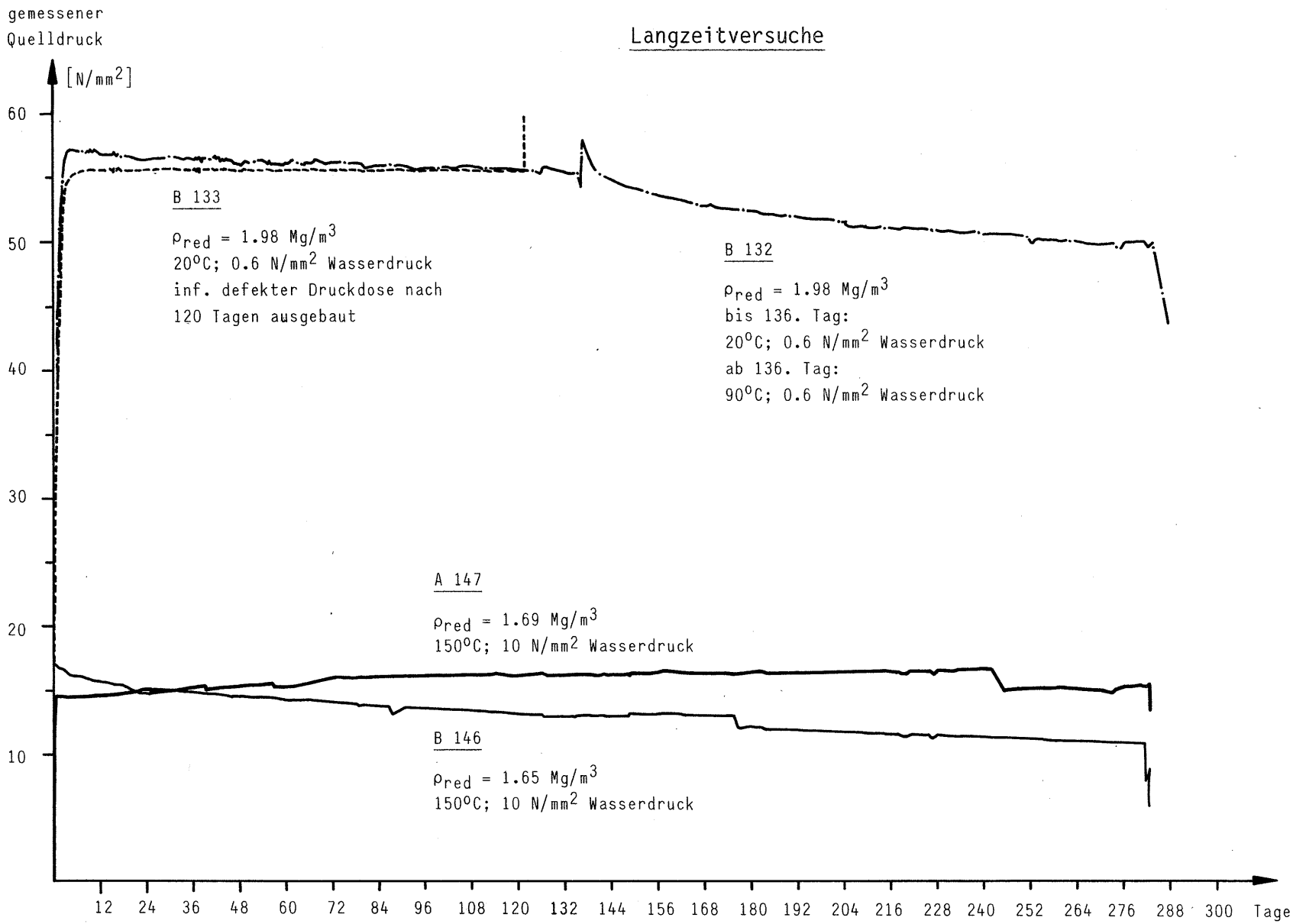


Abb. 22: Quellverhalten von MX - 80 in Funktion der Zeit

5.6 Einfluss der Verdichtungsart

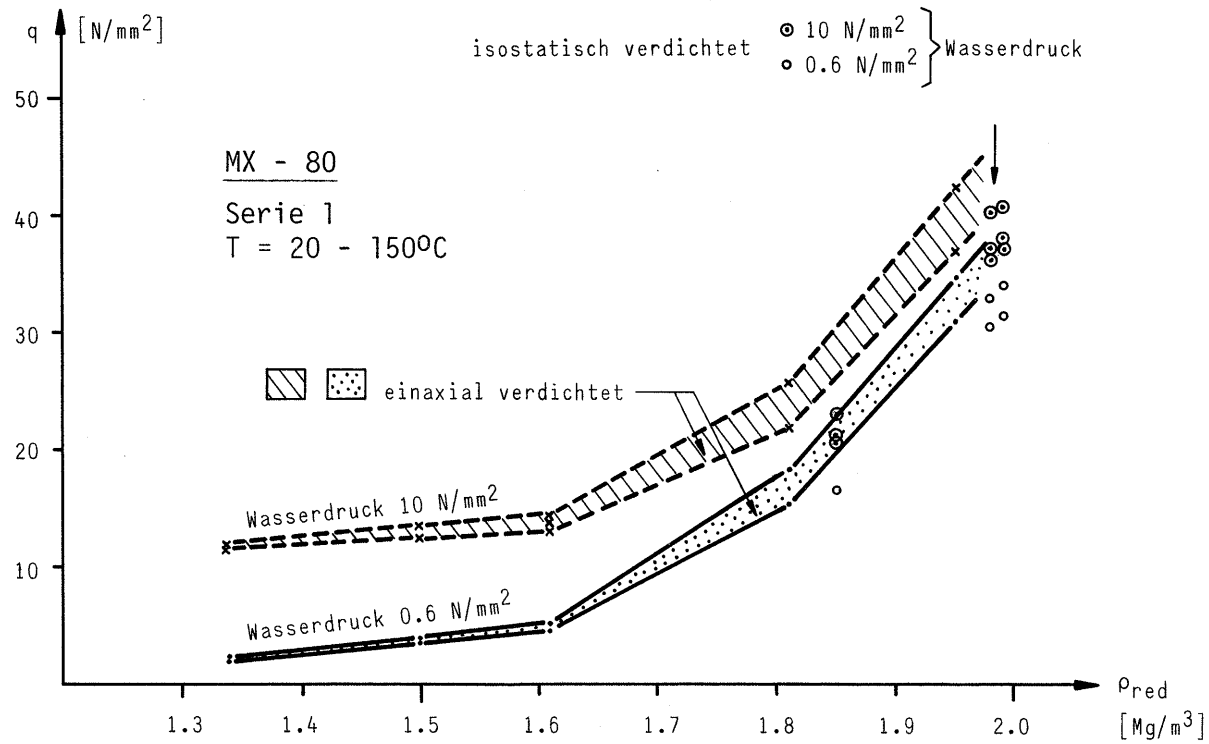
Der Grossteil der Proben ist in der vom IGB konstruierten Verdichtungsmulde (s. NTB 82-05) einaxial gepresst worden.

Um den Einfluss dieser Verdichtungsart zu erkennen, haben wir von der Firma METOXIT AG, Thayngen, allseitig verdichtete MX-80 und Montigel-Proben herstellen lassen. Die Proben wurden bei einem allseitigen Druck von 150 N/mm^2 zu folgenden Trockenraumgewichten ρ_d verdichtet: 1.98 Mg/m^3 für MX-80 und 1.89 Mg/m^3 für Montigel. Die verdichteten Proben wurden als ca. 0.5 m lange Rollen mit ca. 60 mm Durchmesser geliefert. Um also einzelne Proben von 25 mm Höhe und 56.4 mm Durchmesser zu erhalten, musste das gepresste Material in der Werkstatt des IGB mechanisch behandelt werden. Dies im Gegensatz zu allen anderen Versuchen, wo das lose Material direkt in den Stützring hinein verdichtet wurde.

Diese Proben werden einem Ablauf analog Serie unterworfen.

Die bisherigen Resultate sind in Abb. 23 dargestellt.

Vorläufig lässt sich der Schluss ziehen, dass es innerhalb der Genauigkeit der Versuche keine bedeutende Unterschiede im Quelldruck zwischen einaxial und isostatisch verdichteten Proben gibt. Bei den untersuchten Raumgewichten liegen die Quelldrücke der isostatisch verdichteten Proben 5-10 % unter den Werten der einaxial verdichteten Probekörpern.



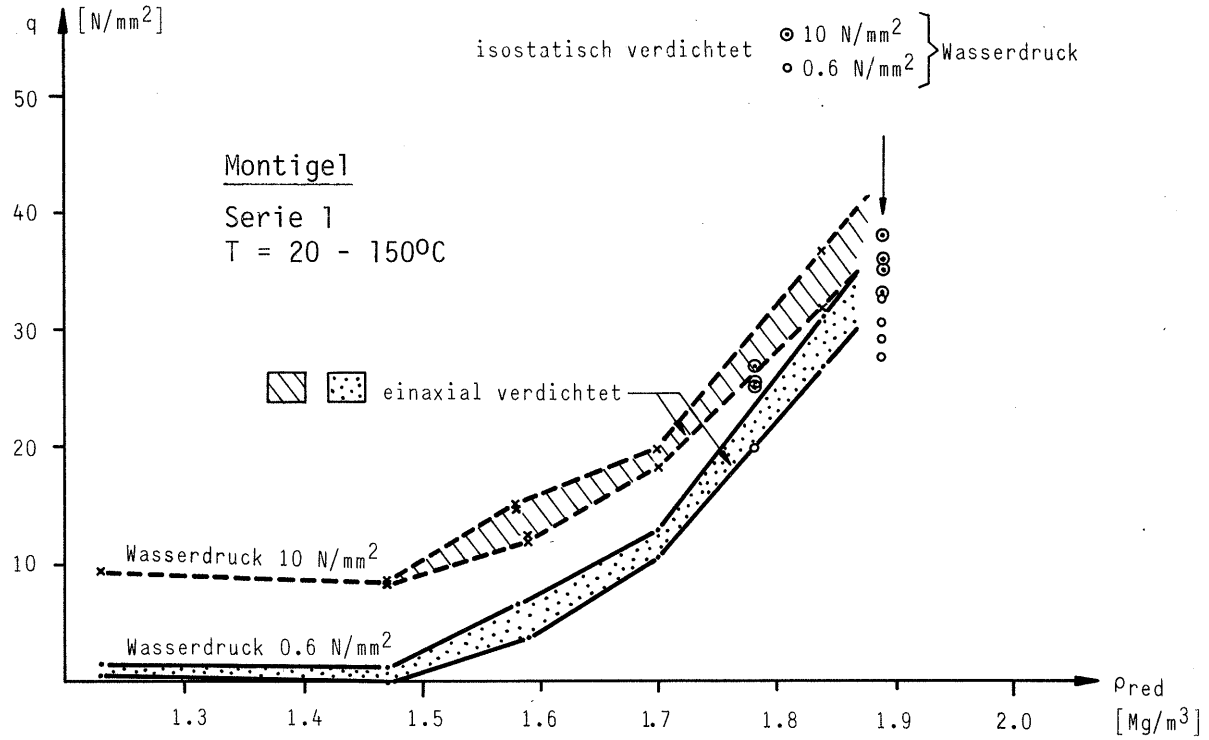


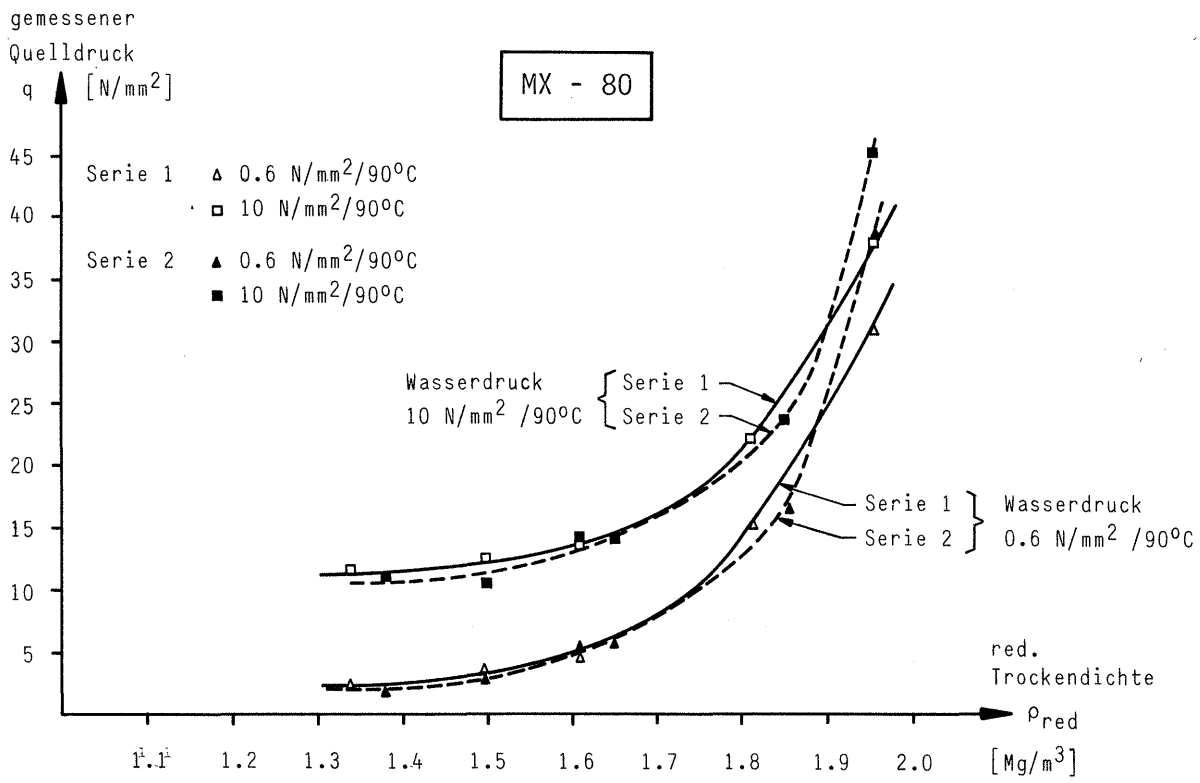
Abb. 23: Vergleich des Quelldruckes von einaxial und isotrop verdichteten Proben

5.7 Einfluss des Versuchsablaufes

Vergleicht man gleichartige Zustände der Serien 1 und 2 miteinander, so lässt sich beim Montigel eine grössere Differenz zwischen den Werten im Bereich kleinerer Raumdichten feststellen (s. Abb. 24).

Ebenso beim Pkt. 5.2 "Einfluss der Temperatur" sind die Temperatureinflüsse verschieden je nach gewähltem Ablauf, wobei dies für sämtliche Materialien gilt.

Im Moment sind die Gründe dieser Phänomene noch nicht erklärbar.



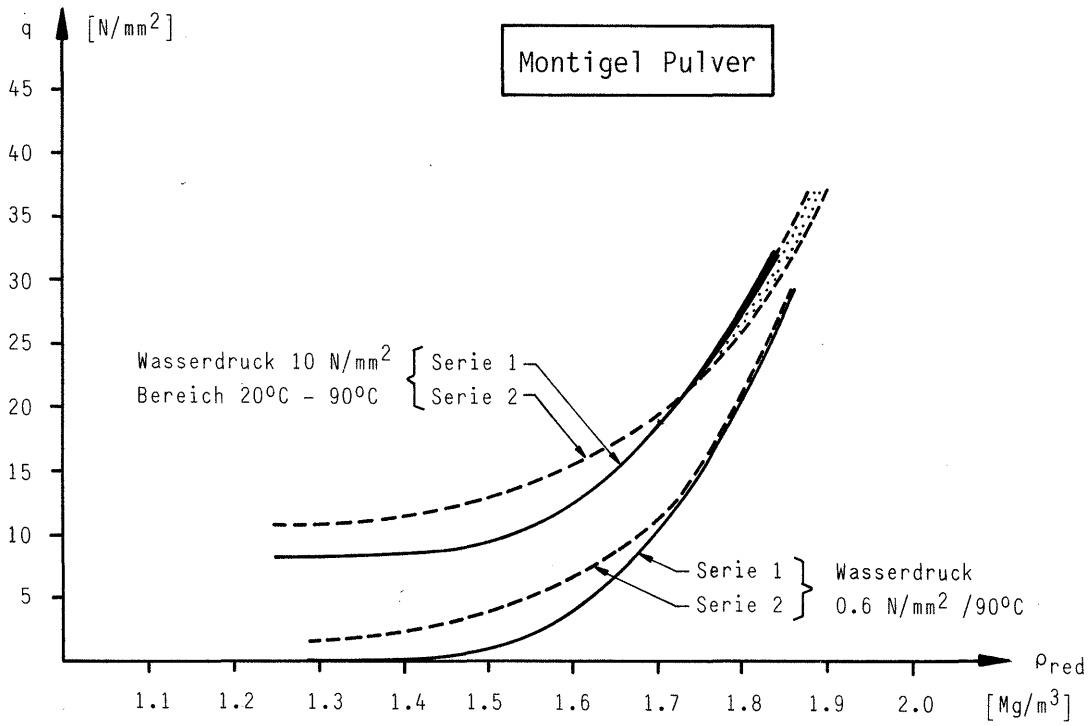


Abb. 24: Einfluss des Versuchsablaufes

5.8 Durchlässigkeitswerte

Bei den Versuchen an MX-80 zur Abklärung des Einflusses der Wassertypen schloss man das Säckingerwasser an der unteren Probenseite unter höherem Druck an, als auf der oberen. Auf der oberen Probenseite betrug der Wasserdruck jeweils 0.6 N/mm^2 und das Wasser wurde in einer Glaspipette gefasst, um das Volumen in bestimmten Zeitabständen abzulesen.

Somit konnten die Messwerte wie bei einem Versuch mit konstanter Druckhöhe nach Darcy ausgewertet werden,

$$Q = k \cdot i \cdot F$$

mit i = hydraulisches Gefälle = H/h

H = Druckhöhendifferenz

h = Probenhöhe

Q = Wassermenge pro Zeit = $\Delta V/\Delta t$

ΔV = gemessene Volumenänderung

Δt = entsprechende Zeitänderung

F = Querschnittsfläche der Probe

Damit wird die Durchlässigkeit k zu:

$$k = \frac{\Delta V \cdot h}{\Delta t \cdot H \cdot F}$$

Die Versuche wurden durchgeführt bei Druckunterschieden von maximal 9.4 N/mm^2.

In Tab. 25 sind zusätzlich die k-Werte an MX-80 aus Vorversuchen angegeben, wie auch diejenigen aus ebensolchen Versuchen an Illit.

Material	Trockendichte Mg/m^3	Wasserart	Temperatur ^oC	mittlere Durchlässigkeitswerte k m/s
MX-80*	1.88 1.75	entmineral. Wasser	20	$6 \cdot 10^{-14}$
MX-80 MX-80	1.89 1.89	entm. W. Säckinger W.	90 & 150	$4 \cdot 10^{-14}$
Illit*	1.76 1.78	Säckinger W.	20	10^{-12}

* = Vorversuche

Tab. 25: Tabelle der k-Werte von MX-80 und Illit

ETH-Zürich
Institut für Grundbau und Bodenmechanik

H.J. L

Prof. H.J. Lang, Vorsteher

Bericht 3914/10
Bu/Sp/is
Zürich, den 24. Februar 1984

LITERATURANGABEN

/1/ Müller-Vonmoos, M. und Kahr, G. (1982): Bereitstellung von Bentoniten für Laboruntersuchungen. NTB 82-04.

/2/ Bucher, F., Jeger, P., Kahr, G. und Lehner, J. (1982): Herstellung und Homogenität hochverdichteter Bentonitproben. NTB 82-05.

/3/ Kahr, G. und Müller-Vonmoos, M. (1982): Wärmeleitfähigkeit von Bentonit MX-80 und von Montigel nach der Heizdrahtmethode. NTB 82-06.

/4/ Müller-Vonmoos, M. und Kahr, G. (1983): Mineralogische Untersuchungen von Wyoming Bentonit MX-80 und Montigel. NTB 83-12.

/5/ Pusch, R. (1980): Swelling pressure of highly compacted bentonite. KBS 80-13.

/6/ van Olphen, H. (1977): An introduction to clay colloid chemistry, 2nd ed.
Wiley and Sons, New York.

/7/ van Olphen, H. (1975): Water in soils, in soil components, Vol. 2, edited by Gieseking.
Springer, Berlin.

/8/ Müller-Vonmoos, M. und Jenny, F. (1970): Einfluss der Beschallung auf Körnung, rheologische Eigenschaften, Sedimentationsverhalten und Injizierbarkeit wässriger Opalit-Suspensionen.
Schweiz. Mineralog. Petrogr. Mitt. Band 50, Heft 2.

/9/ Bucher, F., Kahr, G., Müller-Vonmoos, M. und Spiegel, U. (1983): Bereitstellung von Illit und Metabentonit.
IGB 3914/8.

/10/ Pusch, R. (1983): Use of clays as buffers in radioactive repositories. KBS 83-46.

Beilage 1: Tabellen der Versuchskenndaten

Die folgenden Tabellen geben die wichtigsten Werte der einzelnen Versuche wieder.
Neben den Zustandsgrössen und dem Versuchsablauf sind auch die gemessenen Werte des Quelldruckniveaus bei verschiedenen Bedingungen von Temperatur T (^{o}C), Wasserdruck D (N/mm^2) und Wasserzugabe (ja/nein) eingetragen. Falls der Quelldruck keinen einigermassen konstanten Wert aufwies, ist dies durch:
Wnb = : Wert nicht bestimmbar angezeigt.
Total sind die Daten von 121 Versuchen aufgeführt.

Zeichenerklärung:

w_o = Wassergehalt beim Einbau. Zusammenhang zwischen der reduzierten Trockendichte ρ_{red} und dem Ausbauwassergehalt w_A , s. Beilage 2

ρ = Feuchtdichte

ρ_d = Trockendichte

ΔV = zugelassene Volumendeformation (bezogen auf das Anfangsvolumen)

ρ_{red} = reduzierte Trockendichte

A = Na-Bentonit MX-80

B = Ca-Bentonit Montigel Pulver

C = Montigel Granulat

D = Illit (Massif Central)

E = Metabentonit (Südwest-Schweden)

Wnb = Wert nicht bestimmbar

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2					
							T °C	150	150	90	150	90	20
							W ja/nein	n	j	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D N/mm^2	–	0.6	0.6	10	10	10
Versuchsablauf								Serie 1 16 Versuche einaxial & allseitig verdichtete MX-80 & Montigel					
A 113	12.05.82	8.5	1.83	1.68	5	1.61	*	1.1	5.5	4.65	14.5	13.05	13.6
A 114	12.05.82	8.5	2.22	2.04	5	1.95	*	0.5	35	31.3	42.7	38.2	37.3
A 115	12.05.82	8.5	2.22	2.04	12.9	1.81	*	0	18.5	15.4	26.0	22.3	22.0
A 116	12.05.82	8.5	2.21	2.03	26.2	1.61		0	5.5	4.7	14.2	13.2	14.2
A 121	15.06.82	9.0	1.83	1.68	12.4	1.50		1.0	4.3	3.6	13.6	12.6	12.8
A 122	15.06.82	9.0	1.82	1.67	25	1.34		0.8	2.1	2.5	12.2	11.6	11.6
B 97	22.03.82	8.7	1.82	1.67	13.5	1.47		–	1.3	0	8.8	8.4	8.8
B 98	22.03.82	8.7	2.10	1.93	13.5	1.70		0	13	10.6	19.8	18.4	18.2
B 99	22.03.82	8.7	1.82	1.67	5	1.59		0	5.1	3.7	12.5	12.0	12.2
B 100	22.03.82	8.7	2.10	1.93	5	1.84		0	31	26.8	36.7	33.6	31.9
B 117	12.05.82	8.0	2.14	1.98	25.5	1.58	*	0.9	6.2	6.5	14.8	15.2	14.6
B 127	15.06.82	8.5	1.74	1.60	30	1.23		0.2	1.4	0.6	9.6	8.9	9.0
A 215	16.12.83	7.2	2.14	1.99	0.3	1.99	**	0	34.3	31.6	41.1	39.0	38.3
A 216	16.12.83	7.2	2.13	1.99	0.3	1.98	**	0	33.2	30.8	40.4	37.9	37.2
B 217	16.12.83	10.7	2.10	1.90	0.2	1.89	**	0.5	32.9	29.0	38.0	35.6	33.3
B 218	16.12.83	10.7	2.10	1.90	0.4	1.89	**	0	30.4	27.4	36.0	32.9	32.6

Versuchsablauf

	1.W.	2.W.	3.W.	4.W.	5.W.	6.W.
T	150	150	150	90	90	20
W	n	j	j	j	j	j
D	–	0.6	10	0.6	10	10

* im Versuchsablauf Zustand 150°C / 0.6 N/mm^2 mit 150°C / 10 N/mm^2 vertauscht

** allseitig verdichtete Proben

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	red. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2			
							T	°C	90	90	90	20
							W	ja/nein	n	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	–	0.6	10	10
Versuchsablauf									Serie 2 12 Versuche MX - 80 & Montigel			
A 110	12.05.82	8.5	2.22	2.04	5.1	1.95		*	3.7 / 2.3	38.9	45.5	43.1
A 125	15.06.82	9.0	2.29	2.10	13.4	1.85			2.8 / 0.5	16.7	23.8	21.2
A 126	15.06.82	9.0	2.25	2.06	25	1.85			2.2 / 0.1	6.0	14.2	13.9
A 109	12.05.82	8.5	1.83	1.68	4.8	1.61		*	1.2 / 0	5.5	14.3	14.4
A 123	15.06.82	9.0	1.84	1.68	12.1	1.50			1.5 / 0.7	2.9	10.6	9.8
A 124	15.06.82	9.0	1.86	1.71	24	1.38			0.7 / 0	1.9	11.2	11.1
B 112	12.05.82	8.0	2.15	1.99	4.9	1.90		*	4.5 / 1.6	37.3	43.8	39.5
B 130	30.06.82	9.0	2.14	1.96	13	1.74			2.3 / 0	14.8	22.2	21.6
B 131	30.06.82	9.0	2.14	1.96	41	1.39			0.5 / 0	2.1	11.0	12.0
B 111	12.05.82	8.0	1.80	1.66	4.9	1.59		*	1.8 / 0.6	7.1	15.5	15.2
B 128	30.06.82	9.0	1.77	1.62	17.3	1.38			1.1 / 0	2.2	10.9	11.3
B 129	30.06.82	9.0	1.78	1.63	32	1.24			1.0 / 0.2	1.5	10.8	11.0

	1.W.	2.W.	3.W.	4.W.
T	90	90	90	20
W	n	j	j	j
D	–	0.6	10	10

* im Versuchsablauf Zustand 90°C / 0.6 N/mm^2 mit 90°C / 10 N/mm^2 vertauscht

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}	gemessener Quelldruck in N/mm^2															
							T	°C	50	50	20	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
							W	ja/nein	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0.6	10	10	0.6	0.7	1.4	2.0	4.1	6.0	10.4	0.6	4.5	10	2.3	3.5
									Serie 2* 8 Versuche Metabentonit														
E 192	16.08.83	12.6	2.22	1.97	–	1.97			14.9	23.2	23.6	15.4	–	–	–	–	–	–	–	17.5	21.5	16.6	17.3
E 193	16.08.83	12.6	2.22	1.97	5.1	1.87			7.8	16.3	16.8	7.4	–	–	–	–	–	–	–	10.0	14.5	8.7	9.5
E 194	16.08.83	12.6	2.22	1.97	14.1	1.73			2.8	12.1	12.5	2.1	–	–	–	–	–	–	–	5.4	10.4	3.6	4.5
E 195	16.08.83	12.6	2.22	1.97	25.3	1.58			0.9	10.9	11.4	0.5	–	–	–	–	–	–	–	4.1	9.4	2.0	3.1
E 199	07.10.83	13.9	1.98	1.73	–	1.73			2.6	10.8	10.9	–	2.2	2.8	3.1	4.9	6.7	10.7	2.2	–	–	–	–
E 200	07.10.83	13.9	1.98	1.73	5.9	1.64			1.5	9.7	9.8	–	1.0	1.6	1.9	3.7	5.5	9.6	1.0	–	–	–	–
E 201	07.10.83	13.9	1.97	1.73	15.1	1.50			0.8	9.6	9.7	–	0.5	1.1	1.5	3.5	5.4	9.5	0.3	–	–	–	–
E 202**	07.10.83	13.9	1.97	1.73	32.3	1.31			Wnb	7.8	8.0	–	Wnb	0.1	0.4	2.1	3.9	8.1	–	–	–	–	–

Versuchsablauf

	1. W.	1. W.	1. W.	1. W.	je ca. 4 Tage
T	50	50	20	50	50
W	j	j	j	j	j
D	0.6	10	10	0.6	versch. Drücke

* angehängt noch die Quelldrücke bei unterschiedlichen Wasserdrücken

** Versuch wegen fehlerhaften Druckmessung in Auswertung nicht berücksichtigt

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2			
							T	°C	50	50	20	50
							W	ja/nein	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0.6	10	10	0.6
Versuchsablauf									Serie 2 8 Versuche Illit			
D 171	30.03.83	15.3	2.20	1.91	0	1.91			20.0	26.5	24.1	20.9
D 172	30.03.83	15.3	2.18	1.88	4.9	1.79			14.1	21.2	19.8	14.4
D 173	31.03.83	15.0	2.17	1.88	13.7	1.65			7.4	15.5	14.9	7.2
D 174	31.03.83	15.0	2.18	1.89	25.2	1.51			2.5	11.2	11.0	2.1
D 179	21.07.83	12.0	1.89	1.69	0	1.69			12.0	19.3	18.3	12.8
D 180	21.07.83	12.0	1.92	1.71	5.1	1.62			8.6	16.5	16.2	9.0
D 181	21.07.83	12.0	1.91	1.71	13.8	1.50			3.6	11.8	12.5	3.6
D 182	21.07.83	12.0	1.91	1.71	25.0	1.37			0.7	9.0	10.1	0.4

Versuchsablauf

	1 W.	1 W.	1 W.	min. 1 W.
T	50	50	20	50
W	j	j	j	j
D	0.6	10	10	0.6

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}	gemessener Quelldruck in N/mm^2			
							T	C	20	20
							W	ja/nein	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	–	0.2
Versuchsablauf									Versuche mit grosser Volumendeformation 10 Versuche	
A 103	01.04.82	8.8	2.30	2.11	121	0.96			1.1	1.3
A 104	01.04.82	8.8	2.17	1.99	108	0.96			1.1	1.3
B 105	01.04.82	8.4	2.04	1.88	97	0.96			0.3	0.4
B 106	01.04.82	8.4	2.24	2.07	116	0.96			1.8	1.2
A 118	12.05.82	8.5	2.23	2.05	86	1.10			0.7	–
A 119	12.05.82	8.5	2.21	2.04	53	1.33			1.4	–
A 140	02.08.82	8.7	2.20	2.00	36	1.49			2.2	–
B 141	02.08.82	9.4	2.17	1.98	35	1.47			4.5	–
B 139	02.08.82	9.4	2.13	1.95	76	1.11			0.7	–
B 138	02.08.82	9.4	2.12	1.94	46	1.33			1.9	–

	mehrere Wochen	
T	20	20
W	j	j
D	–	0.2

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2			
							T	°C	20	20	150	150
							W	ja/nein	j	j	j	n
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	–	0.6	0.6	–
Versuchsablauf								Einfluss der Vorheiztemperatur				
								ohne Vorheizen 6 Versuche				
A 82	27.01.82	7.2	2.23	2.08	24.8	1.67		7.8	8.4	–	–
A 84	27.01.82	7.2	2.22	2.07	14.5	1.81		17.3	11.7	15.3	–
A 86	27.01.82	7.2	2.21	2.06	6.4	1.93		37.4	26.1	34 / 31	–
B 83	27.01.82	8.3	2.15	1.99	24.2	1.66		8.2	7.4	7.5	–
B 87	27.01.82	8.3	2.14	1.98	8.3	1.82		30.4	16.5	31.8 / 21	–
B 90	27.01.82	8.3	2.13	1.97	14.3	1.72		12 / 16.8	13.5	19.5 / 13	–
Versuchsablauf								mit Vorheizen 6 Versuche			
A 78	27.01.82	7.2	2.22	2.07	25.2	1.65		–	15.1	9.9	0 / 3.4
A 80	27.01.82	7.2	2.22	2.07	14.4	1.81		–	14	16.8	0 /0.7
A 88	27.01.82	7.2	2.22	2.07	5.1	1.97		–	31	35.1	0
B 79	27.01.82	8.3	2.15	1.99	25.8	1.58		–	7.1	8.2	2.5
B 81	27.01.82	8.3	2.14	1.98	14.6	1.72		–	10.6	15 / 12.5	0.3
B 89	27.01.82	8.3	2.13	1.97	5	1.78		–	23.6	33.7 / 28	0

Versuchsablauf

	1.W.	2.W.	3.W.	4.W.	5.W.	6.W.	$6^3/4W$
T	20	20	150	150	150	150	20
W	j	j	j	j	j	j	j
D	–	–	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Versuchsablauf

	1.W.	2.W.	3.W.	4.W.	5.W.	6.W.	$6^3/4W$
T	150	150	150	150	150	150	20
W	n	n	j	j	j	j	j
D	–	–	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2							
							T	°C	20	90	150	20	20	90	90	
							W	ja/nein	j	j	j	j	j	j	j	
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0.6	0.6	10	0.2	10	0.2	9.4	
Versuchsablauf									Ioneneinfluss auf Quellung							
									3 Versuche *							
									einseitiger Druckanschluss							
A 142	12.08.82	8.7	2.05	1.89	0	1.89		SW	–	–	–	30.2	–	30.5	–	vor-zeitig abge-brochen
A 143	12.08.82	8.7	2.05	1.89	0	1.89		SW	–	–	–	–	33.5	–	33.0	
A 144	13.08.82	8.8	2.05	1.89	0	1.89			–	–	–	30	–	–	35.3	
Versuchsablauf									Langzeitquellversuche							
									4 Versuche **							
B 132	06.07.82	8.7	2.16	1.98	0	1.98			55.5	–	–	–	–	–	–	vor-zeitig abge-brochen
B 133	05.07.82	8.9	2.16	1.98	0	1.98			57.2/55.4	55.6/50.5	–	–	–	–	–	
B 146	30.08.82	11.3	1.84	1.65	0	1.65			–	–	16.1/10.8	–	–	–	–	
A 147	30.08.82	8.9	1.84	1.69	0	1.69			–	–	15.8	–	–	–	–	

Versuchsablauf

	3 Mt.	4 Mt.	2 Mt.
T	20	90	150
W	j	j	j
D	0.2 od. 10	0.2 od. 9.4	0.2 od. 9.4

Versuchsablauf

	9 Mt.
T	20 od. 150
W	j
D	0.6 od. 10

SW ≡ Säckinger Wasser

* weitere 2 Versuche mit umgewandeltem Montigel (Ca → Na - Form) sind seit Jan. 84 eingebaut

** weitere 2 Versuche mit der umgebauten App. sind seit Jan. 84 eingebaut

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}	gemessener Quelldruck in N/mm^2															
							T	°C	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
							W	ja/nein	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0	1.1	2.1	3.1	4.0	5.0	6.0	7.0	8.1	9.1	9.9	7.0	5.1	3.0	0
Versuchsablauf pro Zustand ca. 4 Tage T 20°C W j D 0 - 10 N/mm^2							Einfluss verschiedener Wasserdrücke * 4 Versuche MX - 80															
A 203	11.10.83	8.6	1.63	1.50	0	1.50			1.4	2.0	3.6	4.1	5.2	6.0	6.9	7.8	8.8	9.7	10.4	7.7	6.0	4.2	Wnb
A 204	11.10.83	8.6	1.69	1.56	0	1.56			2.5	3.5	4.4	5.3	6.1	6.9	7.8	8.7	9.7	10.7	11.4	8.8	7.0	5.2	2.6
A 205	11.10.83	8.6	1.79	1.65	0	1.65			3.9	4.6	6.6	7.5	8.4	9.2	10.1	11.0	11.9	12.8	13.5	Wnb	Wnb	Wnb	Wnb
A 206	11.10.83	8.6	1.84	1.69	0	1.69			4.8	5.8	7.7	8.9	9.7	10.6	11.5	12.4	13.4	14.3	15.0	12.6	10.8	9.1	6.7

* vgl. auch S.48 Serie 2, Metabentonit

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2								
							T	°C	20	150	20	150	20	150	20	150	20
							W	ja/nein	j	n	j	n	j	n	j	n	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Versuchsablauf								Einfluss der Zwischenaustrocknung 7 Versuche MX - 80, Montigel, Illit								
A 165	23.12.82	8.7	2.11	1.94	0	1.94		47.0	0	34.6	0	–	–	–	–	–
A 168	10.02.83	8.7	1.96	1.81	0	1.81	*	14.4	0.3	9.9	0.3	9.6	0.4	9.2	–	–
B 167	10.02.83	9.6	1.94	1.77	0	1.77	*	20.1	0.2	14.5	0.6	13.9	0.7	13.0	–	–
D 149	28.09.82	18.3	2.08	1.76	0	1.76		16.9	1.7	9.2	1.4	8.7	1.4	8.4	1.2	8.0
D 153	30.09.82	18.4	2.11	1.78	0	1.78		18.0	2.5	9.7	2.1	9.1	2.1	8.6	2.0	8.2
A 223	18.01.84	7.6	2.12	1.97	0.7	1.96	**	11.4	0	noch nicht abgeschlossen						
B 224	18.01.84	11.0	2.07	1.87	0.7	1.86	**	36.6	0	noch nicht abgeschlossen						

Versuchsablauf

	1 W.	4 Tage	1 W.	
T	20	150	20	Abfolge
W	j	n	j	mehrmals
D	–	–	–	wiederholt

* bei T = 20°C 0.6 N/mm^2 Wasserdruck aufgebracht

** triaxial verdichtete Proben

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	red. Tro.di. ρ_{red}			gemessener Quelldruck in N/mm^2			
							T	°C	90	150	90	20
							W	ja/nein	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0.6	10.2	10.2	10.2
									Ergänzungsversuche isostatisch verdichteter MX - 80 und Montigel			
B 254	06.09.84	9.24	1.95	1.78	-	-			20.01	26.91	25.50	25.17
A 255	06.09.84	8.30	2.00	1.85	-	-			16.80	22.91	21.08	20.63

	1 1/2 W.	1 W.	1 W.	1/2 W.
T	90	150	90	20
W	j	j	j	j
D	0.6	10.0	10.0	10.0

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}	gemessener Quelldruck in N/mm^2									
							T	°C	20	20	90	150	20	90	150	20	150
							W	ja/nein	j	j	j	j	j	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Versuchsablauf									Einfluss verschiedener Temperaturen 2 Versuche Montigel								
B 209	02.11.83	9.8	2.16	1.97	0	1.97	***		59.4	59.7	57	50	42	48.9	50	42	45
B 210	02.11.83	9.8	1.94	1.77	0	1.77	***		Wnb	Wnb	21	18	15	18.2	18	15	17
Versuchsablauf									Einfluss von chem. & mech. Behandlung 4 Versuche Metabentonit								
E 211	14.11.83	8.8	2.2	2.02	0	2.02	*		–	43	–	–	–	–	–	–	–
E 212	14.11.83	8.8	1.9	1.74	0	1.74	*		–	7.3	–	–	–	–	–	–	–
E 213	25.11.83	6.3	2.16	2.03	0	2.03	**		–	29	–	–	–	–	–	–	–
E 214	25.11.83	6.3	1.82	1.71	0	1.71	**		–	4.5	–	–	–	–	–	–	–

Versuchsablauf

	8 T.	4 T.	3 T.	5 T.	2 T.	4 T.	3 T.	4 T.	4 T.
T	20	20	90	150	20	90	150	20	150
W	j	j	j	j	j	j	j	j	j
D	–	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

Versuchsablauf

	9 T.
T	20
W	j
D	0.6

* beschallte Proben

** Ultraschall- und Sodabehandlung

*** z.T. approximative Werte

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2						
							T	°C	20	90/150	90	90	150	150	150
							W	ja/nein	j	j	j	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D	N/mm^2	0.0	0	0.4	0.6	0.3/0.4	1.0	1.6
Versuchsablauf									Vorversuche 8 Versuche						
A 1	16.07.81	8.4	2.16	1.99	0	1.99			23.2	-	-	-	-	-	-
A 2	16.07.81	8.4	1.80	1.66	0	1.66			Wnb	-	-	-	-	-	-
A 3	16.07.81	8.4	1.87	1.73	0	1.73			4.2	-	-	-	-	-	-
A 4	16.07.81	8.4	1.70	1.57	0	1.57			0.7	-	-	-	-	-	-
A 5	16.07.81	8.4	1.97	1.82	0	1.82			7.2	-	-	-	-	-	-
A 6	16.07.81	8.4	1.97	1.82	0	1.82			7.4	-	-	-	-	-	-
A 47	08.10.81	8.4	2.24	1.80	0	1.80		*	40.6	-	-	-	-	-	-
B 51	22.10.81	8.8	2.14	1.97	0	1.97			57.2	-	-	-	-	-	-
T: 20; W: j; D: 0		T: 90 bis 150; W: j; D: 0	T: 90 od. 150; W: j; D: 0.3 bis 1.6		Versuchsdauer einige Wochen				Vorversuche 6 Versuche Montigel Granulat						
C 39	17.09.81	11.17	2.17	1.95	0	1.95			34.4	Wnb	-	-	Wnb	-	-
C 40	17.09.81	11.17	2.07	1.86	0	1.86			24.6	18.6	-	-	-	-	-
C 41	17.09.81	11.17	1.84	1.66	0	1.66			9.2	-	-	-	-	-	-
C 54	22.10.81	11.5	2.11	1.89	0	1.89			45.2	Wnb	43.8	-	Wnb	-	34.7
C 55	22.10.81	11.5	1.98	1.77	0	1.77			25.7	Wnb	23.5	-	23.3	-	-
C 56	22.10.81	11.5	1.79	1.60	0	1.60			10.4	8.7	9.4	-	7.2	-	-

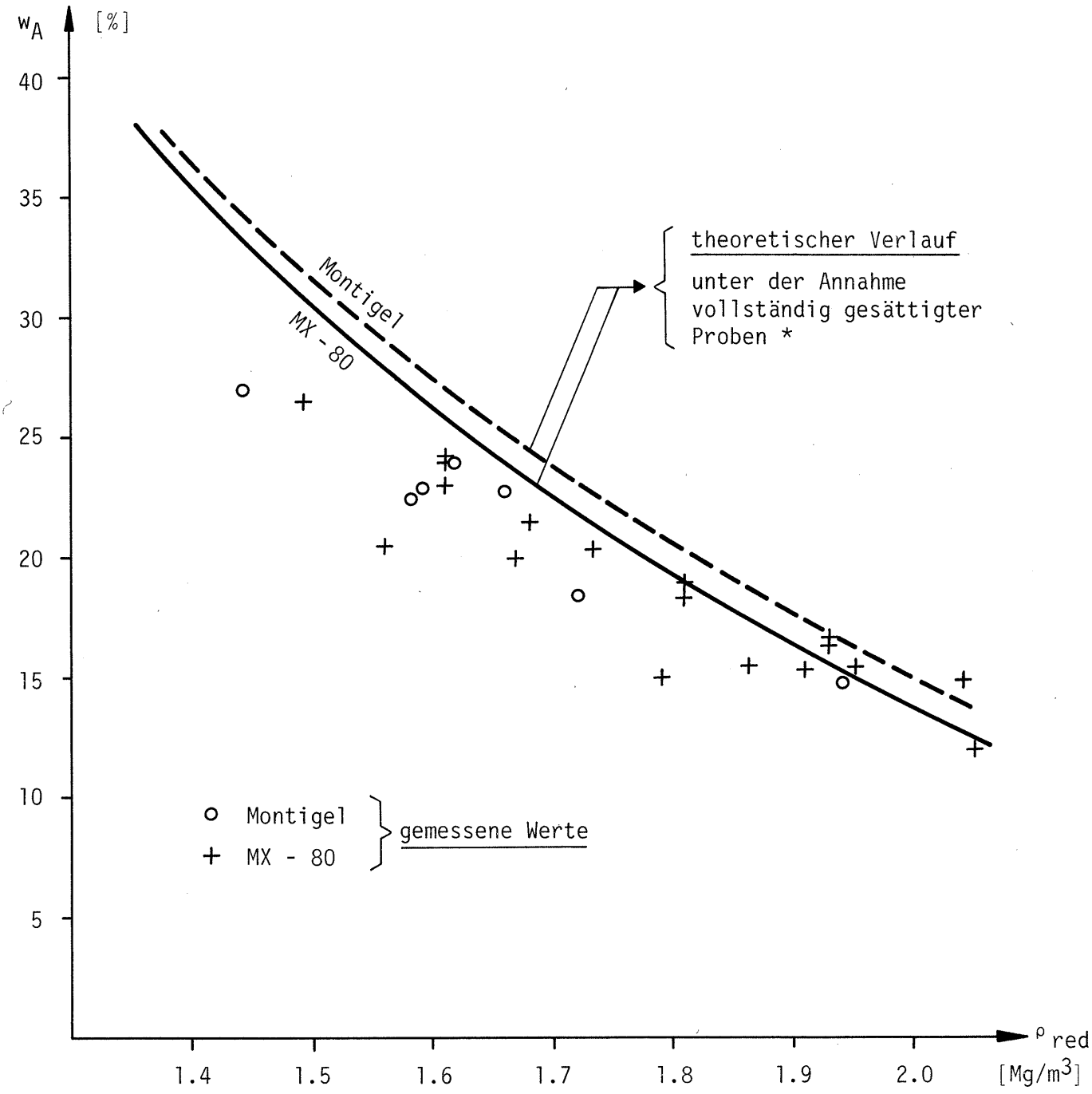
* Probe mit 30 % Quarzsand

Material Nummer	Einbau Datum	Wasser-gehalt w_o	Feucht-dichte ρ	Trocken-dichte ρ_d	Volum. defor. ΔV	reduz. Tro.di. ρ_{red}		gemessener Quelldruck in N/mm^2						
							T °C	20	20	90	100	100	150	150
							W ja/nein	j	j	j	j	j	j	j
		%	Mg/m^3	Mg/m^3	%	Mg/m^3	D N/mm^2	0.0	0.6	0.4	0.0	0.7	0.4	0.6
								Vorversuche 15 Versuche						
A 23	29.07.81	0	2.00	2.00	0	2.00		37.1	35.5	–	39.2	39.4	–	–
A 36	17.09.81	8.6	2.21	2.04	0	2.04		37.0	–	–	Wnb	–	25 / 18	–
A 37	17.09.81	8.6	2.02	1.86	0	1.86		23.3	–	–	Wnb	–	18 / 14	–
A 38	17.09.81	8.6	1.88	1.73	0	1.73		5.0	–	–	Wnb	–	0.8	–
B 42	17.09.81	9.6	2.13	1.94	0	1.94		50.2	–	–	Wnb	–	Wnb	–
B 43	17.09.81	9.6	2.05	1.87	0	1.87		27.7	–	–	24.2	–	–	–
B 44	17.09.81	9.6	1.78	1.62	0	1.62		7.1	–	–	Wnb	–	2.9	–
A 45	07.10.81	8.4	2.21	2.04	5.6	1.93		Wnb	–	–	Wnb	–	–	–
A 46	07.10.81	8.4	2.21	2.04	5.6	1.93		31.4	21.2	Wnb	Wnb	–	~ 28.4	27.0
A 48	22.10.81	8.01	2.209	2.05	0	2.05		Wnb	38.5	43.6	–	–	42 / 39	38.5
A 49	22.10.81	8.01	1.98	1.83	0	1.83		24.6	25.1	–	–	–	–	–
A 50	22.10.81	8.01	1.82	1.68	0	1.68		7.1	5.7	Wnb	–	–	6.1	Wnb
B 52	22.10.81	8.8	1.98	1.82	0	1.82		30.4	19.2	29.1	–	–	32 / 27	27.7
B 53	22.10.81	8.8	1.72	1.58	0	1.58		9.0	6.9	7.3	–	–	6.8	6.4
A 57	18.11.81	6.9	2.04	1.91	0	1.91		24.1	–	–	–	–	–	–

T	20	90 od. 150	150	20
W	j	j	j	j
D	–	–	0 bis 1.0	0 bis 0.6

Versuchs-dauer zwischen 3 bis 8 Wochen

Beilage 2: Zusammenhang zwischen der reduzierten Trockendichte ρ_{red} und dem Ausbauwassergehalt w_A



* Kurvenverlauf aus $S_r = 1 = \dfrac{w_A}{\frac{\rho_w}{\rho_{red}} - \frac{\rho_w}{\rho_s}}$

ρ_s = 2.755 Mg/m³ MX - 80

= 2.847 Mg/m³ Montigel