

Nagra

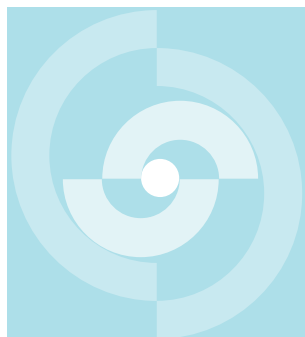
Nationale
Genossenschaft
für die Lagerung
radioaktiver Abfälle

Cédra

Société coopérative
nationale
pour l'entreposage
de déchets radioactifs

Cisra

Società cooperativa
nazionale
per l'immagazzinamento
di scorie radioattive



TECHNISCHER BERICHT 85-24

SCHRUMPFVERSUCHE AN BENTONIT- PROBEN

F. Bucher
P. Jedelhauser
P. Jeger

Januar 1985

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich

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 85-24

SCHRUMPFVERSUCHE AN BENTONIT- PROBEN

F. Bucher
P. Jedelhauser
P. Jeger

Januar 1985

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich

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.

ZUSAMMENFASSUNG

Bentonite, wie andere bindige Böden, weisen ein sogenanntes Nachschrumpfen auf, d.h. bei der Austrocknung einer anfänglich feuchten Probe nimmt das Probenvolumen auch unter der Schrumpfgrenze ab, was zu Rissen und deshalb zu einer Abnahme der Wärmeableitung führen kann. Das Nachschrumpfen wurde an Proben aus den von der Nagra als Verfüllmaterialien in Betracht gezogenen Bentonite MX-80 und Montigel Pulver untersucht. Dabei wurde das Ausmass der Nachschrumpfung sowohl unter endlagernahen Bedingungen an einaxial und isostatisch verdichteten Proben wie auch von der Fliessgrenze her bestimmt. Die Schrumpfgrenze liegt bei einem Wassergehalt von 14 %, resp. 18 %, das probenvolumenbezogene Nachschrumpfen s' ab Fliessgrenze beträgt für MX-80 rund 9 % für Montigel-Pulver rund 11 %. Das Nachschrumpfen s' der verdichteten Proben mit Wassergehalt bei Schrumpfbeginn w zwischen 6 % und 12 % und entsprechender Trockendichte ρ_d zwischen 1.5 Mg/m^3 und 2.0 Mg/m^3 lässt sich durch die Gleichung

$$s' = s w \rho_d / \rho_w$$

darstellen, wobei ein Wert von $s = (36 \pm 4) \%$ ermittelt wurde.

RESUME

Les bentonites, comme d'autres sols cohésifs, présentent un effet de retrait secondaire, c'est-à-dire que lorsque l'on dessèche un échantillon initialement humide, le volume de l'échantillon diminue encore pour les teneurs en eau inférieures à la limite de retrait, ce qui peut conduire à l'apparition de crevasses et par conséquent à une diminution de la capacité de transport calorifique. Le retrait secondaire a été étudié sur des échantillons de bentonites MX-80 et Montigel Pulver, matériaux pris en considération par la Cédra comme matériaux-tampons pour les dépôts finals. On a mesuré le retrait secondaire dans des conditions proches de celles auxquelles on peut s'attendre dans les dépôts, sur des échantillons compactés uniaxialement et isostatiquement. On a également fait des mesures à partir de la limite de liquidité sur les deux matériaux. La limite de retrait est atteinte pour une teneur en eau de 14 %, resp. 18 %; le retrait secondaire s' , rapporté au volume total de l'échantillon se monte, à partir de la limite de retrait, à environ 9 % pour le MX-80 et 11 % pour le Montigel Pulver. Le retrait secondaire s' des échantillons de teneur en eau w au début du retrait variant entre 6 % et 12 % et de densité sèche correspondante ρ_d comprise entre 1.5 Mg/m³ et 2.0 Mg/m³ se laisse décrire par l'équation:

$$s' = s w \rho_d / \rho_w$$

dans laquelle la valeur s déterminée expérimentalement est de $s = (36 \pm 4)\%$.

SUMMARY

Like other cohesive soils, bentonites exhibit shrinkage effects, i.e. when a wet sample is dried out the sample volume decreases even below the saturation limit; this can lead to cracks and therefore to a decrease in heat transport through the material. The shrinkage of samples of the bentonites MX-80 and Montigel identified by Nagra as potential backfill materials has been investigated. For this purpose the amount of shrinkage has been determined on uniaxially and isostatically compacted samples under conditions close to those expected in a repository as well as on samples initially at the liquid limit. The shrinkage limit is at a water content of about 14 %, resp. 18 %, the shrinkage s' expressed as a fraction of total sample volume amounts to about 9 % for MX-80 and to 11 % for Montigel Pulver, as determined for samples initially at the liquid limit. The shrinkage s' of the compacted samples with water content w when shrinkage begins between 6 % and 12 % and corresponding dry density ρ_d between 1.5 Mg/m^3 and 2.0 Mg/m^3 follows the equation

$$s' = s w \rho_d / \rho_w$$

where the value of s , as determined experimentally, is $s = (36 + 4)\%$.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	I
RESUME	II
SUMMARY	III

1.	EINLEITUNG	1
2.	VERSUCHSDURCHFUEHRUNG	5
3.	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	7
3.1	Versuche ab Fließgrenze	7
3.2	Versuche an einaxial verdichteten Proben aus MX-80 und Montigel Pulver	8
3.3	Versuche an isostatisch verdichteten Proben aus MX-80 und Montigel Pulver	9
3.4	Diskussion	9

VERZEICHNIS DER TABELLEN

1.	Ergebnisse der Schrumpfversuche ab Fließgrenze	7
2.	Ergebnisse der Schrumpfversuche an einaxial verdichteten MX-80-Proben	10
3.	Ergebnisse der Schrumpfversuche an einaxial verdichteten Montigel-Proben	10
4.	Ergebnisse der Schrumpfversuche an isostatisch verdichteten MX-80 und Montigelproben	10

VERZEICHNIS DER FIGUREN

1.	Idealisiertes Schrumpfverhalten von bindigen Böden	1
2.	Schrumpfverhalten von Tonen mit stark gebundenen Wasserschichten	2

LITERATURVERZEICHNIS

12

<u>VERZEICHNIS DER BEILAGEN</u>		<u>Seite</u>
Beilage 1	Volumenbestimmung an Bentonitproben mittels Quecksilbertauchwägung	13
Beilage 2	Schrumpfen von MX-80 ab Fliessgrenze	14
Beilage 3	Schrumpfen von Montigel ab Fliessgrenze	14
Beilage 4	Schrumpfen von einaxial verdichtetem MX-80	15
Beilage 5	Schrumpfen von einaxial verdichtetem MX-80	15
Beilage 6	Schrumpfen von einaxial verdichtetem Montigel	16
Beilage 7	Schrumpfen von isostatisch verdichtetem MX-80	16
Beilage 8	Schrumpfen von isostatisch verdichtetem Montigel	17
Beilage 9	Schrumpfen von MX-80: Zusammenstellung	17
Beilage 10	Schrumpfen von Montigel: Zusammenstellung	18

1. EINLEITUNG

Trocknet man einen bindigen Boden rissfrei von der Fließgrenze weg, so beobachtet man das in Fig. 1 idealisiert dargestellte Verhalten des Volumens als Funktion des Wassergehaltes.

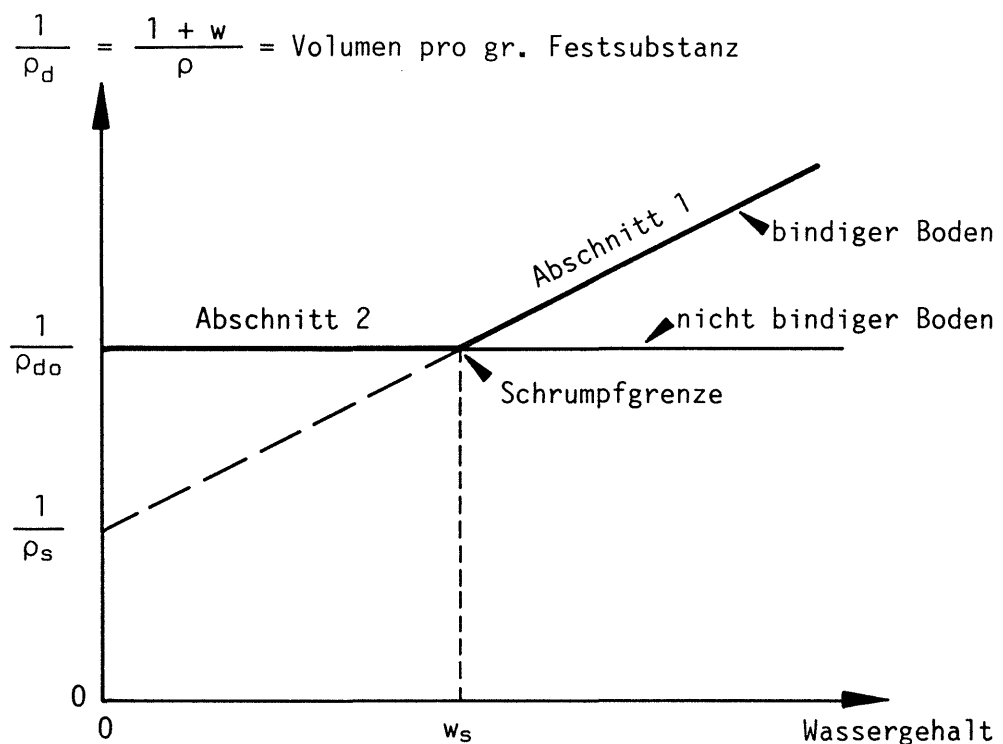


Fig. 1: Idealisiertes Schrumpfverhalten von bindigen Böden; ρ_d = Trockendichte, ρ = Feuchtdichte, ρ_s = spezifische Dichte, w = Wassergehalt, w_s = Schrumpfgrenze, ρ_{d0} = maximal erreichbare Trockendichte ab Fließgrenze = Trockendichte unterhalb der Schrumpfgrenze. Oberhalb der Schrumpfgrenze w_s ist der Boden gesättigt, unterhalb w_s ist er ungesättigt.

Die Schrumpfgrenze w_s ist definitionsgemäss /1/ jener Wassergehalt, bei welchem sich das Volumenverhalten ändert, wenn die Probe von der Fließgrenze her rissfrei getrocknet wird. Idealerweise erreicht dabei die Probe im gesättigten Zustand ihr minimales Volumen. Wenn sich bei der Schrumpfgrenze alle Körner berühren, würde bei einer Gewichtsabnahme unterhalb der Schrumpfgrenze keine Volumenänderung mehr eintreten. Die

Gewichtsabnahme wäre durch die Abgabe von Porenwasser im ungesättigten Zustand der Probe bestimmt. Oberhalb der Schrumpfgrenze ist die Probe jedoch wassergesättigt und jede Gewichtsabnahme hat eine entsprechende Veränderung des Poren- und damit Probenvolumens zur Folge.

Bei Tonen mit Wasserschichten, die stark an die Tonminerale gebunden sind, wird ein Nachschrumpfen beobachtet; d.h. auch unterhalb der Schrumpfgrenze tritt noch eine Volumenverminderung bei Wasserentzug ein, indem die Teilchen des Bodens noch näher zusammenrücken können infolge abgebauter Wasserschichten. Dies wird in Fig. 2 dargestellt.

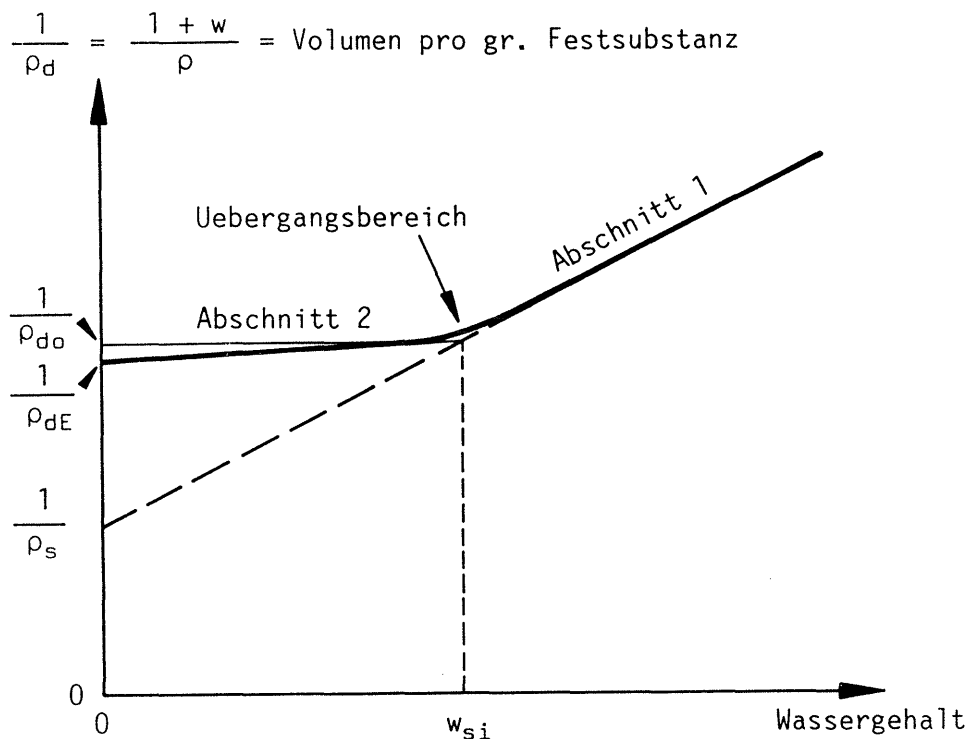


Fig. 2: Schrumpfverhalten von Tonen mit stark gebundenen Wasserschichten; Symbole wie in Fig. 1, zusätzlich:
 ρ_{d0} = Trockendichte zu Anfang des Nachschrumpfens,
 ρ_{dE} = Trockendichte am Ende des Nachschrumpfens,
 w_{si} = idealisierte Schrumpfgrenze; die Steilheit der Kurve im Abschnitt 2 entspricht der Schrumpfung s ; die volumenbezogene Schrumpfung s' wird als $s' = 1 - (\rho_{d0}/\rho_{dE})$ definiert.

Es soll bemerkt werden, dass in jenen Fällen die Schrumpfgrenze nicht mehr eindeutig definiert ist. Oft weisen jedoch die Abschnitte 1 und 2 über grössere Spannen eine lineare Abhängigkeit vom Wassergehalt auf. Der Schnittpunkt beider Geraden wird in solchen Fällen als idealisierte Schrumpfgrenze w_{si} definiert.

Das Nachschrumpfen kann dann durch die Steilheit der Kurve im Abschnitt 2 charakterisiert werden, d.h. man kann das Nachschrumpfen s als

$$s = \Delta V / V_w \quad (1)$$

definieren, wo ΔV die Volumenänderung beim Nachschrumpfen und V_w das totale Wasservolumen zu Beginn des Nachschrumpfens sind. Es gilt

$$\Delta V = \frac{M_{tr}}{\rho_{do}} - \frac{M_{tr}}{\rho_{dE}} \quad (2)$$

$$V_w = \frac{M_w}{\rho_w} = \frac{M_{tr}}{\rho_w} w_{si} \quad (3)$$

wo M_w , bzw. M_{tr} die Massen des Wassers, bzw. die Trockenmasse und ρ_w die Dichte des Wassers sind. Es ergibt sich somit

$$s = \frac{\rho_w}{w_{si}} \left(\frac{1}{\rho_{do}} - \frac{1}{\rho_{dE}} \right) \quad (4)$$

Für praktische Anwendungen ist es aber oft zweckmässiger, die Volumenänderung der Probe auf das gesamte Probenvolumen zu Beginn des Nachschrumpfens V_{po} zu beziehen. Es wird der Parameter s' eingeführt, der als

$$s' = \Delta V / V_{po} \quad (5)$$

definiert wird, wo V_{po} zu Beginn der Schrumpfung, also beim Wassergehalt w_{si} , gemessen wird. Der Parameter s' kann auch aus den Trockendichten berechnet werden:

$$s' = \frac{\Delta V}{V_{po}} = \frac{V_{po} - V_{pE}}{V_{po}} = 1 - \frac{V_{pE}}{V_{po}} = 1 - \frac{\rho_{do}}{\rho_{dE}} \quad (6)$$

wo V_{pE} das Volumen und ρ_{dE} die Trockendichte am Ende des Nachschrumpfens und ρ_{do} die Trockendichte zu Beginn des Nachschrumpfens, d.h. beim Wassergehalt w_{si} , sind.

Mit Formel (4) ergibt sich nun folgende Beziehung zwischen s und s'

$$s = \frac{s' \rho_w}{w_{si} \rho_{do}} \quad (7)$$

Hat eine Bodenprobe bei Schrumpfbeginn einen Wassergehalt w , der kleiner als w_{si} ist, so sind in den Formeln (4), (6) und (7) anstelle von w_{si} der Wassergehalt w und anstelle von ρ_{d0} die Trockendichte ρ_d bei Schrumpfbeginn zu verwenden.

Im Rahmen der Anwendung von Bentoniten in Endlagern für radioaktive Abfälle ist eine Bestimmung des Nachschrumpfung deshalb von Bedeutung, weil das Ausmass der Nachschrumpfung die Rissbildung in der Probe bestimmt, was sich ungünstig auf die Wärmeabströmung auswirken kann. Dieser Effekt ist allerdings nur während der ersten Jahre nach Verschluss des Endlagers von Bedeutung, da die durch Wasseraufnahme aus dem Gestein hervorgerufene Quellung die Risse wieder schliessen wird, bis der gequollene Bentonit eine homogene Verfüllung bildet.

Für Endlager für hochaktive Abfälle werden hochverdichtete Bentonite in Betracht gezogen. Die Charakterisierung des Schrumpfvhaltens von Blöcken solcher hochverdichteter Bentonite von der Fliessgrenze her ist nur bedingt relevant, da im Endlager diese Blöcke ungesättigt und mit Wassergehalten von rund 7 bis 10 % eingebaut werden; wie im folgenden dargestellt, liegt die Schrumpfgrenze von den betrachteten Materialien, von der Fliessgrenze her gemessen, bei 14 bis 18 %. Von Relevanz sind Versuchsbedingungen, die den Bedingungen im Endlager nahe kommen. Diese Versuchsbedingungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

2. VERSUCHSDURCHFUEHRUNG

Als Ausgangsmaterialien dienten der Wyoming Bentonit MX-80 und der südbayrische Bentonit Montigel Pulver. Tonmineralogische und bodenmechanische Daten wurden im Rahmen einer früheren Arbeit ermittelt /2/.

Zum Erreichen ausreichender Dichten im gequollenen Zustand im Endlager sind gemäss Bau und Betriebskonzept der Nagra für Endlager für hochaktive Abfälle Anfangstrockendichten der Bentonitblöcke von rund 1.8 Mg/m^3 erforderlich /3/. Blöcke mit Trockendichten dieser Grössenordnung lassen sich am vorteilhaftesten aus Bentonitpulvern mit Wassergehalten zwischen 7 und 11 % herstellen, da für diesen Wassergehaltsbereich die erforderlichen Presskräfte am niedrigsten sind /4/. Von diesen Vorgaben ausgehend wurde das experimentelle Untersuchungsprogramm bestimmt: von beiden untersuchten Bentonitarten (Na-Bentonit MX-80 und Ca-Bentonit Montigel) wurden Proben mit Trockendichten zwischen 1.5 Mg/m^3 und 2.0 Mg/m^3 hergestellt.

Die Verdichtung erfolgte dabei für die meisten Proben einaxial in der Verdichtungsmulde, wobei insgesamt 6 Proben bei der Fa. Metoxit AG, Thayngen, isostatisch verdichtet wurden, um den Einfluss dieser Verdichtungsart auf die Schrumpfung zu untersuchen. Hergestellt wurden zylindrische Presskörper mit einer Fläche F von 25 cm^2 und einer Höhe H von etwa 25 mm. Damit die zylindrischen Proben nach dem Pressvorgang ungestört gewonnen werden konnten, wurde anstelle des vollen Proberinges ein vierteiliger, zerlegbarer Ring verwendet. Nähere Details sind in /4/ zu finden.

Nach der Herstellung wurden die einseitig verdichteten Proben aus MX-80 und Montigel unterschiedlich behandelt; die MX-80 Proben wurden bei Raumtemperatur gelagert, bevor mit dem Austrocknungsversuch begonnen wurde. Es wurde festgestellt, dass die Proben bei dieser Lagerung Feuchtigkeit aus der Luft aufnahmen (typischerweise stieg der Wassergehalt um 1 - 2 %), was auch mit einer leichten Quellung verbunden war (typischerweise lag die Volumenzunahme bei 4 %). Gegen diese Feuchtigkeitsaufnahme wurde nichts unternommen, da gerade in einem Endlager ähnliche Effekte zu erwarten sind /3/:

- Die Herstellungstoleranzen für Blöcke bedingen, dass zwischen Blöcken Spalten vorhanden sind, d.h. im Endlager steht Leerraum für die Quellung der Blöcke zur Verfügung

- Die Blöcke werden nach ihrer Herstellung und bis kurz vor ihrem Einbau in den Endlagertunnels vor der hohen Feuchtigkeit durch dichte Kunststoffhüllen geschützt. Nach dem Einbau bedingt die hohe Luftfeuchtigkeit in den Kavernen eine Wasseraufnahme, die zumindest in der Nähe der Kavernenwände erfolgen kann, bevor das Wasser infolge der Wärmeproduktion der Abfälle wieder aus den Blöcken verdrängt wird.

Anschliessend an diese Lagerung wurden die Proben langsam im Trockenofen ausgetrocknet und in regelmässigen Abständen die Gewichts- und Volumenbestimmungen bis zur vollständigen Austrocknung der Proben bei einer Ofentemperatur von 200°C durchgeführt.

Die Proben aus isostatisch verdichtetem MX-80 sowie sämtliche Proben aus Montigel wurden hingegen sofort nach Herstellung in den Trockenofen gelegt, d.h. es wurde sofort mit den Schrumpfversuchen angefangen.

Für die Volumenbestimmung wurde die Methode der Quecksilbertauchwägung gewählt, die eine Messgenauigkeit von besser als ± 0.5 % erlaubte (siehe dazu Beilage 1).

Das Nachschrumpfen wurde, den Versuchsgegebenheiten entsprechend, nicht nur von der Fließsgrenze w_L , sondern vor allem vom Wassergehalt nach der Lagerung und Feuchtigkeitsaufnahme her bestimmt (typischerweise 10 - 12 % Wassergehalt).

Zum Vergleich mit den Versuchen an hochverdichteten Proben wurden auch insgesamt 4 Versuche ab Fließsgrenze durchgeführt. Bei höheren Wassergehalten wurde das Volumen mittels einer Schublehre bestimmt. Die dadurch erreichbare Messgenauigkeit betrug rund ± 4 %.

In beiden Materialien entstehen Risse bei der Austrocknung: in MX-80 eher wenige breite Risse, in Montigel zahlreiche kleine Risse. Die Anzahl und Morphologie der Risse beeinflusst die Bestimmung des Ausmasses des Nachschrumpfens nicht, da bei solchen Bestimmungen nur Probenvolumen und Probenmasse gemessen werden.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 Versuche ab Fließsgrenze

Die Ergebnisse der Versuche ab Fließsgrenze für die Bentonite MX-80 und Montigel-Pulver sind in Tabelle 1 enthalten. Der gemessene Verlauf des spezifischen Volumen $1/\rho_d$ als Funktion des Wassergehaltes ist in Beilage 1 dargestellt.

Versuchs-Nr.	21 / 22	101 / 102
Material	MX-80	Montigel
Wassergehalt bei Versuchsbeginn (%) ca.	580	140
Trockendichte bei Versuchsbeginn (Mg/m^3)	0.16	0.58
Schrumpfgrenze (%)	14	18
Trockendichte bei Schrumpfgrenze (Mg/m^3)	1.84	1.82
Trockendichte bei Versuchsende (Mg/m^3)	2.02	2.04
Nachschrumpfen s (%) auf Wasservolumen bezogen	35	33
Nachschrumpfen s' (%) auf Totalvolumen bezogen	8.9	10.8

Tabelle 1: Ergebnisse der Schrumpfversuche ab Fließsgrenze

Aus diesen Ergebnissen geht hervor, dass die idealisierte Schrumpfgrenze w_{si} bei 14, resp. 18% liegt und damit deutlich über dem Verdichtungswassergehalt von hochverdichtetem Bentonit (ca. 10 %) ist. Andererseits weisen die Bentonite jedoch ein beachtliches Mass an Nachschrumpfen auf. Zudem resultieren aus der Schrumpfung sehr hohe Trockendichten von über $2 \text{ Mg}/\text{m}^3$. Diese Werte entsprechen den höchsten in den Verdichtungsversuchen erreichten Trockendichten, bei Wassergehalten von 10 % und Pressdrücken von ca. $200 \text{ MN}/\text{m}^2$ /3/.

3.2 Versuche an einaxial verdichteten Proben aus MX-80 und Montigel Pulver

Beilage 4 zeigt den typischen Verlauf einer Schrumpfkurve für hochverdichteten MX-80. In den Versuchen 11 und 13 wurden die Proben bei einem Einbauwassergehalt von 8.5 % zu einer Trockendichte von 1.65 Mg/m^3 , bzw. 1.74 Mg/m^3 verdichtet. Bei anfänglicher Lagerung im Labor nahmen die Proben Feuchtigkeit aus der Luft auf (Anstieg des Wassergehaltes um ca. 0.8 %), was mit einer leichten Quellung verbunden war, wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt wurde. Anschliessend wurden die Proben im Trockenofen bei langsam gesteigerter Temperatur gelagert, wobei das Gewicht und Volumen häufig bestimmt wurden. Die Temperatur wurde bis 200°C gesteigert. Bezogen auf das Volumen des Porenwassers nach der Luftlagerung haben sich Werte s von 38 %, bzw. 35 % ergeben. Bezogen auf das Probenvolumen nach der Luftlagerung resultierten für diese Versuche Werte s' von 5.8 resp. 5.6 %.

Beilage 5 zeigt die Resultate von zwei Proben (12, 14), die nach der Verdichtung praktisch gleiche Bedingungen aufwiesen wie die Proben 11 und 13, jedoch länger an der Luft gelagert wurden und damit mehr Feuchtigkeit aufnahmen (Probe 12 wurde zudem dazwischen für kurze Zeit getrocknet). Beachtenswert ist jedoch das Ergebnis, dass bei anschliessender Austrocknung zu $w = 0$ % die Werte des Nachschrumpfens s (37 %; 34 %) und s' (5.9 %; 5.6 %) gegenüber jenen der Proben 11 und 13 keine signifikante Abweichungen aufweisen.

Dies zeigt auch die Zusammenstellung der Schrumpfkurven in Beilage 9. Von den 8 Kurven beziehen sich 7 auf hochverdichtetes MX-80, eine auf MX-80 ausgehend von Fließgrenze. Die Kurven sind weitgehend parallel und ergeben ein sehr ähnliches Verhalten der Proben bezüglich Nachschrumpfen, unabhängig der Anfangsbedingungen. Zudem ist ersichtlich, dass nur bei einer hochverdichteten Probe eine grössere Dichte resultierte als bei der Probe, welche ausgehend von der Fließgrenze geschrumpft wurde.

In Beilage 6 sind zwei typische Versuchsergebnisse dargestellt, welche an Montigel Pulver bestimmt wurden. In den Montigel-Proben bildeten sich bedeutend mehr Risse, was teilweise zu Abblätterungen führte. Die Versuchsdurchführung und -auswertung wurde dadurch erschwert. Wie bereits erwähnt wurden alle Montigel-Proben direkt nach der Verdichtung im Ofen bei stufenweise erhöhter Temperatur getrocknet. Bei den Versuchen 92 und 93 von Beilage 6 betragen die Werte des Nachschrumpfens s' beispielsweise 4.1 %, resp. 6.0 %.

Beilage 10 gibt wiederum eine Zusammenstellung der Versuche an Montigel. Die 6 Kurven von hochverdichtetem Montigel und jene von Montigel ausgehend von der Fliessgrenze zeigen auch hier ein sehr ähnliches Verhalten bezüglich Nachschumpfen. Die Ergebnisse sämtlicher Versuche werden in den Tabellen 2 (MX-80) und 3 (Montigel) zusammengefasst.

3.3 Versuche an isostatisch verdichteten Proben aus MX-80 und Montigel Pulver

Je 3 Proben aus MX-80 und Montigel wurden direkt nach der Herstellung von einem Anfangswassergehalt von rund 8% bzw. 11% ausgetrocknet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

3.4 Diskussion

Das beobachtete Nachschumpfen s' ist bei MX-80 etwas kleiner, bei Montigel etwas grösser bei den isostatisch gepressten als bei den einaxial gepressten Proben. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Anfangswassergehalt bei der isostatisch verdichteten MX-80-Proben kleiner, bei den Montigel-Proben hingegen grösser als bei den einseitig verdichteten Proben war. Betrachtet man hingegen den Wert s

$$s = \frac{s' \rho_w}{w \rho_d} \quad (8)$$

wo w der Wassergehalt bei Schrumpfbeginn und ρ_d die entsprechende Trockendichte ist, so lässt sich feststellen, dass innerhalb der Messgenauigkeit s weder von der Verdichtungsart noch vom untersuchten Material noch von dessen Trockendichte abhängt:

<u>Material</u>	<u>Verdichtungsart</u>	<u>s (%)</u>
MX-80	isostatisch	32
MX-80	einaxial	36
Montigel	isostatisch	38
Montigel	einaxial	35

Versuchs-Nr.	Trockendichte bei Versuchsbeginn (Mg/m ³)	Trockendichte nach der Lagerung (Mg/m ³)	Wassergehalt nach der Lagerung (%)	Trockendichte bei Versuchsende (Mg/m ³)	* Nachschrumpfen s' (%)
7	1.53	1.50	8.7	1.59	5.7
9	1.55	1.51	9.9	1.62	6.8
10	1.56	1.51	9.8	1.60	5.6
11	1.65	1.62	9.4	1.72	5.8
12	1.65	1.59	10.1	1.69	5.9
13	1.74	1.70	9.3	1.80	5.6
14	1.74	1.67	10.4	1.77	5.6
15	1.83	1.80	9.2	1.90	5.3
16	1.84	1.76	10.4	1.88	6.4
17	1.90	1.86	9.2	1.97	5.6
18	1.91	1.81	10.5	1.94	6.7
19	1.98	1.93	9.3	2.05	5.9

* Das Nachschrumpfen s' ist auf die Trockendichte und den Wassergehalt nach der Lagerung bezogen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Schrumpfversuche an einaxial verdichteten MX-80-Proben

Versuchs-Nr.	Trockendichte bei Versuchsbeginn (Mg/m ³)	Trockendichte nach der Lagerung (Mg/m ³)	Wassergehalt nach der Lagerung (%)	Trockendichte bei Versuchsende (Mg/m ³)	* Nachschrumpfen s' (%)
91	1.56	1.56	9.8	1.62	3.7
92	1.63	1.63	9.9	1.70	4.1
93	1.71	1.71	10.5	1.82	6.0
94	1.82	1.82	10.0	1.95	6.7
95	1.84	1.84	9.8	1.96	6.1
96	1.88	1.88	10.5	2.02	6.9

* Das Nachschrumpfen s' ist auf die Trockendichte und den Wassergehalt nach der Lagerung bezogen.

Tabelle 3: Ergebnisse der Schrumpfversuche an einaxial verdichteten Montigel-Proben

Versuchs-Nr. und Material	Trockendichte bei Versuchsbeginn (Mg/m ³)	Wassergehalt bei Versuchsbeginn (%)	Trockendichte bei Versuchsende (Mg/m ³)	Nachschrumpfen s' (%)
DV1/MX-80	1.95	7.7	2.05	4.9
DV3/MX-80	1.93	8.3	2.03	4.9
BV3/MX-80	1.94	8.3	2.05	5.4
DV2/Montigel	1.86	11.1	2.03	8.4
BV1/Montigel	1.88	11.4	2.04	7.8
BV2/Montigel	1.89	10.9	2.05	7.8

Tabelle 4: Ergebnisse der Schrumpfversuche an isostatisch verdichteten MX-80 und Montigelproben

Für die Vergleichstabelle (Seite 9) wurden die Durchschnittswerte der Versuchsergebnisse ermittelt, wobei die Versuche 91 und 92 nicht berücksichtigt wurden (bei diesen Versuchen wurden kleinere Werte von s' gemessen als in allen anderen Proben; diese Werte sind aber mit einer grösseren Unsicherheit behaftet, da das in Abschnitt 2 erwähnte Abblättern bei diesen Proben mit niedrigen Trockendichten die Auswertung besonders erschwerte.)

Diese Feststellung erlaubt, das zu erwartende Nachschrumpfen zu berechnen gemäss

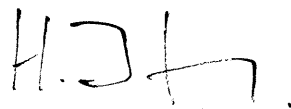
$$s' = s w \rho_d / \rho_w \quad (9)$$

mit $s = (36 \pm 4)\%$.

Dabei ist zu beachten, dass unter Endlagerbedingungen die Blöcke nach dem Einbau Wasser aus der feuchten Luft aufnehmen können, was zu einer Quellung führt, d.h., die in der Gleichung (9) einzusetzende Trockendichte ist etwas kleiner und der einzusetzende Wassergehalt etwas grösser als die Trockendichte, bzw. der Wassergehalt der Blöcke unmittelbar nach ihrer Herstellung.

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

E T H - Zürich



Prof. H.J. Lang, Vorsteher

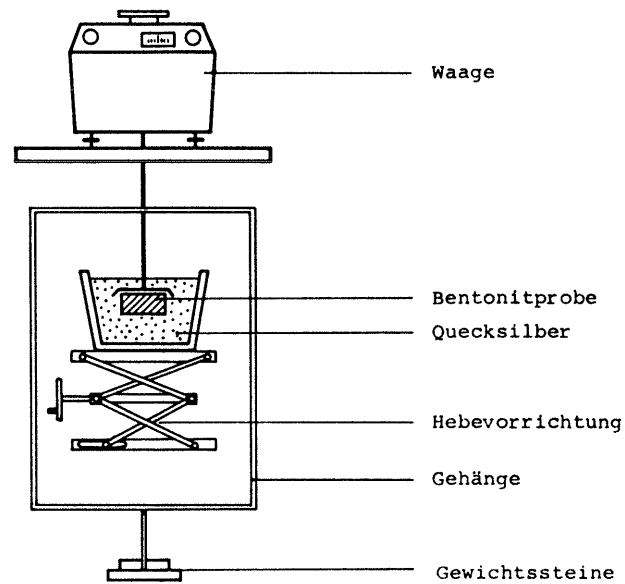
LITERATURVERZEICHNIS

- /1/ H.H. Einstein: Die Scherfestigkeit dreier kohäsiver Böden in Abhängigkeit vom Lagerungszustand und von der Materialart, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau der ETH-Zürich Nr. 71, 1966

- /2/ M. Müller-von Moos, G. Kahr: Bereitstellung von Bentoniten für Laboruntersuchungen, NAGRA NTB 82-04, 1982

- /3/ NAGRA: Projekt Gewähr 1985: Endlager für hochaktive Abfälle, Bautechnik und Betriebsphase, NGB 85-03, 1985

- /4/ F. Bucher, P. Jeger, G. Kahr, H. Lehner: Herstellung und Homogenität hochverdichteter Bentonitproben, NAGRA NTB 82-05, 1982

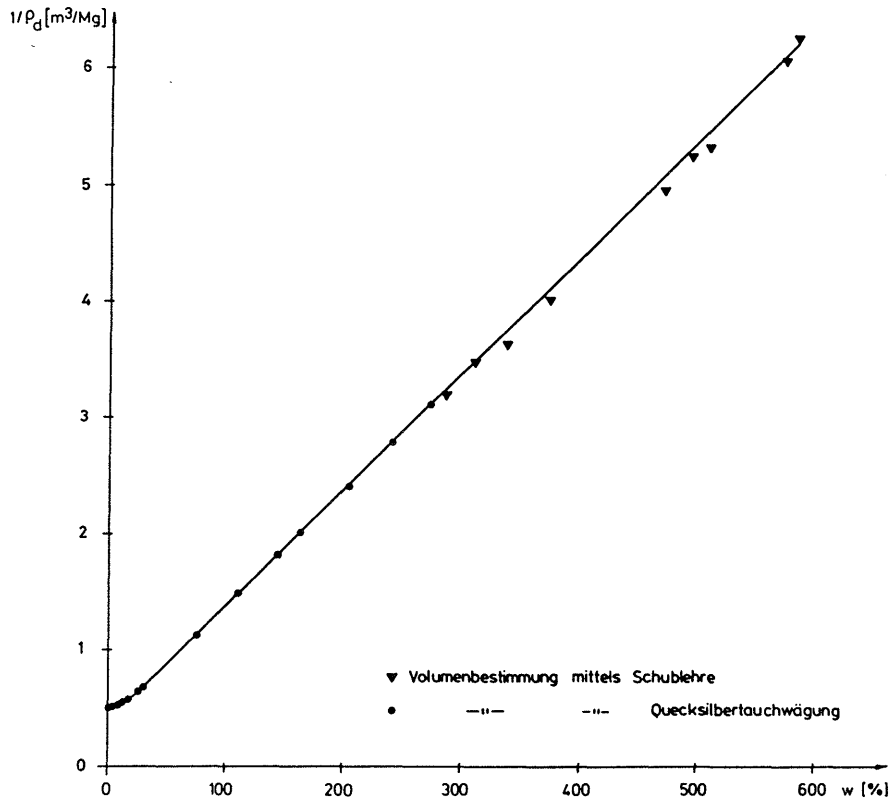


$$V = \frac{A}{\gamma_{\text{Hg}}}$$

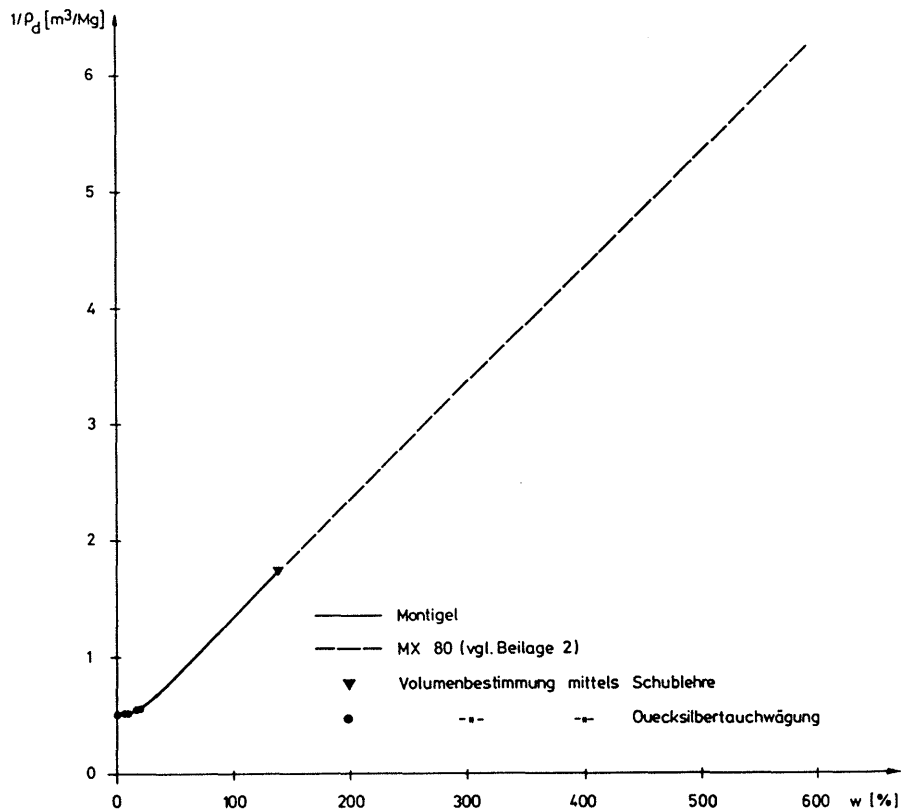
$$A = G_p + G_a + G_s - G_w$$

- V : Volumen Probe
 G_p : Gewicht Probe
 G_a : Gewicht Gehänge
 G_s : Gewicht Steine
 G_w : Ablesung Waage
 γ_{Hg} : spez. Gewicht Quecksilber

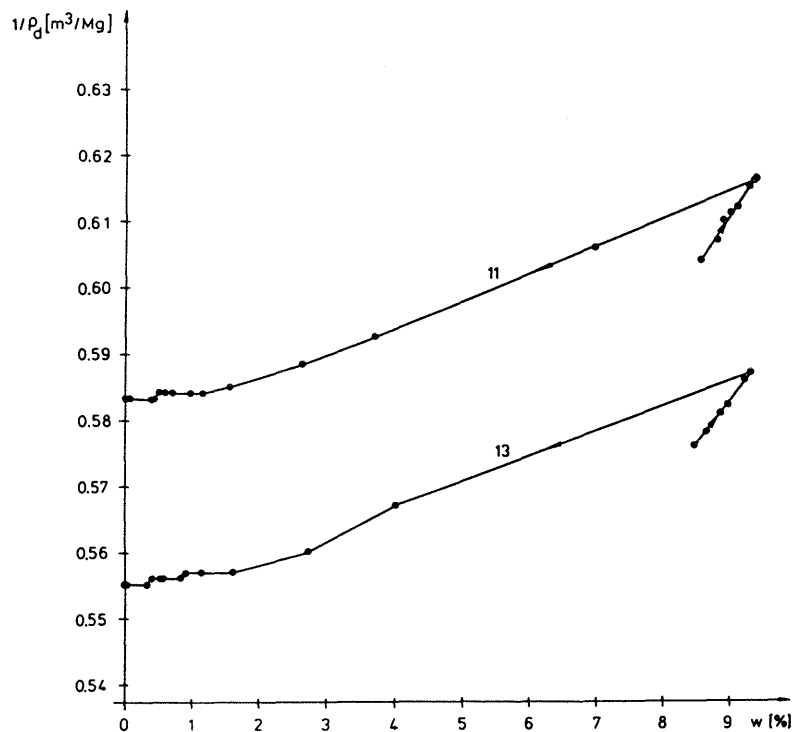
Beilage 1: Volumenbestimmung an Bentonitproben
mittels Quecksilbertauchwägung



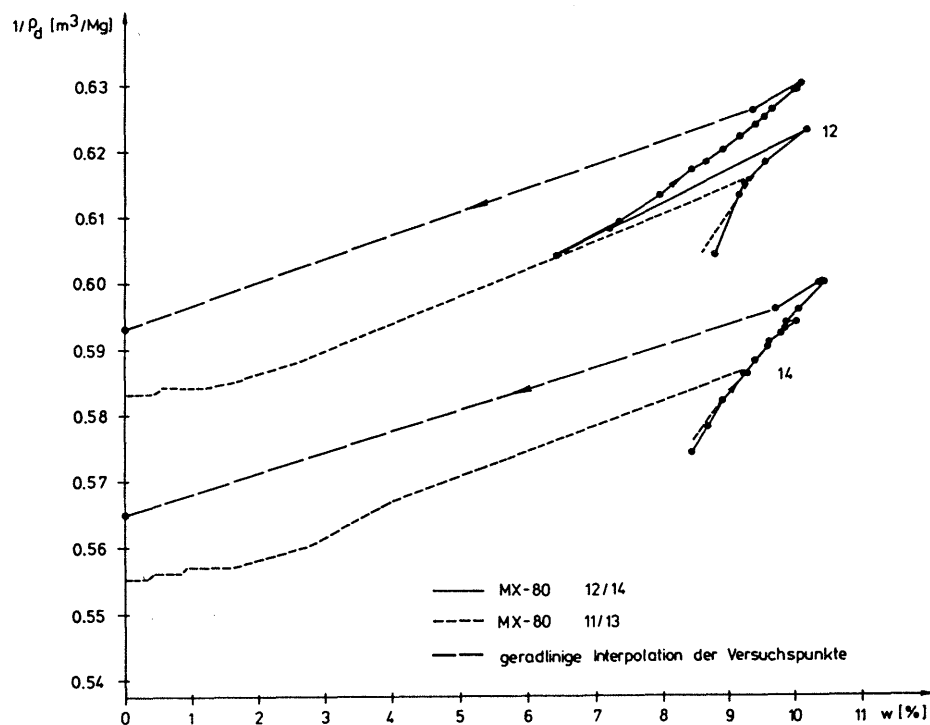
Beilage 2: Schrumpfen von MX-80 ab Fließgrenze



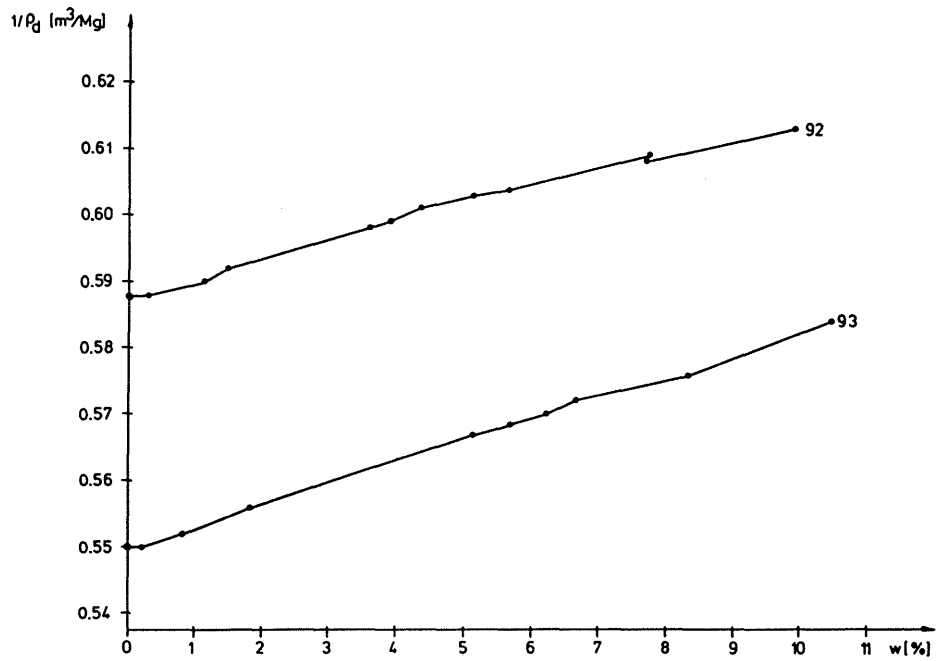
Beilage 3: Schrumpfen von Montigel ab Fließgrenze



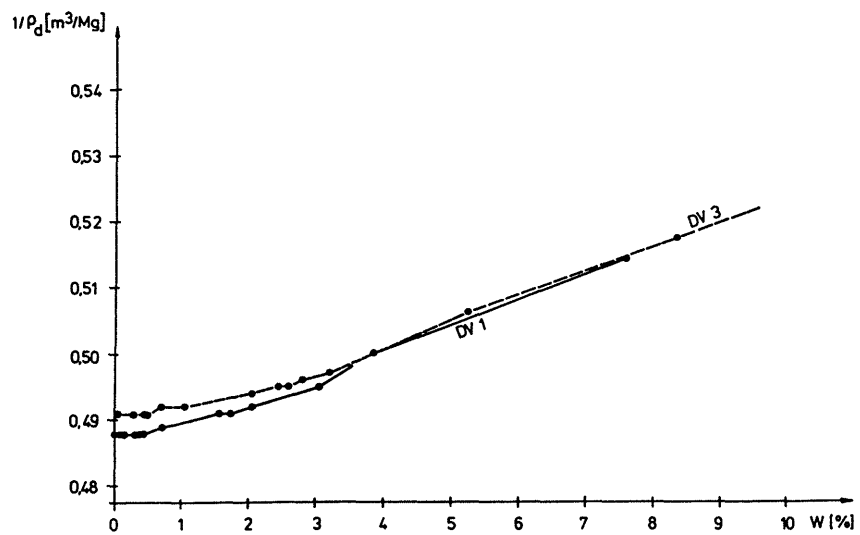
Beilage 4: Schrumpfen von einaxial verdichtetem MX-80



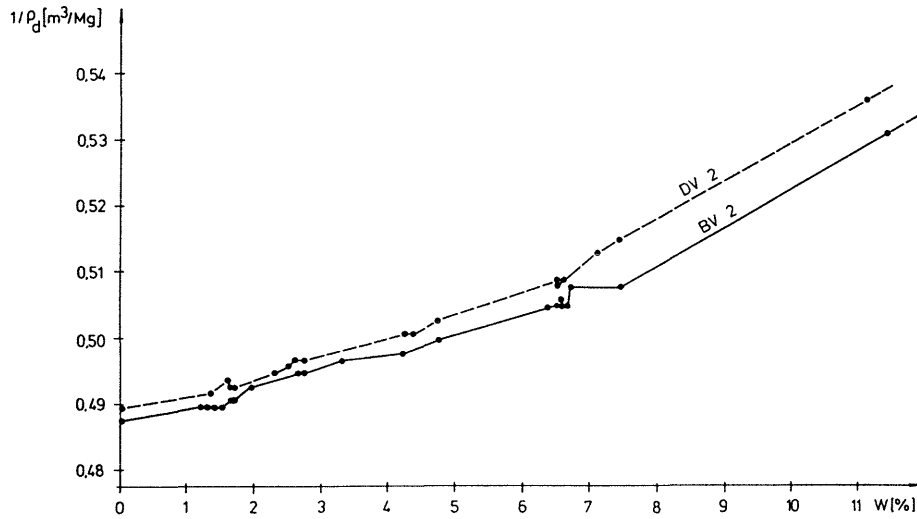
Beilage 5: Schrumpfen von einaxial verdichtetem MX-80



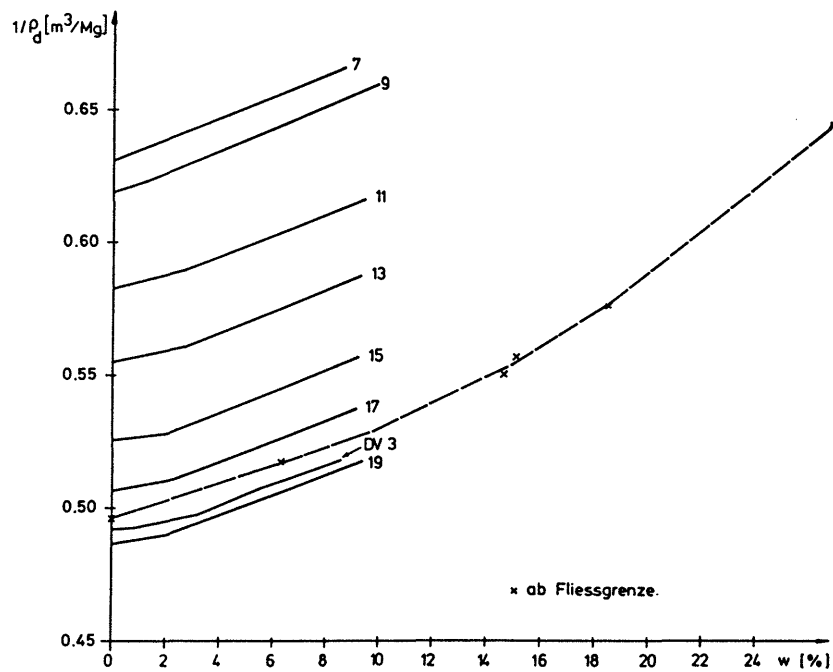
Beilage 6: Schrumpfen von einaxial verdichtetem Montigel



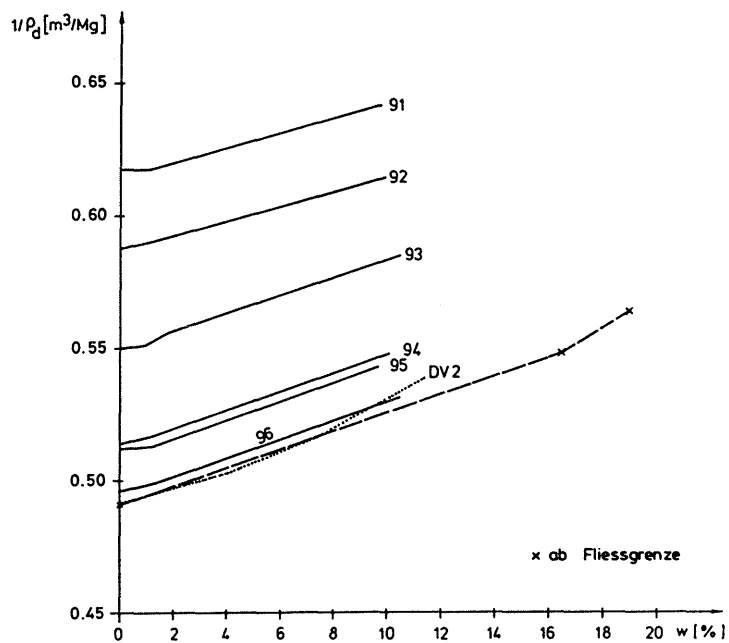
Beilage 7: Schrumpfen von isostatisch verdichtetem MX-80



Beilage 8: Schrumpfen von isostatisch verdichtetem Montigel



Beilage 9: Schrumpfen von MX-80: Zusammenstellung



Beilage 10: Schrumpfen von Montigel: Zusammenstellung