

Veröffentlichungen des Instituts
der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo)
an der Technischen Hochschule Berlin

Heft 5

**Über Zusammenhänge
zwischen Wasserhaushalt der Tonminerale
und bodenphysikalischen Eigenschaften
bindiger Böden**

Gemeinschaftsarbeit des
Laboratoriums für bauwissenschaftliche Technologie der Technischen Hochschule Berlin
und der
Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik

K. Endell W. Loos H. Meischeder V. Berg

Mit 22 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1938

ISBN 978-3-7091-5245-4
DOI 10.1007/978-3-7091-5393-2

ISBN 978-3-7091-5393-2 (eBook)

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.
Copyright 1938 by Julius Springer in Berlin.
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1938

Als Dissertation von der Technischen Hochschule Berlin genehmigt. D 83.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einleitung: Problemstellung und Aufgabe	5
II. Ausgangsstoffe	5
III. Meßtechnisches	6
a) Ermittlung der Wasseraufnahme im Enslin-Gerät	6
b) Vorrichtung zur Bestimmung der Benetzungswärme	8
c) Bodenphysikalische Untersuchungen	8
IV. Ergebnisse	11
a) Wasseraufnahmevermögen und Ansaugeschwindigkeit	14
b) Benetzungswärme der reinen Modellstoffe	16
c) Beziehung zwischen Teilchengröße und Dicke der Wasserhüllen der Tonteilchen	17
d) Beziehungen zwischen den bodenphysikalischen Kennziffern	18
V. Folgerungen	21
a) Rutschneigung	21
b) Setzungen	23
c) Frostgefahr	23
VI. Zusammenfassung	24
VII. Schrifttum	25

I. Einleitung.

Problemstellung und Aufgabe.

Die Erforschung von Zusammenhängen zwischen der Rutschneigung und Chemie von Tonböden wurde bereits früher von K. Endell angeregt und in Untersuchungen dargetan, die gemeinsam mit der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau durchgeführt wurden [1]¹.

Dieser erste Versuch, die chemischen Erkenntnisse über die Tone, welche die Kolloidchemie und Röntgenografie gebracht haben, mit bodenphysikalischen Werten und Folgerungen für die Praxis in Zusammenhang zu bringen, hat bereits gezeigt, daß die gegenseitigen Abhängigkeiten außerordentlich verwickelt sind. Einwandfreie Beziehungen zwischen den kolloidchemischen und röntgenografischen Erkenntnissen zu den bodenphysikalischen Werten konnten daher damals nicht gefunden werden. Lediglich die im Enslin-Gerät (s. S. 6) ermittelte Wasserbindefähigkeit erwies sich als eine wichtige Kennziffer.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit waren aber so aufschlußreich, daß auf Antrag die Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen e. V. weitere Mittel zur Fortsetzung der Arbeiten in dieser Richtung bewilligte. Es schien zunächst erforderlich, an einwandfrei definierten Tonmineralien, die in verschiedenen Verhältnissen mit Quarz von bestimmter Feinheit gemischt wurden, kolloidchemische und bodenphysikalische Messungen durchzuführen, um, ausgehend von diesen Laboratoriumsversuchen, später Rückschlüsse auf natürliche, bindige Böden ziehen zu können². Gleichzeitig wurden 13 Tonböden in gleicher Weise untersucht.

Ziel dieser Untersuchung war es, aufbauend auf den Erkenntnissen der erstgenannten Arbeit [1] und ausgehend von Versuchen an Modellstoffen, die den praktischen Verhältnissen weitgehend angepaßt waren, den Einfluß des Wasserhaushalts bindiger Böden (d. h. Wasseraufnahmevermögen, Ansaugeschwindigkeit, Dicke und Druckverhältnisse in den viskosen Wasserhüllen um die Tonteilchen usw.) in Beziehung zu setzen zu den den Bauingenieur interessierenden bodenphysikalischen Kennziffern. Diese Ergebnisse waren auf natürliche bindige Böden zu übertragen, um evtl. auf Grund der schnell und einfach auszuführenden Versuche der Wasserbindung solche bodenphysikalischen Eigenschaften, deren Bestimmung meist mit sehr viel Zeitaufwand verbunden ist, vorausszusagen. Praktische Folgerungen, besonders hinsichtlich der Rutschneigung und der Frostbildung in bindigen Böden, waren zu ziehen.

II. Ausgangsstoffe.

Bei der Untersuchung von bindigen Böden, wie sie in der Natur vorkommen, ist es praktisch unmöglich, im Boden die Menge der vorhandenen nichtbindigen, zum Teil sehr feinen (2—10 μ) Beimengungen (d. h. im Klima der gemäßigten Zone meist Quarz und Kalkspat, in Gegenden kälterer Zonen auch sehr viel Feldspat) sowie den Grad ihrer Feinheit zu ermitteln. Es war deshalb zunächst notwendig, von ganz bestimmten Ausgangsstoffen auszugehen und wohl definierte Tonmineralien mit Zuschlagstoffen, in unserem Fall nur mit Quarz verschiedener Feinheit, zu mischen. Als Ausgangsstoffe wurden verwendet:

Kaliglimmer,

Ca-Kaolin (Spergau, Lieferung 1934),

Ca-Bentonit und

Na-Bentonit.

Das Tonmineral ist beim Kaolin vorwiegend Kaolinit, bei den Bentoniten dagegen Montmorillonit.

¹ Die in eckigen Klammern stehenden Ziffern [1] verweisen auf das Schrifttum am Schluß des Heftes.

² Die röntgenografischen Untersuchungen wurden von Herrn Dr.-Ing. Maegdefrau, Chemisches Institut der Universität Rostock, durchgeführt, dem wir auch an dieser Stelle herzlichst danken.

Auf Zahlentafel 1 sind die Werte der Feinheit, die *S*-Werte (Summe der austauschfähig gebundenen Ionen) und das Röntgengitter der benutzten Mineralien angegeben. Über die Feinheit dieser Mineralien

Zahlentafel 1. Kennzeichnende Eigenschaften der untersuchten Ausgangsstoffe.

Bezeichnung	Feinheit	Summe und Art der austauschfähigen Basen in Milliäquivalent je 100 g trockenen Ton	Röntgengitter
I. Nichtquellende Stoffe.			
Spergauer Silbersand	20% 0,5 — 1,5 mm	0	—
	54% 0,2 — 0,5 mm		
	24% 0,09 — 0,2 mm		
	2% < 0,09		
Dörentruper Quarzmehl Nr. 5	2—10 μ	0	—
„ „ Nr. 10	2—3 μ	0	—
Fe ₂ O ₃ aus Oxalat	< 2 μ	—	—
II. Quellende Stoffe.			
Kaliglimmer	60% 0,02 — 0,2 mm	3	} starres Schichtengitter
	35% 0,002 — 0,02 mm		
	5% < 0,002 mm		
Spergauer Kaolin	45% 2—20 μ	7	} über- wiegend Ca
	55% < 2 μ		
Zettlitzer Standard-Kaolin	36% 2—20 μ	9	} über- wiegend Ca
	64% < 2 μ		
Ca-Bentonit	100% < 2 μ	100 über- wiegend Ca	} eindimensional quellendes Schichtengitter
Na-Bentonit	100% < 2 μ	100 davon 30 Na	

wird noch eingehender gesprochen werden (S. 17). Diese Stoffe wurden sowohl im reinen Zustand untersucht als auch in den Mischungen 9 : 1, 7 : 3 und 1 : 1.

Mischung. Die Mischung der Mineralgemenge erfolgte im trockenen Zustande in einer Werner & Pfeleiderer-Mischmaschine, einem Zwangsmischer mit zwei gegenläufigen Schnecken, in Mengen von rund 1 kg Gesamtmenge des Mischgutes. Es mußte deshalb in trockenem Zustande gemischt werden, weil bei Wasserzusatz die Schnecken das Material zwar umwälzten, aber nicht durcheinander mengten. Als Mischzeit wurde dreimal 1 h für jede Mischung gewählt, nach dieser Zeit waren Ungleichmäßigkeiten in dem Mischgut nicht mehr zu bemerken. Nach der Mischung wurde destilliertes Wasser je nach der Fließgrenze des Gemenges von Hand zugegeben. Da, wie auch aus der Abb. 10 hervorgeht, die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme bei einzelnen Gemengen, insbesondere den Bentoniten, sehr gering ist, mußte die Vermischung mit Wasser sehr gewissenhaft und langsam so durchgeführt werden, daß immer nur kleine Mengen der Mischungen Wasserzusatz erhielten. Die Durchfeuchtung erforderte bei dieser Arbeitsweise z. B. mehrere Stunden bei den Bentoniten.

III. Meßtechnisches.

a) Ermittlung der Wasseraufnahme im Enslin-Gerät.

Zur Ermittlung der aufgenommenen Wassermengen sowie der Geschwindigkeit, in der diese Mengen angesaugt werden, wurde die Apparatur nach O. Schmidt [2, 3, 4] verwendet, die in Abb. 1 dargestellt

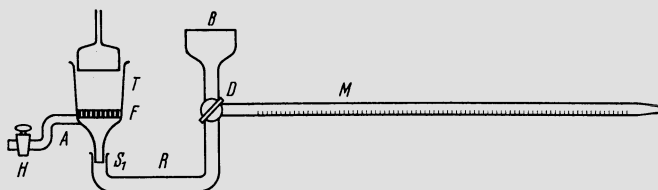


Abb. 1. Vorrichtung zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme quellbarer Stoffe (Enslin-Gerät).

ist. Der Apparat besteht aus einem U-förmig gebogenen Teil *R* und einer 3 cm³ fassenden Kapillare *M* (mit einer Ablesegenauigkeit von 2 mg Wasser). Beide Teile sind durch einen Dreiweghahn *D* verbunden, der nach oben zu einem Einfülltrichter *B* führt. Auf der linken Seite trägt das U-Rohr einen Trichter *T* mit einem Glasfritter *F*. Zur Messung werden U-Rohr und Kapillare mittels Dreiweghahn *D* verbunden, luftblasenfrei mit Wasser gefüllt, Hahn *H* geschlossen und die Substanz auf das Glasfritter gebracht. Die Menge aufgesaugten Wassers wird an der Teilung der Kapillare abgelesen. Der Wassergehalt ist ausgedrückt in Prozent der Einwaage (meist 0,3 g).

Bei dem Gerät sind folgende Fehlerquellen zu beobachten:

1. Art der Probeaufgabe.

An einem Zettlitzer Kaolin wurde zunächst die Genauigkeit der Methode untersucht und der Einfluß der hauptsächlichsten Fehlerquelle, das ist die Art der Probeaufgabe auf die Filterplatte, bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abb. 2 dargestellt.

Bei den vier Versuchen, die als Mittelwerte Kurve I auf Abb. 2 ergeben, wurde der Kaolin gleichmäßig auf die Mitte der Filterplatte aufgetragen. In diesem Fall tritt eine größte Abweichung vom Mittelwert von 4% der aufgenommenen Wassermenge, berechnet in Prozent der Trockensubstanz, auf oder eine Abweichung von 0,01 cm bei der Ablesung. Da sich 0,01 cm noch bequem schätzen läßt, so ist für diesen Fehler die Verschiedenheit der Höhe des Tonkegels auf der Filterplatte verantwortlich, da diese Höhe die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme beeinflusst. Dieser Vorgang kommt stark in den Kurven II und III zum Ausdruck, bei denen gegenüber den Mittelwerten der Kurve I die Abweichungen bis 25% betragen. Am größten sind die Abweichungen im Anfangsbereich der Kurven; die Menge des im Sättigungszustand aufgenommenen Wassers ist schließlich gleich. Bei den Versuchen II und III wurde der Ton seitlich auf die Filterplatte aufgegeben, so daß er an der Tiegelwand bis zu einer gegenüber dem Versuch I viel größeren Höhe liegen blieb.

Abb. 3 zeigt den Einfluß der aufgegebenen Tonmenge auf die Gestalt der Enslin-Kurven am Beispiel des Na-Bentonits. Gleichzeitig erbringt der Versuch den Beweis, daß der Unterschied im Verlauf der

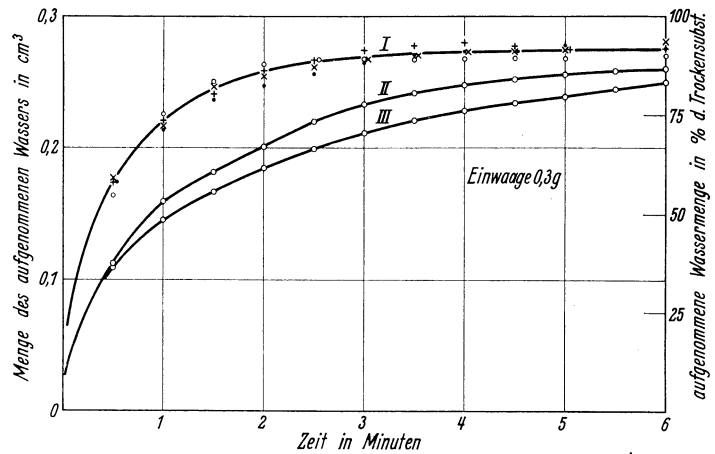


Abb. 2. Reproduzierbarkeit der Enslin-Kurven und Einfluß der Art der Materialaufgabe (Einwaage 0,3 g) bei Zettlitzer Kaolin.

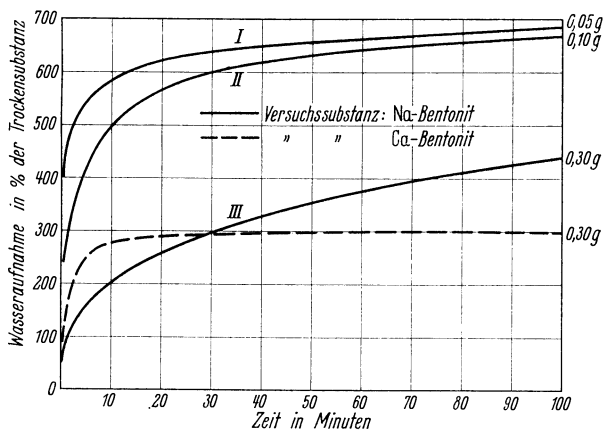


Abb. 3. Abhängigkeit des Verlaufs der Wasseraufnahme von der Größe der Einwaage.

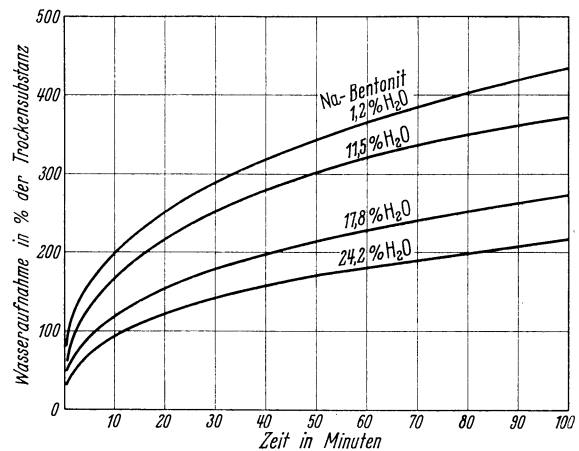


Abb. 4. Einfluß des ursprünglichen Wassergehaltes eines Tones auf den Verlauf der Wasseraufnahme (Einwaage 0,3 g).

Kurven des Ca- und Na-Bentonits nicht auf die Verschiedenheit der Benetzbarkeit zurückzuführen ist, sondern daß die langsamere Wasseraufnahme bei Na-Bentonit ihre Ursache im Verquellen der unteren schon benetzten Partien der Probe hat, die undurchlässig werden und damit die Wasserzufuhr zu den oberen Schichten bremsen.

2. Einfluß der Teilchengröße.

Die Abhängigkeit des Verlaufs der Wasseraufnahme und der im Sättigungszustand aufgenommenen Wassermenge von der Teilchengröße ist in der Literatur [4] beschrieben. Dieser Arbeit zufolge steigt die Menge des im Sättigungszustand aufgenommenen Wassers mit größerer Feinheit der Probe. Die vorliegenden Versuche mit Quarzsand bestätigten das auch und zeigten weiter eine Verlangsamung der Wasseraufnahme mit steigender Feinheit der Versuchssubstanz.

3. Einfluß der Feuchtigkeit der Probe im Anlieferungszustand.

Der Einfluß der Anfangsfeuchtigkeit der zu untersuchenden Substanzen auf den Verlauf der Wasseraufnahme ist aus Abb. 4 ersichtlich. Hier ist die Einwaage bei allen Versuchen gleich, aber der ursprüngliche Wassergehalt der Proben verschieden.

Um Tone und Böden mit dem Enslin-Gerät zu untersuchen und die Ergebnisse vergleichen zu können, müssen also folgende Bedingungen gleich gehalten werden:

1. die Art der Probeaufgabe,
2. die Größe der Einwaage,
3. der ursprüngliche Wassergehalt der Probe.

Bei den folgenden Versuchen wurden die Proben immer gleichmäßig aufgegeben, die Einwaage mit 0,3 g konstant gehalten und die Probe bei 105—110° C unter Umschaukeln 5 h getrocknet.

b) Vorrichtung zur Bestimmung der Benetzungswärme.

Es ist wiederholt in der Literatur, welche die Wasseraufnahme feinsten Bodenteilchen behandelt, darauf hingewiesen worden, daß ein gewisser Zusammenhang besteht zwischen der Menge des aufgenommenen Wassers bzw. der Dicke der hochviskosen Wasserhülle und der Benetzungswärme. Es schien daher wünschenswert, auch diese Eigenschaft, die schon wiederholt untersucht wurde, ohne daß stets übereinstimmende Werte gefunden wurden, nochmals einwandfrei zu ermitteln, um festzustellen, ob sich diese Beziehung bestätigt. Es sei gleich vorweggenommen, daß sich eine Bestätigung nicht ergab.

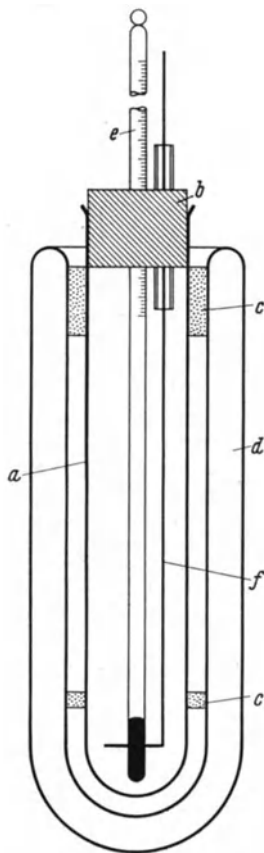


Abb. 5. Kalorimeter zur Bestimmung der Benetzungswärme.

In Anlehnung an die von H. Janert [5] angegebene Apparatur wurde ein einfaches Kalorimeter entwickelt. Die Vorrichtung ist in Abb. 5 dargestellt. Sie besteht aus dem eigentlichen Reaktionsgefäß *a*, in dem die Benetzung durch Einschüttung einer gewogenen Tonmenge in einer gemessenen Wassermenge vorgenommen wird. Dieses Reaktionsgefäß ist mit Hilfe der Korkringe *c* in dem zur Wärmeisolation dienenden Devargefäß *d* festgehalten. Der Kork *b* schließt das Reaktionsgefäß nach oben ab; in ihm befinden sich 2 Bohrungen. Durch die Bohrung im Zentrum reicht ein in Zehntelgrade geteiltes Thermometer *e* bis nahe an den Boden des Reaktionsgefäßes. Durch eine seitliche Bohrung ist ein Glasrührer *f* eingeführt. Zur Messung wurden die Ton- und Bodenproben über Nacht im Trockenschrank bei 110° getrocknet und dann 6 h lang im Exsikkator neben dem Benetzungskalorimeter zum Temperatúrausgleich stehen gelassen. Das Kalorimeter wurde jeweils mit 50 cm³ Wasser beschickt und es wurde immer gleichmäßig 2,5 g Substanz zur Bestimmung der Benetzungswärme eingefüllt, die nach Lüften des Verschlusses *b* von oben in das mit Wasser beschickte Kalorimeter eingeschüttet wurde. Die am Thermometer abgelesene Temperatur erreichte unter dauerndem Rühren schon nach etwa $\frac{1}{2}$ min ein Maximum. Aus der Differenz der Anfangstemperatur des Wassers im Kalorimeter und der maximalen Temperatur wurde (unter Benutzung des Wasserwertes) die Benetzungswärme in cal/g berechnet.

Die Eichung des Kalorimeters geschah auf elektrischem Wege. Das Kalorimeter mit 50 cm³ Wasser wurde durch eine im Wasser befindliche Heizwendel aus 0,1 mm starkem Platindraht erwärmt und aus der beobachteten Stromstärke, der Spannung und Zeit die Joulesche Wärme errechnet.

Aus der so berechneten, zugeführten Wärme und der tatsächlichen Temperaturzunahme errechnet sich der Wasserwert. Er wurde als Mittel von 20 Bestimmungen mit 61,0 cal gefunden.

c) Bodenphysikalische Untersuchungen.

Die bodenphysikalischen Untersuchungen dieser Arbeit gliedern sich in zwei Hauptgruppen: 1. Versuche, die mit künstlichen Mineralgemengen durchgeführt wurden, und 2. Versuche mit deutschen Tonböden, die auf ihre verschiedenen bodenphysikalischen Eigenschaften untersucht wurden. Grundsätzlich wurden dabei von jedem Gemenge oder Boden soviel Kennziffern wie möglich bestimmt; die Bestimmung dieser Kennziffern und die Durchführung der Versuche im einzelnen soll nachstehend kurz besprochen werden [6], damit auch der diesem Versuchswesen Fernstehende sich ein ungefähres Bild machen kann.

Wassergehalt. Der Wassergehalt der Probe wird auf die in ihr enthaltene Menge Trockensubstanz bezogen; er errechnet sich aus dem Gewichtsverlust der Probe nach mindestens fünfständigem Trocknen bei $\sim 105^{\circ}$ C.

Spezifisches Gewicht. Das spezifische Gewicht wird aus dem Gewicht und dem Volumen einer bestimmten Menge Trockensubstanz gefunden; das Volumen wird dabei in kleinen Pyknometern von $\sim 100 \text{ cm}^3$ Inhalt aus der verdrängten Wassermenge ermittelt. Der Gefahr von Ungenauigkeiten infolge eingeschlossener Luft begegnet man durch Kochen.

Kornverteilung. Die Kornverteilung der benutzten Bodenproben wurde nach dem Verfahren von Bouyoucos-Casagrande ermittelt; eine Methode, die auf der Sedimentation von Kugeln verschiedener Größe in einer stehenden Flüssigkeit beruht. Die benutzten Hilfsgeräte sind dabei: Schlammzylinder, Aräometer, Thermometer, Stoppuhr, destilliertes Wasser und zur Auswertung ein Nomogramm, für die Aufbereitung der Probe noch ein Rührapparat und ein Antikoagulationsmittel. Vor Beginn des Versuches wird die Probe sorgfältig mit dem Gummifinger in einer Porzellanschale zerrieben, etwa 30 min lang noch in einem elektrischen Quirlapparat (System Siemens-Protos) zerrührt, wobei gleichzeitig 5 cm^3 einer 1 : 6 verdünnten Wasserglaslösung (Na_2SiO_3) von 40° B. zugesetzt werden, um ein Koagulieren, d. h. ein Zusammenballen der Einzelkörner zu Korngrüppchen, zu verhüten. Danach wird die Probe in einen Schlammzylinder unter gleichzeitiger Auffüllung bis zur 1000 cm^3 -Marke getan, noch einmal umgeschüttelt und dann mit dem Aufsetzen des Schlammzylinders die Stoppuhr in Gang gesetzt. Zu verschiedenen Zeitpunkten, anfangs sehr oft, später in größeren Abständen, wird vorsichtig das Aräometer in die Suspension eingetaucht und dabei Zeitpunkt sowie die am Schaft des Aräometers abgelesene Eintauchtiefe sowie die jeweilige Temperatur des Wassers notiert. Nach drei Tagen wird der Versuch abgebrochen, da dann alle Korngrößen $> 1 \mu$ erfaßt sind und das Verfahren bei noch kleineren Bodenteilchen zu ungenau wird. Aus dem Trockengewicht der benutzten Probemenge (durch Eindampfen feststellbar), dem spezifischen Gewicht und den Ablesungen läßt sich dann nach dem Stokesschen Gesetz mit Hilfe eines Nomogramms die Kornverteilung leicht ermitteln. Sind gröbere Teilchen als $0,06 \text{ mm}$ in der Probe enthalten, so müssen diese noch ausgewaschen und für sich gesiebt werden. Das Verfahren liefert nicht die wahren Korngrößen, sondern, da es das Gesetz von Stokes zur Voraussetzung hat, nur „äquivalente“ Korndurchmesser, d. h. es gibt den Durchmesser einer Kugel von gleicher Sinkgeschwindigkeit an. Die Kornform wird also nicht berücksichtigt; für vergleichende Betrachtungen wie in diesem Fall genügt aber das Verfahren. Wegen der weiteren Voraussetzungen, Durchführung und Fehlerquellen des Verfahrens muß auf die Literatur verwiesen werden [7].

Konsistenzgrenzen: a) **Fließgrenze.** Als Fließgrenze ist diejenige Konsistenz (Wassergehalt) eines Materials definiert, bei der die Probe in der Schale bei 25 Schlägen auf eine Länge von 1 cm zusammenfließt. Die Bestimmung der Fließgrenze erfolgte mit dem bekannten, nach den Angaben von A. Casagrande konstruierten Fließgrenzenapparat. Die Bodenprobe wird zu einem homogenen Brei aufbereitet und mit einem Spachtel in der Schale etwa 1 cm hoch abgestrichen. Nachdem nun mit einem Spachtel, dessen Abmessungen ebenso wie Gewicht, Krümmung, Fallhöhe der Schale, Material des Apparates usw. genauestens festliegen müssen, eine Furche gezogen worden ist, so daß die Probe in zwei etwa gleiche Hälften getrennt ist, läßt man mit Hilfe der Kurbel und Nockenwelle die Schale so lange aus gleichbleibender Höhe auf die Hartgummiunterlage aufschlagen, bis die Furche auf dem Boden der Schale auf eine Länge von 1 cm zusammengeflossen ist. Man bestimmt nun den Wassergehalt der Probe und wiederholt den Versuch noch mit zwei anderen Konsistenzen des Materials. Aus der graphischen Darstellung, wobei die Schlagzahlen logarithmisch und die Wassergehalte arithmetisch aufgetragen werden, interpoliert man den Wassergehalt, der einer Schlagzahl von 25 Schlägen entspricht. Als Kontrolle für die Versuchsgenauigkeit dient die Erfahrung, daß die ermittelten Punkte der „Fließkurve“ bei dieser Art der Auftragung auf einer Geraden liegen.

b) **Ausrollgrenze.** Auch diese Kennziffer ist durch Vereinbarung festgelegt: sie ist definiert als der Wassergehalt, bei dem sich die Probe nicht mehr zu etwa 3 mm starken Rollen ausrollen läßt. Man rollt also die Probe auf Fließpapier zu Drähten aus, legt die Drähte wieder zusammen und wiederholt den Versuch, bis der Wassergehalt so weit abgenommen hat, daß die Probe zerbröckelt. Dann wird der Wassergehalt bestimmt.

c) **Die Plastizitätszahl** ist die Differenz zwischen dem Wassergehalt der Fließgrenze und dem der Ausrollgrenze.

Alle drei Kennzeichen sind ein Maß für die innere Beweglichkeit eines Materials, die von anderen bodenphysikalischen Faktoren, wie Kornverteilung, innere Reibung, aber auch vom Mineralaufbau, Gehalt an chemischen Beimengungen abhängig ist.

Reibungswert. Die Frage des Winkels der inneren Reibung ist auch heute noch längst nicht eindeutig geklärt. Die Versuchseinrichtung ist ebenso wie die Versuchsdurchführung weitgehend von Einfluß auf die Ergebnisse des Scherversuches [8]. So ist es vor allem noch unklar, in welchen zeitlichen Abständen die Schubspannung vergrößert werden soll: ob in gleichbleibenden Abständen oder in ständig zunehmenden Intervallen je nach der Art der eingebrachten Probe. In manchen Fällen läßt sich nicht einmal

eindeutig der Bruchzustand klar angeben, da bei vielen Tonen die Probe nicht plötzlich abscher, sondern der Versuchsverlauf ein langsames Fließen der Probe erkennen läßt. Mit diesen weitgehenden Einschränkungen müssen daher die Ergebnisse des Scherversuches betrachtet werden, deren Ermittlung im nachfolgenden kurz erläutert werden soll. Das für die Versuchsdurchführung benutzte Gerät, ein Rahmenscherapparat nach A. Casagrande, zeigt die Abb. 6. Die zu untersuchende Probe wurde mit einem

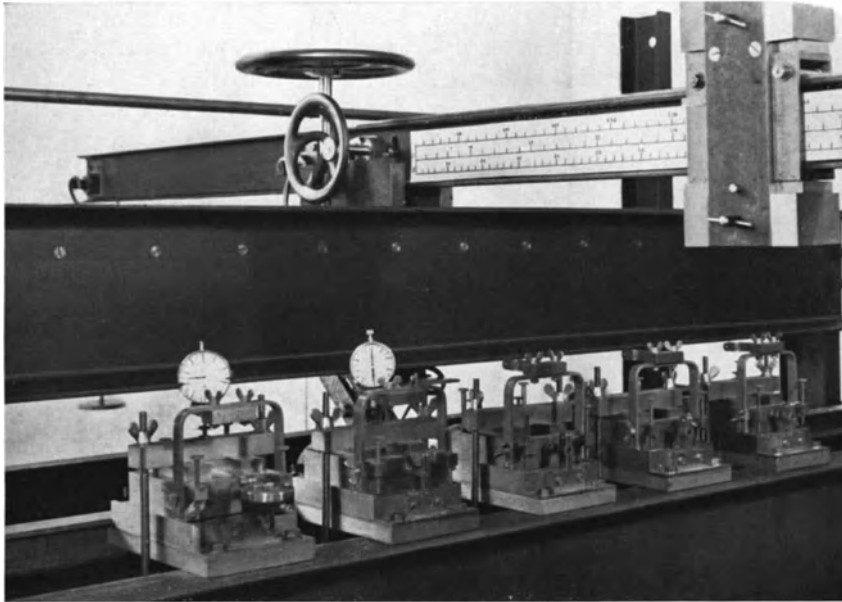


Abb. 6. Scherapparat nach A. Casagrande.

Wassergehalt nahe der Fließgrenze in 3 oder 4 Scherbüchsen eingebaut und dann über ein Gehänge und Hebel langsam mit verschiedenen Auflasten belastet, so daß die Proben in den einzelnen Scherbüchsen unter verschiedenen Normalspannungen stehen. Während der Konsolidierungszeit paßt sich der Wassergehalt der Probe den verschiedenen Normalspannungszuständen an; die Abgabe des überschüssigen Porenwassers erfolgt nach oben und unten durch die Filtersteine (Abb. 7), die außerdem noch gezahnt sind, um eine bessere Einleitung der Scherkräfte in die Probe zu ermöglichen. Nachdem nun an der die Zusammendrückung messenden Uhr die Konsolidierung der Probe festgestellt wurde, d. h. die Probe ihren Wassergehalt der jeweiligen Auflast angepaßt hatte, wurden die einzelnen Proben längs einer erzwungenen Gleitfläche abgescher. Zu diesem Zweck wird der Oberteil der Scherbüchse gegen den Unterteil verschoben; die dazu erforderliche Kraft wird durch ein auf einem Hebel laufendes Gewicht erzeugt und über eine Schneidenklaue in den oberen Rahmen der Scherbüchse eingeleitet, dessen Verschiebung an einer Meßuhr abgelesen werden kann. Während des Abscherens — das ist der Vorteil des Rahmenscherapparates nach Casagrande — bleibt die Probe unverändert unter ihrer Auflast, ein Umsetzen nach der vertikalen Belastung ist also nicht erforderlich.

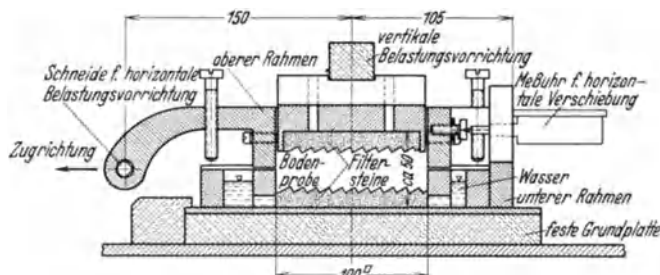


Abb. 7. Schnitt durch eine Scherbüchse.

wahrscheinlich richtiger gewesen, jede Bodenart mit der ihr eigenen Geschwindigkeit abzuscheren, aber es war der Sinn dieser Versuchsreihen, unter gleichen Bedingungen gefundene Kennziffern miteinander zu vergleichen. Infolgedessen wurde bei allen Bodenarten und Mineralgemengen die Steigerung der Schubspannung sowohl der Größe nach als auch was die Zeitintervalle betrifft, in gleichem Maße vorgenommen. Die Auswertung geschieht dermaßen, daß einmal die Verschiebungen in Abhängigkeit von der Schubspannung, in einem anderen Diagramm dann Schubspannungen (Bruchspannung) als Funktion der Normalspannung aufgetragen werden. In diesem letzteren Diagramm liegen dann die Punkte mit großer Annäherung auf einer Geraden. Der Tangens des Neigungswinkels dieser Geraden ist der Reibungsbeiwert $\mu = \operatorname{tg} \varphi$. Näheres über Fehlerquellen siehe [8].

Verdichtungsziffer. Abb. 8 zeigt den Kompressions-Durchlässigkeitsapparat nach A. Casagrande, mit dem sowohl die Verdichtungsziffer $a = -\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p}$ als auch der Durchlässigkeitsbeiwert k_0 ermittelt wurden. Der Apparat besteht aus einem Messingring mit einer Bohrung von 100 mm Durchmesser, in dem sich die Probe befindet. Oben und unten sind Filtersteine angeordnet, um einen Ausgleich der Porenwasserspannung durch Abgabe des überschüssigen Porenwassers unter zusätzlichen Belastungen

zu ermöglichen. Über einen Hebel und ein Gehänge wird die Probe belastet, zum Ausgleich des Eigengewichtes des Gehänges dient ein Gegengewicht, so daß mit einer Last 0 kg begonnen werden und auf 0 kg auch wieder entlastet werden kann.

Auch hier wird die Probe wieder mit einem der Fließgrenze entsprechenden Wassergehalt eingebaut, dann mit anfangs kleineren, später größeren Laststufen belastet und die Zusammendrückung der Probe an einer Meßuhr beobachtet.

Aus der Zusammendrückung wird die jeweilige Porenziffer bei den verschiedenen Belastungsfällen ermittelt, wobei die Porenziffer definiert ist als das Verhältnis von Hohlraum (Porenraum) zum Rauminhalt der festen Masse. Die Versuchsergebnisse werden aufgetragen in einem Druck-Porenziffer-Diagramm, aus dem dann sowohl das Verhalten der Probe beim Belasten (Zusammendrückung) als auch beim Entlasten (Schwellen) abgelesen werden kann. Als Maß für die Zusammendrückbarkeit gilt die Neigung der Belastungskurve: Verdichtungsnummer $a = -\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p}$; als Maß für die Quellfähigkeit die Schwellnummer a_s , die ebenfalls als Neigung der Sekante, im Grenzfall der Tangente an die Schwellkurve gegen die Abszisse (p -Achse) geometrisch dargestellt werden kann.

Durchlässigkeitsnummer. Am gleichen Apparat ist auch eine Einrichtung zur Bestimmung der Durchlässigkeit eines Bodens angebracht. Durch ein Ansatzrohr an der Grundplatte des Kompressionsapparates kann Wasser in die Bodenprobe eintreten und durchströmen. Die Durchlässigkeit der Filtersteine muß infolgedessen so groß sein, daß ihr hydraulischer Widerstand gegenüber dem der Probe so gering ist, daß er vernachlässigt werden kann. Gemessen wird die Zeit, die der Wasserspiegel in einem Standrohr braucht, um um ein gewisses Maß abzusinken. Da die untersuchten Proben so wenig durchlässig waren, daß bei den gegebenen Abmessungen der Versuchseinrichtung und damit bei der niedrigen Druckhöhe das Absinken des Wasserspiegels im Standrohr so langsam vor sich gegangen wäre, daß die Fehler infolge Verdunstung, Undichtigkeiten an den Hähnen, Temperaturschwankungen u. a. zu groß geworden wären, wurde der Wasserdruck durch Druckluft künstlich erhöht. An einem Quecksilbermanometer wird der Luftdruck abgelesen, nach Umrechnung in Wassersäulen wurden so Druckhöhen von 5–6 m erzeugt. Aus der gemessenen Zeit Δt läßt sich dann mit Hilfe der Darcyschen Formel $v = k \cdot i$ und der Gleichung $Q = F \cdot t \cdot v$, worin

$$\begin{array}{ll} v = \text{Durchflußgeschwindigkeit} & F = \text{Probenquerschnitt} \\ Q = \text{Durchflußwassermenge} & i = \text{Gefälle} \end{array}$$

bedeutet, nach der Formel

$$k = \frac{f}{F} \cdot \frac{h}{\Delta t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

der Durchlässigkeitsbeiwert k errechnen.

f = Querschnitt des Wasserstandsrohres

h = Höhe der Probe

h_1 und h_2 = Druckhöhen der beobachteten Marken am Wasserstandsrohr.

Da der Durchlässigkeitsbeiwert von der Lagerungsdichte der Probe abhängig ist, wurde für diese absoluten Vergleiche der Beiwert k_0 ermittelt, der sich auf die feste Substanz in der Probe bezieht. In die Formel geht dann ein Wert h_0 ein, die sogenannte reduzierte Probenhöhe, d. h. die Höhe der konzentriert gedachten, porenlosen, festen Substanz der Probe.

IV. Ergebnisse.

Die an den Ausgangsstoffen mit Hilfe der im Teil III beschriebenen Methoden gefundenen Ergebnisse sind in den Zahlentafeln 2 und 3 zusammengestellt und in den Abbildungen zeichnerisch wiedergegeben. Zu den einzelnen Gruppen der Untersuchungen sei noch folgendes bemerkt:

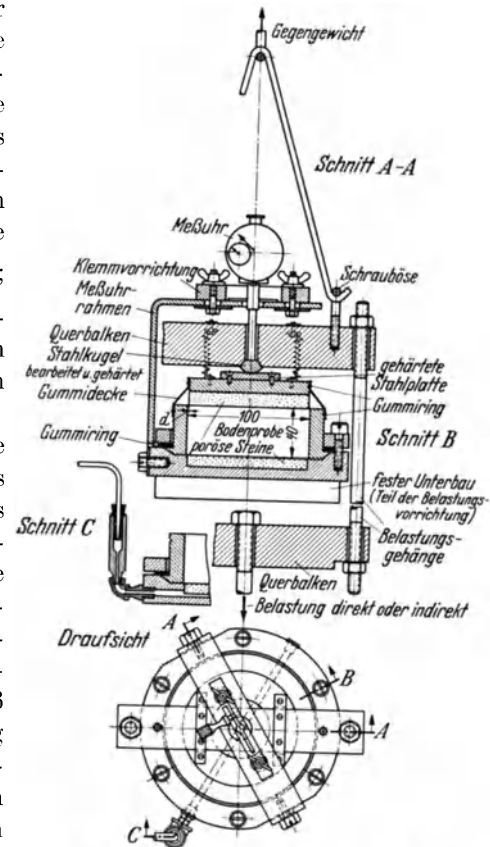


Abb. 8. Verdichtungsapparat nach A. Casagrande.

Zahlentafel 2. Kennziffern

Lfd. Nr.	Mischung	Anteile	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Plastizitätszahl	Reibungsbeiwert	Verdichtungs-	Durchlässigkeit
							ziffer a ($d p = 1,5-2,0 \text{ kg/cm}^2$)	k_0 bei $1,5 \text{ kg/cm}^2$
1	2	3	4	5	6	7	$\text{cm}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Quarzmehl					0,849	0,0074	$1,0 \cdot 10^{-3}$
2	Quarz : Glimmer	9 : 1				0,79	0,0156	$4,6 \cdot 10^{-4}$
3		7 : 3				0,74	0,0218	$4,2 \cdot 10^{-4}$
4		1 : 1				0,72	0,0410	$5,8 \cdot 10^{-4}$
5		0 : 1				0,69	0,0800	$4,9 \cdot 10^{-4}$
6	Quarz : Kaolin	9 : 1				0,85	0,0110	$9,5 \cdot 10^{-5}$
7		7 : 3				0,81	0,0220	$8,9 \cdot 10^{-6}$
8		1 : 1				0,62	0,032	$2,5 \cdot 10^{-6}$
9		0 : 1				0,40	0,072	$3,0 \cdot 10^{-6}$
10	Quarz : Ca-Bentonit	9 : 1				0,84	0,016	$4,3 \cdot 10^{-5}$
11		7 : 3	52,5	17,8	34,7	0,675	0,076	$2,1 \cdot 10^{-6}$
12		1 : 1	75,3	21,9	53,4	0,390	0,140	$5,5 \cdot 10^{-7}$
13		0 : 1	140,6	49,5	91,1	0,400	0,54	$2,0 \cdot 10^{-7}$
14	Quarz : Na-Bentonit	9 : 1	47,5			0,27	0,08	$1,6 \cdot 10^{-7}$
15		7 : 3	122,3	18,5	103,8		0,38	$3,0 \cdot 10^{-8}$
16		1 : 1	214	23,5	190,5			
17		0 : 1	475	47,0	428			

Zahlentafel 3. Kennziffern der

Lfd. Nr.	Herkunft	Bodenart	Kornverteilung				Wassergehalt bei Anlieferung	Spezifisches Gewicht	Fließgrenze	Ausrollgrenze
			Sand 2-0,1	Mehlsand 0,1-0,02	Schluff 0,02-0,002	Ton < 0,002				
			mm	mm	mm	mm			% vom Trockengewicht	g/cm ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Gleiwitz 445 H/16,00	Ton	2	9	40	49	20,8	2,68	78,2	27,2
2	Kassel	Ton		6	48	46	18,6	2,56	66,5	24,4
3	Königsberg Bw 200	toniger Feinsand	39	31	19	11	17,2	2,63	30,4	18,0
4	Kobbelbude	schluffiger Ton	6	17	51	26		2,64	40,0	
5	Darmstadt	Ton		9	28	63		2,69	69,1	26,5
6	Drakenburg	toniger Schluff	5	17	69	9		2,67	46,2	25,7
7	Siershahn	Kaolin-Ton		3	8	89		2,60	66,5	25,7
8	Haiger I	Ton	3	6	37	54	25,6	2,67	42,2	33,6
9	Haiger II	Ton	10	16	16	58	21,4	2,83	57,1	22,3
10	Haiger III	Ton		20	31	49	18,9	2,77	64,4	27,4
11	Walsum 116/14,00	toniger Mehlsand	10	62	18	10	22,1	2,64	35,5	19,3
12	Walsum 116/15,00-15,35	mehlsandiger Ton	10	57	12	21	23,2	2,63	37,7	19,0
13	Hemmoor-Ton	Ton	20	13	18	49		2,70	77,6	23,1

der Mineralgemenge.

Teilchengröße in μ	S-Wert Summe der adsorbierten Ionen überwiegend:		Werte im Enslin-Gerät				Benetzungswärme in cal/g	Röntgenbild (Kristallgitter)	
	Ca	Na	Aufgenommene Wassermenge im Endzustand in % der Trockensubstanz		Erforderliche Zeit zur Erreichung des Endzustandes				
10	11		12				13	14	
Nr. 10 2—3 μ Nr. 5 2—10 μ	0	0	30		h	min	s	Nr. 10 1,5 Nr. 5 1,0	starres Schichtengitter
.	0,3		45				20	1,2	
.	1		80				20		
{ 60 % 200—20 μ 35 % 20—2 μ 5 % < 2 μ	1,5		80				20		
	3		115				30	starres Schichtengitter	
	Zettlitz	Ca	Zettlitz		Zettlitz		Spergau		z = 2,2 (Zettlitz)
	1	Spergau	40		4		30		
	3	0,5	50		5		120		
	4,5	1,5	62		8		180	eindimensional quellbares Schichtengitter	
{ 30 % 2—20 μ 70 % < 2 μ	9	7	90	70	30		900		
.	10		45				2		
.	30		70				12		
100 % < 2 μ	50		90				30	eindimensional quellbares Schichtengitter	
	100		300				60		
		Na							
	7	3	75		1		20		
	21	9	160		4			eindimensional quellbares Schichtengitter	
	35	15	260		6				
100 % < 2 μ	70	30	700		8				
							16		

natürlichen Tonböden.

Plastizitätszahl	Reibungsbeiwert	Verdichtungsziffer α ($\Delta p = 1,5 - 2,0$)	Durchlässigkeit k_0 bei 1,50 kg/cm ²	Röntgenanalyse		S-Wert Macq je 100 g	Werte im Enslin-Gerät		Lfd. Nr.
				angeliefert K = Kaolin, Q = Quarz, M = Montmorillonit, GIT = Glimmerton	zentrifugiert		aufgenommene Wassermenge im Endzustand in % der Trockensubstanz	erforderliche Zeit zur Erreichung des Endzustandes (min)	
gewicht		cm ² · kg ⁻¹	cm/min	16	17	18	19	20	
51,0	0,33	0,072	1,2 · 10 ⁻⁶	K, M, Q viel	K, M, Q	28	80	5	1
42,1	0,145	0,078	3,6 · 10 ⁻⁷	K, M, Q wenig	K, M, Q	15	108	40	2
12,4	0,50	0,042	2,7 · 10 ⁻⁶	viel Q, mittel	K, K + GIT	15	68	2	3
	0,39	0,056	5,5 · 10 ⁻⁷	Grober Q, Kalksp.	Q, K, Kalksp. (GIT ?)	10	70	2	4
42,6	0,30	0,090	2,8 · 10 ⁻⁷	Q fein, K, GIT	G, K, GIT	} zu wenig Substanz	70	7	5
20,5	0,575	0,048	3,9 · 10 ⁻⁶	Q grob, viel (?)	Q, Tonmin. nicht erkennbar		60	5	6
40,7	0,27	0,128	1,6 · 10 ⁻⁷	Q fein, wenig K	Q Spur K	} zu wenig Substanz	110	5	7
8,6	0,63	0,070	1,3 · 10 ⁻⁶	viel Q fein, K + GIT	Q, K, GIT		70	7	8
34,7	0,23	0,078	1,3 · 10 ⁻⁷	Q grob, Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ , GIT	} zu wenig Substanz	80	5	9
37,0	0,42	0,098	6,5 · 10 ⁻⁷	wenig grober Q	GIT K (?)		110	8	10
16,2	0,36	0,020	5,2 · 10 ⁻⁶	grober Q	Q, M, GIT (?)		57	1,5	11
18,7	0,31	0,024	3,5 · 10 ⁻⁶	grober Q	Q, M, K		47	1	12
54,5	0,35	0,128	1,6 · 10 ⁻⁷	M wenig Q	M Spur Q	26 davon 5 Na	150	60	13

a) Wasseraufnahmevermögen und Ansaugeschwindigkeit.

Die im Endzustand aufgenommenen Wassermengen (in Prozent der Trockensubstanz ausgedrückt) sind im folgenden immer mit w_∞ bezeichnet. Bei den nicht quellenden Stoffen, wie Quarz, ist w_∞ klein. Es besteht eine Abhängigkeit von der Korngröße, weil das Lumen der Kapillaren mit steigender

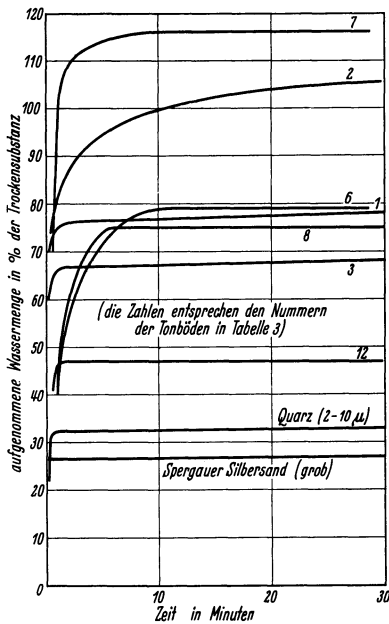


Abb. 9. Verlauf der Wasseraufnahme bei natürlichen Tonböden und bei nicht quellenden Mineralen.

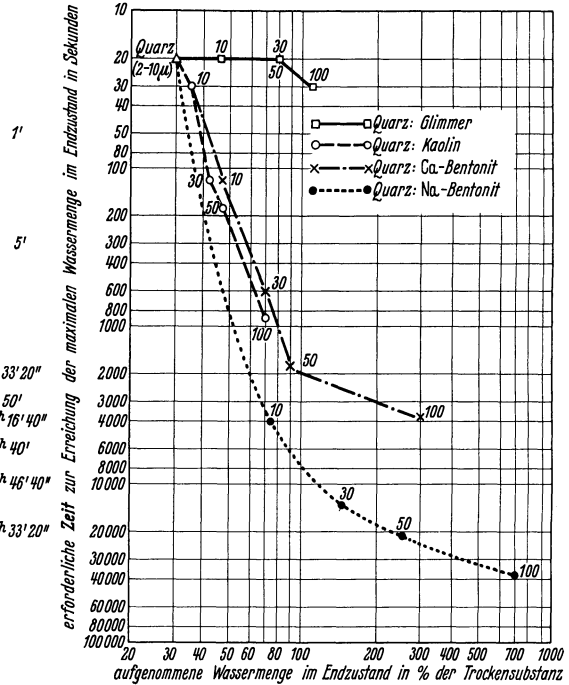


Abb. 10. Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens und der Ansaugeschwindigkeit von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge.

Feinheit und damit die Wasserdurchlässigkeit kleiner wird. Gleichzeitig verlängert sich die Zeit bis zur Erreichung des Sättigungszustandes mit steigender Feinheit. Wie Abb. 9 zeigt, ist jedoch der Unterschied der Wasserbindung zwischen verhältnismäßig grobem Sand und Quarzmehl von 2–10 μ auffallend gering und absolut niedrig.

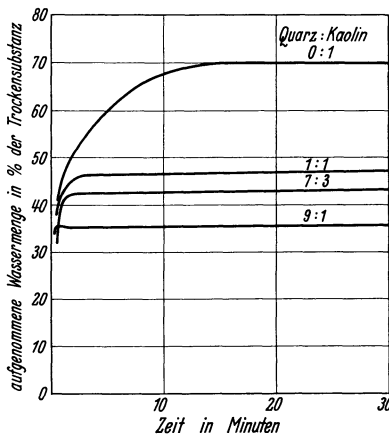


Abb. 11. Verlauf der Wasseraufnahme bei Quarz: Kaolin-Gemengen.

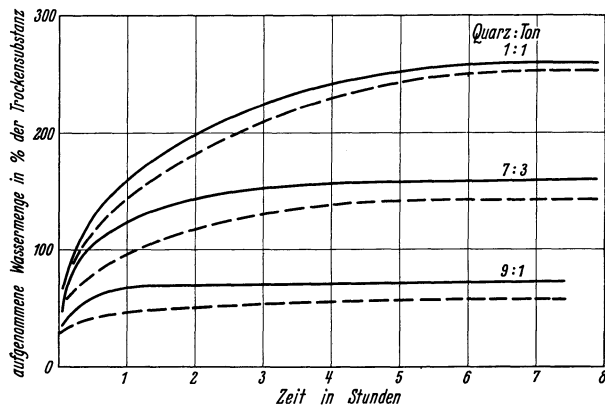


Abb. 12. Verlauf der Wasseraufnahme bei Gemengen von Na-Bentonit mit Quarzmehl Nr. 5 (—) und Na-Bentonit mit Spergauer Silbersand (---).

Bei den Tonen, Kaolinit und Bentonit, können zwei gleichzeitig nebeneinander verlaufende Arten der Wasseraufnahme unterschieden werden, und zwar die durch reine Benetzung der Oberfläche vor sich gehende Wasseraufnahme und die durch Hydratation der adsorbierten Ionen erfolgende Wasseraufnahme als Schwarmionenwasser. Infolge der geringen Anzahl der Schwarmionen bei den Kaoliniten ist diese Menge auch noch gering im Gegensatz zu den Bentoniten.

Zu den beiden Arten der Wasseraufnahme der Kaolinittone tritt bei den Bentoniten noch die innerkristalline Wasseraufnahme hinzu, d. h. ein Teil des gesamten Wassers wird durch die eindimensionale

Quellung im Kristall stärker gebunden. Außerdem ist der *S*-Wert 20mal so groß wie bei den Kaolinit-Tonen, also auch die Schwarmionenwassermenge größer.

Die Zeit bis zur Sättigung ist von der Art der adsorbierten Kationen abhängig und erreicht beim Natrium-Bentonit recht erhebliche Werte bis zu 10 h (vgl. Abb. 10). Die Ursache der langsamen Ein-

Zahlentafel 4. *S*-Wert, Feinstruktur, aufgenommene Wassermenge und Ansaugeschwindigkeit von Modellsubstanzen.

	Aufgenommene Wassermenge in % der Trockensubstanz	Ungefähre Zeit bis zur Erreichung von w_{∞}	Röntgenbefund	<i>S</i> -Wert
Na-Bentonit	700	10 h	eindimensionale Quellung	100 davon 30 Na
Ca-Bentonit	300	40 min	Montmorillonitgitter	100 Ca
Zettlitzer Kaolin	90	20 min	Kaolinitgitter	9
Glimmer	125	25 s	nichtquellendes Schichtengitter	3
Fe ₂ O ₃	40	unter 1 s	—	—
Quarzmehl Nr. 10	29	23 s	—	—
Quarzmehl Nr. 5	32	20 s	—	—
Spergauer Silbersand	27	unter 10 s	—	—

stellung des Gleichgewichtes der Wasseraufnahme beim Natrium-Bentonit ist nicht die schwere Benetzbarkeit, sondern, wie bereits in Abb. 3 gezeigt wurde, die geringe Wasserdurchlässigkeit des gequollenen Bentonits. Die endgültig aufgenommene Wassermenge ist von der Art der Kationen abhängig und beim Natrium viel größer als beim Kalzium.

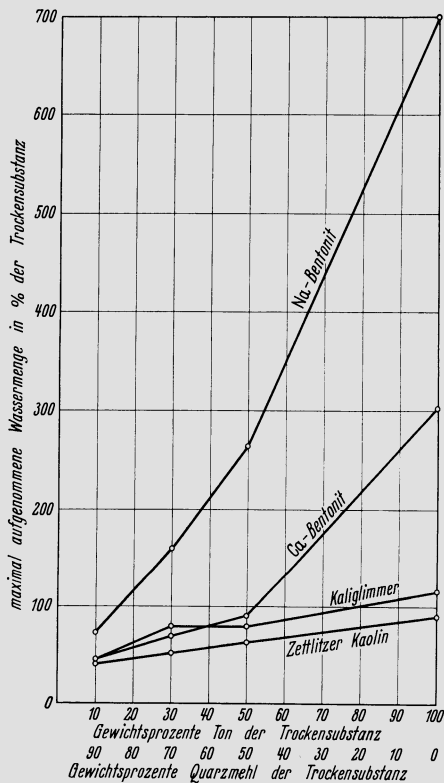


Abb. 13. Abhängigkeit der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge.

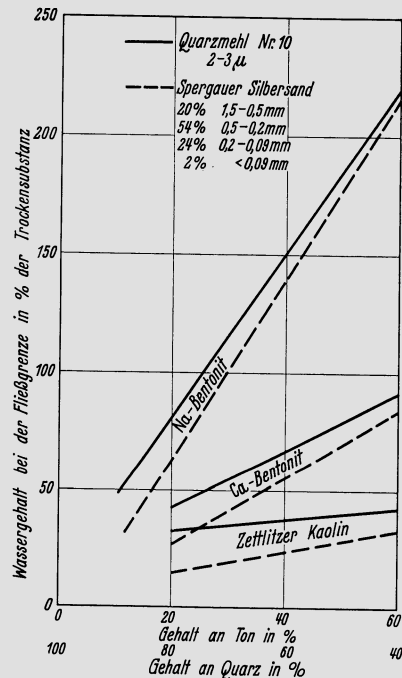


Abb. 14. Abhängigkeit der Fließgrenze vom Mischungsverhältnis und der Korngröße des Quarzes.

Bei dem untersuchten Glimmer liegen etwas anomale Verhältnisse vor, weil wegen der blättrigen Form der verhältnismäßig groben Glimmerteilchen, die bei unregelmäßiger Lagerung große Hohlräume freilassen, in den Porenwinkeln viel Wasser aufgenommen wird. Zahlentafel 4 zeigt einige erhaltene Werte dieser Modellsubstanzen.

Die künstlichen Ton-Sandmischungen, die für die bodenmechanische Untersuchung benutzt wurden, wurden in gleicher Weise geprüft. Die Ergebnisse zeigen die Abb. 11, 12 und 13.

Abb. 13 zeigt die Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens von der Natur des Tonminerals und der Menge des beigemischten Quarzmehls für die verschiedenen Tonminerale und Glimmer.

Für die gleichen Tone wurde in Abb. 14 nochmals die Fließgrenze im Casagrande-Gerät ermittelt, und zwar mit Mischungen von feinstem Quarzmehl 2—3 μ und ziemlich grobem Spergauer Silbersand. Der Zusatz der nichtquellenden Auflockerungsmittel wirkt sich in doppelter Weise aus:

1. In allen Fällen tritt eine Beschleunigung der Wasseraufnahme durch den Quarzzusatz auf, und zwar verläuft die Wasseraufnahme mit steigendem Gehalt an nichtquellendem Quarz immer schneller. Diese Beschleunigung beruht auf der Vergrößerung der Durchlässigkeit des gequollenen Tones und ist demnach bei Zusatz von größerem Sand stärker als bei Quarzmehlen.

2. Die im Endzustand aufgenommenen Wasserwerte w_∞ liegen aber in allen Fällen bei gleichem Mischungsverhältnis Quarz : Ton beim Quarzmehl höher als bei entsprechenden Silbersandmischungen. Diese Änderung von w_∞ läßt auf eine Vermehrung der Poren schließen. Deutlich zeigen sich besonders auf Abb. 10 die Unterschiede zwischen den einzelnen Tonarten, die durch das Kristallgitter und die Art und Menge der adsorbierten Ionen bedingt sind. Die relativ großen Werte für w_∞ beim Glimmer erklären sich aus der Blättchenstruktur der verhältnismäßig groben Teilchen, die bei ungeordneter Lagerung die Porenbildung begünstigen. Damit hängt es wohl auch zusammen, daß die Werte für w_∞ bei den Mischungen Quarz : Glimmer 7 : 3 und 1 : 1 nahezu gleich sind. Quarzmehlzusatz hebt diese sperrige Lagerung auf, jedoch erst bei einem Mischungsverhältnis Quarz : Glimmer 9 : 1 wirkt sich der kleine Wert von w_∞ bei Quarzmehl aus.

Abb. 9 zeigt den Verlauf der Wasseraufnahmekurven der untersuchten Böden. Diese sind gemäß Zahlentafel 3 Gemische der Tonminerale Montmorillonit und Kaolinit bzw. Glimmertone mit nichtquellenden Substanzen (feiner und grober Quarz). Die erreichten Endwerte liegen zwischen den Grenzwerten der künstlichen Mischungen.

b) Benetzungswärme der reinen Modellstoffe.

Die Benetzungswärme wird heute noch vielfach in der Literatur als Relativmaß der Oberfläche der Tonteilchen benutzt. Die in der Literatur veröffentlichten Werte widersprechen sich, so daß eine Nachprüfung in der in Teil III beschriebenen Apparatur wünschenswert erschien. Gaudechon¹ zitiert nach [9], gibt die Benetzungswärme gegen Wasser für Ton (ohne besondere Angabe) und für Quarz

Zahlentafel 5. Benetzungswärmen von Modellsubstanzen.

Substanz	Benetzungswärme in cal/g		S-Wert in Milli-äquivalent je 100 g Ton	Maximal aufgenommene H ₂ O-Menge im Enslin-Gerät in % der Trockensubstanz w_∞
	eigene Messung	Werte von Alten und Kurmis		
Na-Bentonit	16,1	18,0	100, davon 30 Na	700
Ca-Bentonit	22,0	20,9	100 Ca	300
Zettlitzer Kaolin . .	2,2		9	90
Spargauer Silbersand	0		0	27
Quarzmehl Nr. 5 . . .	1,0		0	29
Quarzmehl Nr. 10 . .	1,5		0	32
Glimmer	1,2		2—3	125
Fe ₂ O ₃ aus Oxalat . .	1,0		0	40
CaCO ₃ gefällt	0,7		0	35

(ohne besondere Angabe der Feinheit) mit 15 cal/g an. Diese Werte sind von vornherein unwahrscheinlich. Mit der Anwendung der Benetzungswärmen von Böden hat sich H. Janert besonders befaßt. Aus seinen Arbeiten geht hervor, daß die Benetzungswärmen von Böden zwischen 5 und 10 cal/g liegen, während Sandböden höchstens Benetzungswärmen von 1 aufweisen. F. Alten und B. Kurmis haben die Benetzungswärmen von Montmorillonittonen, die mit Natrium, Kalium, Magnesium, Kalzium belegt wurden, ermittelt und fanden für den reinen Ca-Ton den hohen Wert von 20,9 cal/g. Bei der möglichen Bedeutung dieser Eigenschaft für die Charakterisierung von Tonen schien eine Kontrolle der Werte wünschenswert.

Die für die verschiedenen Bodenproben und Modellsubstanzen gefundenen Werte sind in Zahlentafel 5 zusammengestellt.

¹ Gaudechon, C. R. Acad. Sci., Paris Bd. 157 (1913) S. 209.

Unsere Werte bestätigten vollkommen diejenigen von Alten, Kurmis und Janert. Es läßt sich eine Einteilung aufstellen, die der Reihenfolge des Wasseraufnahmevermögens entspricht.

Die Benetzungswärmen sind klein beim Quarz und auch bei den Kaolinen und groß bei den Bentoniten. Die Benetzungswärme ist nur bei den nichtquellenden Stoffen, wie Quarz, von der Oberfläche und damit von der Korngröße abhängig. Beim groben Spergauer Silbersand konnte keine Benetzungswärme gefunden werden, während die geringe Benetzungswärme beim Quarzmehl Nr. 5 2—10 μ sich noch steigert bis zum Quarzmehl Nr. 10 2—3 μ . Bei den Tonen ist eine deutliche Abhängigkeit von der Art und Menge der adsorbierten Ionen vorhanden. Da diese Ionen Wasser binden, würde die Benetzungswärme ein gewisses Maß der Hydratationsenergie sein, läßt aber keinerlei Rückschlüsse auf vergleichende Oberflächengröße oder Feinheit zu. Da die gefundenen, zum Teil recht hohen Benetzungswärmen bei Bentoniten sich nur auf trockenen Ton beziehen, der im Boden nicht vorkommt, so spielt für künftige bodenphysikalische Untersuchungen die Benetzungswärme überhaupt keine Rolle.

c) Beziehung zwischen Teilchengröße und Dicke der Wasserhüllen der Tonteilchen.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse haben eine weitgehende Gleichläufigkeit der kolloidchemischen und bodenphysikalischen Kennziffern bei den verschiedenen reinen Tonmineralien, den künstlich hergestellten Quarz-Tonmischungen und in gewissem Sinne auch bei den natürlichen bindigen Böden ergeben. Ganz offensichtlich sind die bodenphysikalischen Kennziffern weitgehend abhängig von dem Wasserhaushalt der Tonmineralien in bindigen Böden. Unter Wasserhaushalt wird dabei verstanden:

1. das Wasseraufnahmevermögen,
2. die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme,
3. die Dicke der Wasserhüllen, die sich im äußersten Fall um die Tonteilchen bilden können,
4. die Druckverhältnisse in diesen Wasserhüllen und ihre Abhängigkeit von der Entfernung vom „festen Teilchen“;
5. die Abhängigkeit von 1.—4. vom Kristallgitter und der chemischen Natur der hydratisierten Schwarmionen der Tonminerale.

Nach den neuesten röntgenografischen Versuchen von U. Hofmann und seinen Mitarbeitern (1933) kann mit einer gewissen

Sicherheit angenommen werden, daß die Dicke der Tonblättchen bei den plastischen Kaolinen, aber auch bei den Bentoniten, bei etwa 0,02 μ liegt. Über die Längen- und Breitenausdehnung der Blättchen ist zur Zeit Sichereres nicht bekannt. So viel weiß man aber, daß die Bezeichnung „kleiner als 2 μ “ noch sehr grob ist und man für größere Anteile der Mengen < 2 μ wahrscheinlich nur mit Längs- und Quermaßen von 0,1—0,2 μ im Durchschnitt rechnen können wird.

Über die Dicke der Wasserhüllen ist folgendes bekannt:

Nach H. Freundlich [10] ergibt sich bei einer gerade noch festen Suspension von amerikanischem Na-Bentonit (also rund 700% H₂O-Zusatz), bei der man die Größe und damit das eigentliche Volumen der Teilchen abschätzen kann, ein mittlerer Abstand der Teilchen im Gel von etwa 120 $\mu\mu$.

Ausgehend von diesen Ergebnissen, ist in Abb. 15 versucht worden, die gegenseitigen Größenverhältnisse der Tonmineralien und Quarzbeimengungen von etwa 1 μ , welche im allgemeinen etwa die untere Grenze der Quarzaufteilung darstellen dürfte, sowie die Dicke der sie umgebenden Wasserhüllen vergleichbar in einer Ebene darzustellen. Die Tonteilchen sind als Striche gezeichnet von einer Dicke von 0,02 $\mu \cdot 10^5$ und einer Länge von 0,1 $\mu \cdot 10^5$. Die Wasserhüllen sind kreisrund bzw. als Ellipsen gezeichnet. In der Bildebene ist beim Natrium-Bentonit gemäß dem Versuch im Enslin-Gerät die 7fache

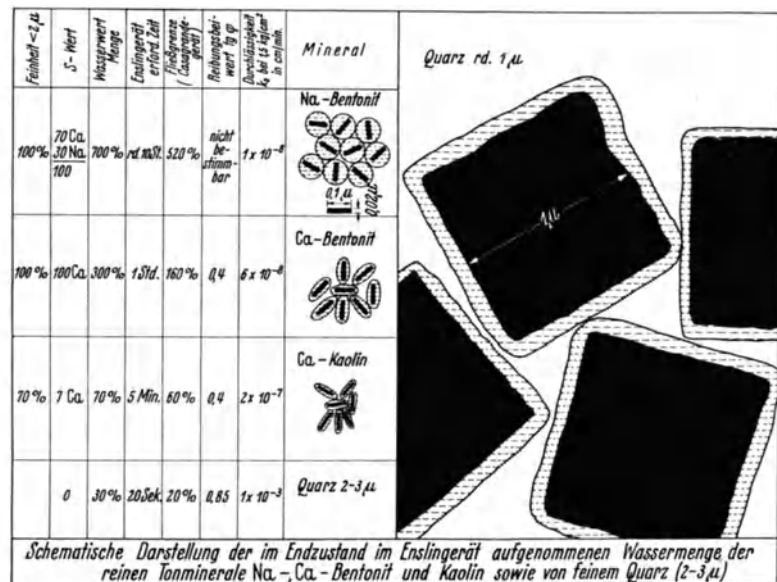


Abb. 15.
Schematische Darstellung der im Endzustand im Enslin-Gerät aufgenommenen Wassermenge der reinen Tonminerale Na-, Ca-Bentonit und Kaolin sowie von feinem Quarz (2-3 μ).

Wassermenge, beim Kalzium-Bentonit die 3fache Menge, beim Kaolin die 0,7fache Menge angedeutet, feinsten Quarz von 1μ nimmt nur $\sim 0,3$ seines Rauminhaltes an Wasser auf.

Diese Darstellung der Größenverhältnisse zeigt einwandfrei, daß sehr geringe Mengen Natrium-Bentonit mit Quarz gemischt schon die möglichen Poren zwischen den Quarzteilen schließen müssen, wodurch die außerordentlich geringe Durchlässigkeit beim Ödometer-Versuch und die sehr lange Zeit zur Erreichung des Endwerts der Wasserbindung im Enslin-Gerät erklärt sein dürfte. Um dieselbe Durchlässigkeit zu erreichen, müßte z. B. die 5fache Menge Kaolin beigemischt werden.

Der Stand unserer Kenntnisse von den Drücken, unter denen diese Wasserhüllen stehen, ist folgender:

Die äußeren Sphären der Wasserhüllen stehen unter einem minimalen Druck, sie lassen sich deshalb, wie auch unsere Kompressionsversuche gezeigt haben, sehr leicht abpressen. Wenn dagegen $\frac{3}{4}$ und mehr des im Enslin-Gerät bestimmten Wassers ausgepreßt oder bei anderer Dampfspannung der Umgebung verdampft wird, dann stehen die Restwassermengen etwa unterhalb den der Hygroskopizität entsprechenden Wassermengen unter sehr hohem Druck. Die Wasserhüllen, die bei der Lagerung über 10%iger Schwefelsäure (= Hygroskopizität) noch an den Tonteilchen haften, stehen unter Druck von 50 at. Bemerkenswert ist es in diesem Zusammenhang, daß Terzaghi bei seinen Ödometerversuchen den Druck der quellenden Gelatine bis zu 50 at hat messen können. Die Druckspannungen, unter denen die Wasserhüllen stehen, nehmen bei weiterer Näherung an der Oberfläche des festen Teilchens nach einer Potentialformel noch ganz erheblich zu [11, 12].

Da jedoch mit Drücken über 6 kg/cm^2 im Grundbau nur in den seltensten Fällen zu rechnen ist, sind die Drücke innerhalb der nur lose gebundenen Wasserhüllen zueinander von ausschlaggebender Bedeutung. Unsere Untersuchungen haben diese bekannten Ergebnisse bestätigt. Bei gleichem Kristallgitter des Tonminerals sind die entfernter liegenden Wasserhüllen loser an das Tonteilchen angelagert und gleichzeitig ist die Wasserhülle größer, wenn Natrium im Schwarmwasser vorhanden ist. Die Wasserhüllen sind dagegen kleiner, aber fester gebunden, wenn Kalzium oder dreiwertige Kationen vorhanden sind.

Über den Einfluß verschieden hoher Drücke in den Zonen der Wasserhüllen auf die Herabsetzung der Gefriertemperatur spricht Beskow [13] ausführlich (s. auch S. 23).

d) Beziehungen zwischen den bodenphysikalischen Kennziffern.

In den Abb. 16, 17, 18 sind die gefundenen und in Zahlentafel 2 zusammengestellten bodenphysikalischen Kennziffern graphisch aufgetragen. Es ergibt sich, wenn man von einzelnen unvermeidlichen Streuungen absieht, eine klare Beziehung zwischen den Werten der einzelnen Mischungsverhältnisse eines Gemenges, die sich durch eine stetige Kurve darstellen läßt. Auch in der Reihenfolge der Mineralgemenge ergibt sich eine Gesetzmäßigkeit, die sich über die einzelnen Untersuchungsverfahren erstreckt.

Bei der Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes (Abb. 16) vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals ist besonders auffallend die starke Abnahme von $\text{tg } \varphi$ bei nur 10% Zusatz von Na-Bentonit. Es wird durch diesen geringen Zusatz von Na-Bentonit die innere Reibung so stark herabgesetzt, daß man etwa 50% Ca-Bentonit hinzusetzen oder reinen Kaolin verwenden müßte, um den Reibungsbeiwert auf dieselbe Größenordnung zu erniedrigen. Der Wert für reinen Ca-Bentonit liegt bei 0,4, ein Wert, der sehr überrascht, wenn man bedenkt, daß nach Hvorslev [8] bei der Art der Durchführung dieser Versuche sich eher ein zu niedriger als ein offensichtlich zu hoher Reibungsbeiwert ergeben müßte. Eine Erklärung hierfür kann vielleicht darin zu suchen sein, daß von der Wasserhülle der einzelnen Tonpartikelchen unter der Normallast ein großer Teil ausgequetscht worden ist und die Restwasserhüllen infolge der ausgeübten Bindekräfte nicht mehr die Viskosität von Wasser aufweisen und deshalb nicht mehr als Schmierfilm angesehen werden können. Prof. Dr. A. Casagrande wies auf die Möglichkeit hin, daß die Ca-Bentonit-Kurve zwischen 50 und 100% Tongehalt ein Minimum besitzt. Die Kurve für die Glimmergemenge liegt verhältnismäßig hoch, da der Glimmer nicht fein genug gemahlen war (5% $< 2\mu$; 35% $20-2\mu$; 60% $200-20\mu$), so daß auch ein Vergleich mit glimmerhaltigen, natürlichen Böden wenig Sinn hat. Der Bereich der Reibungsbeiwerte der untersuchten natürlichen Böden ist durch Schraffur angedeutet.

In der Abb. 17 der Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes k_0 von der Art und Zusammensetzung des Mineralgemenges ist die gleiche Gesetzmäßigkeit erkennbar.

Für die Abnahme der Durchlässigkeit mit der Abnahme des Quarzgehaltes gilt als Erklärung, daß durch Hinzufügen feinerer Teile zu dem verhältnismäßig groben Quarzmehl das Porenvolumen verringert wird, die Poren verengert, teilweise verstopft werden und damit das durchsickernde Wasser einen größeren Widerstand zu überwinden hat, was sich in der Abnahme des Durchlässigkeitsbeiwertes k_0 ausdrückt. Die Abnahme der Durchlässigkeit vom Kaolin- zum Bentonitgemenge läßt sich dagegen mit dieser Erklärung allein nicht begründen, da die Korngrößenunterschiede innerhalb dieser Tonminerale nicht mehr

nennenswert sind (s. S. 17). Hier darf wieder die Tatsache der verschiedenen Wasserbindung herangezogen werden. Die Bindekräfte der Tonpartikelchen auf die Wasserhüllen bewirken, daß die Viskosität des Wassers sich ändert, das Wasser zähflüssiger wird, der hydraulische Widerstand sich vergrößert und infolgedessen die Filtergeschwindigkeit sinkt. Die Unterschiede von k_0 (cm/min) erreichen nach den Untersuchungen mehrere Potenzen von 10 : reines Quarzmehl = $1 \cdot 10^{-3}$, reiner Na-Bentonit = $\sim 1 \cdot 10^{-8}$ (dieser letztere Wert wurde freundlicherweise von Herrn Dr. Bernatzik, Paris, mitgeteilt, der ihn auf indirektem Wege aus der Zeitsetzungskurve errechnete, eine gute Bestätigung unserer auf anderem Wege ermittelten Werte). Die Durchlässigkeit der Quarz-Glimmer-Gemenge ändert sich mit steigendem Glimmerzusatz nur wenig, das Minimum von k_0 liegt bei 30% Glimmergehalt. Vermutlich ist etwa bei

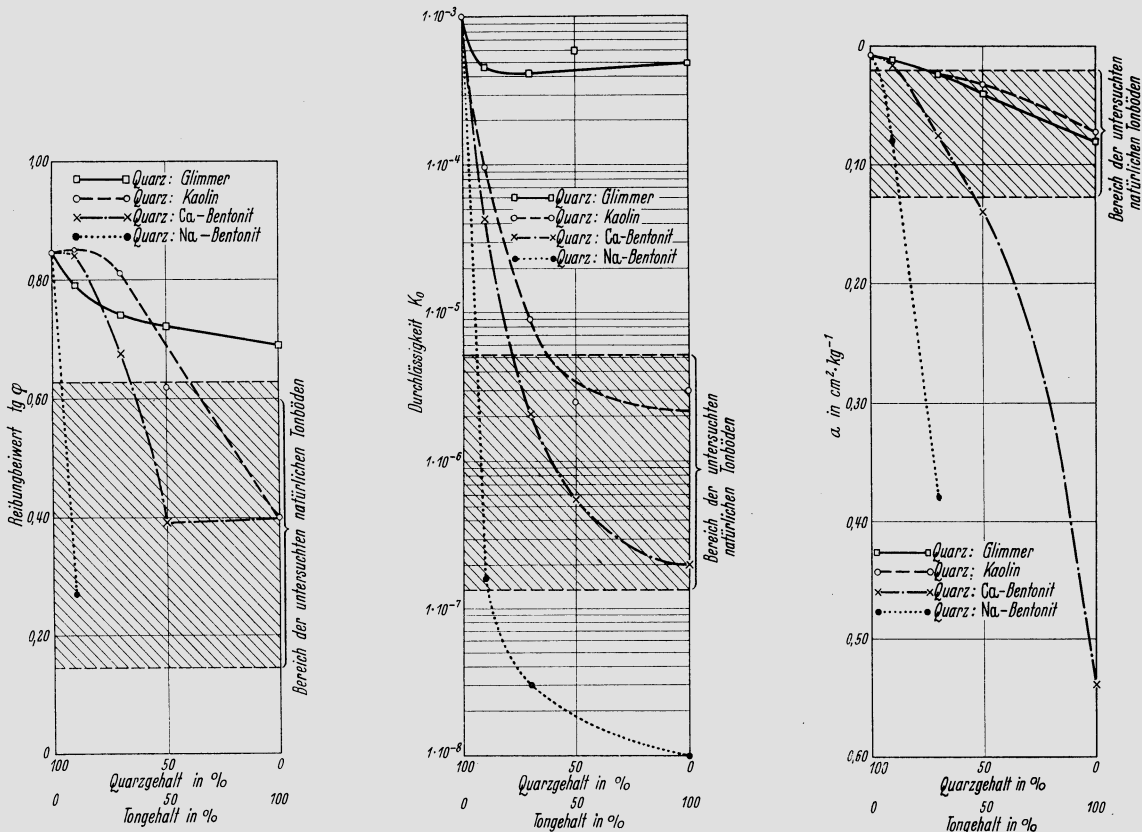


Abb. 16. Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

Abb. 17. Abhängigkeit der Durchlässigkeit k_0 (gemessen bei $1,5 \text{ kg/cm}^2$ Auflast) vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

Abb. 18. Abhängigkeit der Verdichtungsziffer a (gemessen bei einer Laststeigerung von $1,5$ auf $2,0 \text{ kg/cm}^2$) vom Quarzgehalt und der Natur des Tonminerals.

dieser Verteilung von Quarz und Glimmer das Porenminimum erreicht. Auch hier wieder ist es durchaus möglich, daß die Kurven, anders als dargestellt, zwischen 50 und 100% Tongehalt ein Minimum besitzen, um dann nach 100% zu wieder anzusteigen. Die Punkte der Kurve Quarz-Kaolin scheinen diese Vermutung zu stützen.

Die wenigsten Streuungen lassen sich in dem Diagramm der Verdichtungsziffer a (Abb. 18) feststellen. Die Verdichtungsziffer $a = -\frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p}$ gibt ein Maß für die Setzung. Da die elastische Zusammendrückung der festen Teilchen im Verhältnis zur Gesamtsetzung nur gering ist und auch ein seitliches Ausweichen des Bodens verhindert ist, muß also die Setzung durch Auspressen von Porenwasser vor sich gehen. Je mehr Wasser ein Mineralgemenge angelagert hat, um so stärker muß mithin bei gleicher Last die Setzung sein und um so größer damit auch der absolute Wert von a . Die Abb. 18 bestätigt diese Schlußfolgerung. In der Abb. 19 sind für reines Quarzmehl Nr. 5 und die 7:3-Gemenge mit Kaolin, Ca- und Na-Bentonit die Druck-Porenziffer-Diagramme aufgetragen, entgegen der üblichen Darstellung hier mit der Porenziffer ε als Abszisse und Belastung p als Ordinate. Die verschiedenen Steilheiten zeigen die Unterschiede der Setzungen; bei Quarzmehl läuft die Belastungskurve fast senkrecht, d. h., es versteift sich sofort bei einer geringen Belastung das Kornskelett in sich, die Wasserhüllen sind so dünn, daß praktisch kein Wasser ausgequetscht wird. Da die Porenziffer als Verhältnis der Hohlräume (hier mit Wasser gesättigt) zur konzentriert gedachten Festsubstanz aber auch ein Maß für den Wassergehalt ist, so geht aus diesem Diagramm auch eindeutig die verschiedene Wasserbindung der

einzelnen Gemenge hervor. Ein beliebiger horizontaler Schnitt gibt ein Bild darüber, welche Wassermengen bei dem entsprechenden Druck von den einzelnen Gemengen festgehalten werden. Der reine Quarz fällt aus der Reihe heraus: die Poren sind hier nicht durch irgendwie gebundenes Wasser ausgefüllt, sondern durch sog. „Porenwinkelwasser“, das ist jenes Porenwasser, das die Hohlräume zwischen den einzelnen Festteilchen ausfüllt, und, da die Festteile sich aneinander fest abstützen, durch keine Belastung ausgedrückt werden kann.

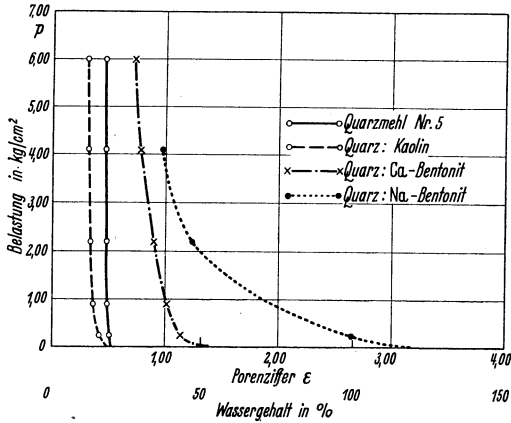


Abb. 19. Druckporenzifferdiagramme der 7:3-Gemenge.

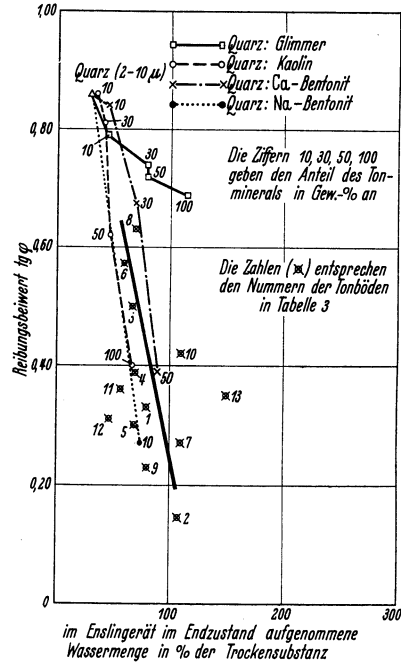


Abb. 20. Abhängigkeit des Reibungsbeiwertes von der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge bei den Gemengen und den natürlichen Tonböden.

Wenn auch die anderen Mischungen sicherlich noch Porenwinkelwasser enthalten, so doch sicher nicht in dem Maße, wie es bei dem Quarzmehl der Fall ist.

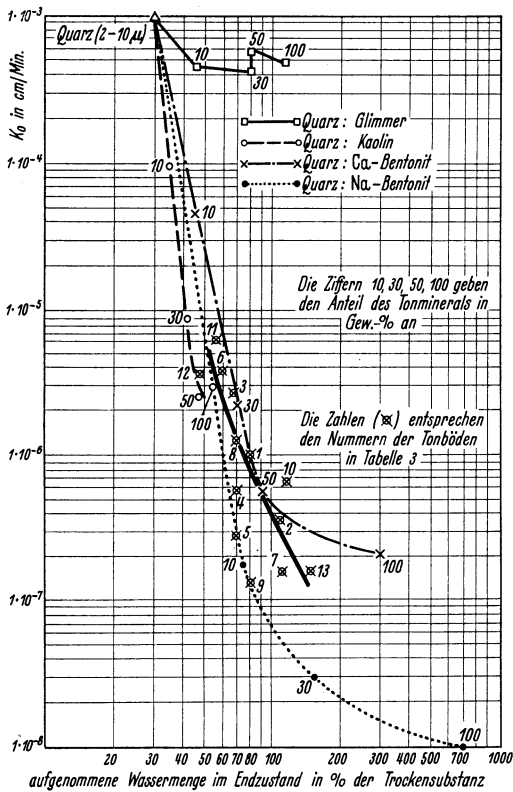


Abb. 21. Abhängigkeit der Durchlässigkeit k_0 (gemessen bei 1,5 kg/cm² Auflast) von der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge bei den Gemengen und den natürlichen Tonböden.

In Abb. 20, 21, 22 sind diese drei bodenphysikalischen Kennziffern in Abhängigkeit von der im Enslin-Gerät im Endzustand aufgenommenen Wassermenge aufgetragen; die Lage der natür-

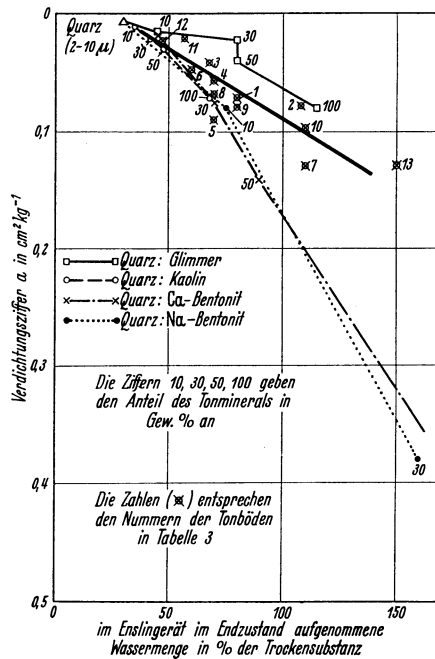


Abb. 22. Abhängigkeit der Verdichtungsziffer α (gemessen bei einer Laststeigerung von 1,5 auf 2,0 kg/cm²) von der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge bei den Gemengen und den natürlichen Tonböden.

lichen Tonböden ist durch Kreiskreuze an den jeweiligen Stellen des Achsensystems eingezeichnet. Es zeigt sich, daß sich die natürlichen Böden gut in das System der „künstlichen Böden“ einordnen, so daß die

Berechtigung der Modellversuche an Mineralgemengen bewiesen sein dürfte. Wenn man von den zu erwartenden, unvermeidlichen Streuungen absieht, gruppieren sich die natürlichen Böden auch recht gut um die dick ausgezogene Linie. Es besteht demnach ein Zusammenhang zwischen den bodenphysikalischen Kennziffern und der im Enslin-Gerät aufgenommenen Wassermenge, so daß diese Einrichtung in die Reihe der bodenphysikalischen Versuchsgeräte aufgenommen zu werden verdient.

Auffällig ist in Abb. 20 die starke Streuung des Hemmoor-Tones (13). Aus Tabelle 3 geht jedoch hervor, daß es sich hier um einen besonders Na-Bentonit-haltigen Boden handelt. Es handelt sich offensichtlich um dieselbe Erscheinung, wie auf S. 20 für reinen Ca-Bentonit besprochen wurde.

V. Folgerungen.

Die Ursachen für das verschiedene Verhalten der Böden wurden von den Forschern auf die verschiedenste Weise gedeutet: Während ursprünglich eine „kolloidale Substanz“ im Ton als Ursache der grundlegend anderen Eigenschaften der Tone (innere Reibung, Kohäsion, Plastizität) gegenüber den nichtbindigen Bodenarten angesehen wurde, stellte Atterberg [14] die Behauptung auf, man könne jedem Boden durch entsprechendes Zermahlen die Eigenschaften von Tonen geben. Diese Deutung, daß alle bodenphysikalischen Eigenschaften durch die Korngröße und -form verursacht werden, ist, wie heute feststeht, in dieser weitgehenden Fassung nicht mehr richtig. In einer älteren Theorie (1921) führt Terzaghi die Verschiedenheit des Verhaltens auf die Schuppenform der Tonteilchen zurück; später führte er als einen weiteren Ursprung der Eigenschaften der bindigen Böden das molekular gebundene Porenwasser an, das je nach dem Abstand von der Mizelle verschieden stark gebunden ist, und dicht an der Oberfläche des festen Bodenteilchens eine Dichte aufweist, die dem Zustand fester Körper nahekommt [15]. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, daß neben den physikalischen Faktoren auch noch chemische und kolloidchemische Ursachen das Verhalten der Bodenarten stark beeinflussen. Einen der ersten Versuche in dieser Richtung machte Kirchhoff [16], der einen Zusammenhang gefunden haben wollte zwischen der Rutschneigung einerseits und der Feinheit der Böden und ihrem CaO- und MgO-Gehalt andererseits. Allerdings hat sich dieser Zusammenhang im Laufe der Zeit nicht nachweisen lassen. Die neuesten Arbeiten von Endell und seinen Mitarbeitern [17, 18] haben nun festgestellt, daß eine bestimmte Gruppe von Tonmineralien eine besonders große Wasserbindefähigkeit besitzt und sogar Wassermoleküle innerhalb des Kristallgitters aufnehmen kann. Diese kurze Darstellung der verschiedenen Deutungen des Toncharakters soll zeigen, wo wir heute in der Erklärung der Ursachen des bodenmechanischen Verhaltens der verschiedenen Bodenarten stehen.

Die im Rahmen dieser Gemeinschaftsarbeit durchgeführten Versuche zeigen nun deutlich, daß der Quarzgehalt einen starken Einfluß auf die bodenphysikalischen Eigenschaften ausübt. Reibungsbeiwert (Abb. 16) und Durchlässigkeit (Abb. 17) nehmen mit geringer werdendem Quarzgehalt ab, die Verdichtungsziffer (Abb. 18) nimmt dagegen zu, ebenso verschiebt sich Fließgrenze und Ausrollgrenze (Zahlentafel 2) nach oben. Das heißt also, daß z. B. bei dem Problem der Setzung ein höherer Quarzgehalt eine geringere Verdichtbarkeit und weniger Setzungen bedingt, weiter aber auch einen schnelleren Verlauf der Setzung wegen der größeren Durchlässigkeit erwarten läßt. Für die einfachen Unterscheidungen nach der Korngröße: Sand, Schluff, Ton war diese Erscheinung seit den Arbeiten Terzaghis [19] schon längere Zeit bekannt; die vorliegende Arbeit beweist jedoch, daß auch innerhalb der Tonminerale noch eine klare Ordnung herrscht, derart, daß der Na-Bentonit die größte Verdichtungsziffer, die geringste Durchlässigkeit und den niedrigsten Reibungsbeiwert aufweist, der Kaolin dagegen den Eigenschaften des Quarzmehles am nächsten liegt. Die Quarz-Glimmer-Gemenge lassen sich nicht so gut eingliedern; der Grund mag vielleicht darin zu suchen sein, daß die Glimmerteilchen nicht fein genug gemahlen waren und die Versuchsergebnisse durch die rein zufällige Lagerung der verhältnismäßig groben Glimmerteilchen stark beeinflußt werden. Die mit dem Enslin-Gerät aufgenommenen Kurven der Wasserbindung zeigen die gleiche Einordnung vom Quarzmehl über Kaolin, Ca-Bentonit zum Na-Bentonit (Abb. 10, 11, 13).

Aus diesen Erkenntnissen über den Einfluß der Tonminerale auf die bodenphysikalischen Eigenschaften der Modellböden lassen sich nun verschiedene Schlüsse ziehen, die auch für die Praxis Bedeutung haben.

a) Rutschneigung.

Die innere Reibung R eines Bodens ist bekanntlich abhängig einmal von dem Normaldruck N , zum anderen aber von dem Reibungsbeiwert $\operatorname{tg} \varphi$. Bei gleichem Normaldruck entscheidet somit über die Rutschgefahr der kleinere Reibungsbeiwert $\operatorname{tg} \varphi$, der versuchsmäßig, wie auf S. 9 beschrieben, ermittelt

wird. Gerade der Scherversuch, der in seinen Ausführungsarten und Fehlerquellen von Hvorslev [8] sehr eingehend untersucht worden ist, liefert aber häufig Werte, die sich auf den ersten Blick nicht deuten lassen. Zum Beispiel haben zwei in ihrem Aufbau ähnliche Bodenproben (Zahlentafel 3) folgende Werte:

Nr. 2 Kassel	$\operatorname{tg} \varphi = 0,145$	$k_0 = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm/min}$
Nr. 10 Haiger III	$\operatorname{tg} \varphi = 0,42$	$k_0 = 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ cm/min}$

Der Gehalt an tonigen Bestandteilen (Korngrößen $\leq 2 \mu$) ist bei beiden etwa gleich (46 und 49 Gewichtsprozente), desgleichen Fließ- und Ausrollgrenze. Trotzdem liegen die Reibungsbeiwerte so weit auseinander. An der Durchführung des Scherversuches kann diese Differenz nicht liegen; da die Durchlässigkeit der beiden Proben dieselbe Dimension (10^{-7} cm/min) aufweist, sind also die Konsolidierungsbedingungen bei beiden Proben bei gleicher Schergeschwindigkeit dieselben. Die röntgenografische Untersuchung zeigt dagegen, daß die Probe Haiger III vorwiegend Glimmerton und Kaolin aufweist, die Probe Kassel dagegen Quarz, Kaolin und Montmorillonit. Die Scherfestigkeit eines Materials ist abhängig von dem inneren Widerstand der Einzelkörner gegen gegenseitiges Ver- und Übereinanderschieben. Daher findet sich bei kantigem Quarzsand der größte Reibungsbeiwert, bei blättrigem Material je nach Lage der einzelnen Blättchen der geringste Widerstand. Aber es kommt noch ein zweiter Faktor hinzu: die Schmierung durch die Wasserfilme. Wasser gilt an sich bei makroskopischen Versuchen nicht als Schmiermittel, sondern es erhöht sogar die Reibung. Nach Terzaghi [15] sind aber die Molekeln der Schmiermittel bipolar und stellen sich mit ihren Achsen senkrecht zu den Reibungsflächen; er ordnet den Wassermolekülen diese Orientierungsfähigkeit ebenfalls zu. Eine direkte Korn-zu-Korn-Berührung tritt nicht ein. Es gleiten also nicht die Bodenpartikelchen aufeinander, wie es bei dem festen Kornskelett des Sandes größtenteils der Fall ist, sondern die Gleitung tritt auf einem Schmierfilm ein. Je stärker die molekular gebundenen Wasserhütchen sind, um so niedriger muß demnach der Winkel der inneren Reibung sein. Die nachstehende Zahlentafel zeigt, welche Wassergehalte nach dem Abscheren und nach Konsolidierung unter $1,5 \text{ kg/cm}^2$ Normallast gefunden wurden:

Quarz : Kaolin	9 : 1	20,2	} Wassergehalte in % vom Trockengewicht	
	7 : 3	16,2		
	1 : 1	18,5		
Quarz : Ca-Bentonit	9 : 1	23,7		
	7 : 3	37,1		
	1 : 1	51,7		
Quarz : Na-Bentonit	9 : 1	41,7		
	7 : 3			
	1 : 1			
				} nicht durchgeführt

Wenn man also von dem Wert Quarz : Kaolin 9 : 1 absieht, ist auch hier wieder eine klare Gesetzmäßigkeit zu erkennen: Die gebundene Wassermenge nimmt innerhalb der einzelnen Mischungen mit abnehmendem Quarzgehalt zu, steigt aber auch vom Kaolin zum Na-Bentonit. Diese Untersuchungen des Wassergehaltes nach dem Scherversuch beweisen, was auf anderem Wege aus Abb. 19 abgelesen wurde. Nach der obigen Deutung der Abhängigkeit der inneren Reibung vom Wassergehalt müßten sich die gefundenen Reibungsbeiwerte nach derselben Tendenz einordnen wie die angeführte Zahlentafel Abb. 16 bestätigt diese Behauptung. Diese Wasserbindefähigkeit übt also die gleiche Wirkung aus wie ein zu schnelles Abscheren ohne Abwarten der Konsolidierung infolge der Auflast: da das überschüssige Porenwasser nicht so rasch austreten kann, wird die Scherkraft fast ausschließlich von dem Porenwasser aufgenommen (hydrostatischer Überdruck) und der Winkel der inneren Reibung kann bis auf 0 herabsinken [20]. Auf S. 9 war beschrieben worden, wie die Scherversuche bei diesen Untersuchungen durchgeführt worden sind. Nach den Untersuchungen von Hvorslev [8] sind zweifellos die Zeitintervalle der Steigerung der Scherspannung, insbesondere bei den Bentoniten, zu gering, so daß die bei diesen Versuchen gewonnenen Reibungsbeiwerte nicht vollkommen mit den wahren Festigkeitseigenschaften der Proben übereinstimmen werden. Die oben angegebenen Wassergehalte entsprechen aber den wahren Werten nach Konsolidierung unter der Normallast. Sie zeigen die Tendenz, daß bei gleicher Auflast die Wasserbindung vom Kaolin zum Na-Bentonit steigt (vgl. Abb. 19). Man kann nun mit großer Wahrscheinlichkeit annehmen, daß bei den Schubspannungen dieselbe Beobachtung gemacht werden kann wie bei den Normalspannungen: der Na-Ton bindet auch unter der Beanspruchung durch Scherkräfte das meiste Wasser, so daß sich an der besprochenen Gesetzmäßigkeit nichts ändert, auch wenn die Reibungsbeiwerte mit den genannten Einschränkungen betrachtet werden müssen.

Für natürliche Böden bedeuten diese Versuche und Überlegungen, daß die Rutschgefahr mit dem Wasserbindevermögen steigt. Hinzu kommt, daß diese Tonminerale, die, wie der im Bentonit enthaltene Montmorillonit, mengenmäßig viel Wasser binden, zugleich sehr wenig durchlässig sind und bei Wasserzutritt stark zum Quellen neigen. Abb. 15 deutet an, wie wenig Trockensubstanz Na-Bentonit genügt,

um einen Quarzboden praktisch undurchlässig zu machen. Wenn also in einer Böschung beispielsweise bentonithaltige Tone auch nur in geringen Mengen vorhanden sind, so wird erstens der Winkel der inneren Reibung herabgesetzt, zweitens können hinter dieser undurchlässigen Schicht Wasseransammlungen auftreten und unvorhergesehene hydrostatische Überdrücke erzeugen und drittens lockert die Quellung bei Wasseraufnahme das Gefüge des Bodens und ermöglicht so neuen Wasserzutritt. Alle drei Momente wirken also im ungünstigen Sinne. Wenn auch hier ein Extremfall besprochen wurde, um die Verhältnisse möglichst klarzulegen, so dürfte aus den Kurven wohl doch eindeutig zu erkennen sein, daß die Rutschneigung weitgehend abhängig von der Wasserbindungsfähigkeit der anteiligen Tonminerale ist.

b) Setzungen.

Nach Terzaghi [15] ist die Zusammendrückbarkeit der Tone und ihre Elastizität bedingt durch das Vorhandensein schuppenförmiger Bestandteile. Dabei wird das Porenwasser unter einer zusätzlichen Last ausgequetscht, bis wieder Gleichgewicht herrscht zwischen der Auflast einerseits und dem Porenwasserdruck und Korn-zu-Korn-Druck andererseits. Das Auspressen des Porenwassers ist zeitlich bedingt durch die Durchlässigkeit des Materials (s. auch S. 21). Terzaghi veranschaulicht diesen Vorgang sehr einleuchtend durch sein Modell mit abgefederten und gelochten Kolben in einem Zylinder. Wenn, wie im Früheren gezeigt wurde, schon geringe Mengen Bentonit einen Boden praktisch undurchlässig machen, so wirkt sich diese Tatsache auf den zeitlichen Verlauf einer Setzung entscheidend aus. Beispielsweise erfordert die Durchführung eines Kompressions-Durchlässigkeitsversuches mit einer Mischung 7:3 von Quarz-Na-Bentonit etwa 6 Wochen Zeit. Die Probenhöhe betrug dabei 4 cm. Wenn man nun bedenkt, daß sich die Zeitdauer einer Setzung verhält wie die Quadrate der Schichtstärken, so kann man leicht ermesen, wie langsam ein Setzungsvorgang bei Anwesenheit von Bentonit in der Natur vor sich geht. Es wird also noch lange nach Bauende fast die gesamte Auflast vom Porenwasser getragen werden, ehe sich allmählich ein innerer Gleichgewichtszustand einstellt. Solange aber die Konsolidierung nicht eingetreten ist, ist die Gefahr des seitlichen Ausquetschens und Einbruchs des Bauwerkes besonders groß, als eine Folge des erniedrigten Winkels der inneren Reibung.

Als zweites kommt bei den Böden mit mengenmäßig großer Wasserbindung hinzu, daß die Setzungen infolge der relativ großen Wassermenge, die ausgequetscht wird, auch dem absoluten Werte nach groß werden. Der Bentonit ist häufig das Zersetzungsprodukt vulkanischer Aschen oder jungvulkanischer Gesteine. Wahrscheinlich lassen sich so die beobachteten starken Setzungen in vulkanischen Gegenden wie z. B. Mexiko-Stadt erklären.

c) Frostgefahr.

Daß die einzelnen Bodenarten sich bei Frost gänzlich verschieden verhalten, ist seit längerem durch Beobachtung und Forschung bekannt und gedeutet. So wurde die Beobachtung, daß das Porenwasser in gewissen Bodenarten erst bei mehreren Graden C unter 0 gefriert, zunächst als eine Unterkühlungserscheinung, später als Folge der im Boden gelösten Salze angesehen. Beskow [13] behauptet dann, daß diese Herabsetzung der Gefriertemperatur eine Folge der durch die Adsorptionskräfte der Bodenpartikelchen ausgeübten Bindung der Wassermoleküle sei: Um ein Wassermolekül aus der Adsorptionshülle herauszureißen und in das Kristallgitter des Eiskristalles einzufügen, ist eine gewisse Energie erforderlich, die eben in Form von Wärme aufgebracht bzw. entnommen wird. Er gibt sogar eine empirisch gefundene Gleichung für die Abhängigkeit der Gefriertemperatur — Herabsetzung als Funktion der Korndurchmesser. Ebenso gibt Beskow als Hauptfaktor, der die Art des Gefrierens (ob homogener oder heterogener Frost) bestimmt, die Korngröße an. Das ist sicher richtig, solange man nur zwischen Sand, Schluff und „Ton“ unterscheidet. Aber auch hier lassen sich jetzt auf Grund der bei dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse noch eingehendere Unterscheidungen innerhalb des Tones machen, und vor allem läßt sich die Deutung von Beskow auch noch ergänzen. Man kann aus den vorliegenden Untersuchungen deutlich ablesen, daß nicht die Feinheit, sondern die chemische Natur ausschlaggebend für die Wasserbindung ist; denn innerhalb der Bentonite bestehen keine wesentlichen Größenunterschiede und dennoch ist die Wasserbindung bei der Fließgrenze bei dem Na-Bentonit mehr als dreimal so groß wie bei dem Ca-Bentonit (Abb. 15 und Zahlentafel 2). Aber selbst der Kaolin enthält rund 70% Teilchen von der Größenordnung der Bentonitteilchen; trotzdem bewegen sich die Unterschiede in der Wasserbindung und damit in den bodenphysikalischen Kennziffern in den in Abb. 15 dargestellten Größen. Die verschieden starken Wasserhüllen der einzelnen Tonbestandteile im Verhältnis zur Größe der festen Partikelchen bewirken, daß auch verschieden große Wassermengen bei Frost mobilisierbar sind, d. h. es steht innerhalb der Bodensäule eine beträchtliche Wassermenge zur Bildung von Eiskristallen zur Verfügung. Es wird also innerhalb der Tone verschieden starke Frosthebungen geben, ohne daß eine Nachfuhr aus dem Grundwasser erforderlich ist. Auf der anderen Seite ist aber auch die Durchlässigkeit

verschieden und damit die Möglichkeit des Wassernachschubes aus dem Grundwasser. Bei gleicher Frostdauer und gleicher Grundwassertiefe wird demnach ein Kaolin aus dem Eigenporenwasser geringere Frosthebungen aufweisen als etwa ein Na-Bentonit, andererseits wird aber beim Kaolin noch ein gewisser Wassertransport aus dem Untergrund möglich sein, beim Na-Bentonit dagegen kaum. Es verhält sich also Kaolin zum Na-Bentonit wie die von Beskow untersuchten Schluff- zu den Tonböden. Was hier für die reinen Minerale gesagt ist, gilt natürlich auch für natürliche Böden, in denen diese Minerale vorkommen. Es wäre interessant, die Arbeit von Beskow einmal in dieser Richtung fortzusetzen; denn der chemische Einfluß der Konzentration der hydratisierten Kationen der Tonminerale auf die Gefrieretemperatur z. B. ist noch völlig unbekannt.

VI. Zusammenfassung der Ergebnisse.

Von definierten Tonmineralien ausgehend, wurden an Gemengen dieser Ton-Mineralien mit feinstem Quarz sowie an 13 natürlichen, deutschen Tonböden röntgenografische, kolloidchemische und bodenphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Die Versuchsverfahren werden besprochen und die Fehlerquellen untersucht. Alle Versuchsergebnisse, tabellarisch und graphisch aufgetragen, ergeben eine weitgehende Übereinstimmung aller Meßergebnisse und der Beziehungen zwischen den einzelnen Versuchsreihen. Auch die Ergebnisse der natürlichen Böden lassen sich gut in das System der künstlichen Ton-Mineral-Quarz-Gemenge einordnen.

Es zeigt sich, daß alle wichtigen bodenphysikalischen Eigenschaften, wie Reibungsbeiwert, Verdichtungsziffer und Durchlässigkeit, in starkem Maße durch den Anteil an Quarz und die Art und Menge der jeweiligen Tonminerale beeinflußt werden. Diese Abhängigkeit wird erklärt durch das verschiedene Wasserbindevermögen der Tonminerale.

Die Bestimmung der Benetzungswärme wird sich in Zukunft für bautechnische Fragen erübrigen, da keinerlei Beziehung zwischen der Benetzungswärme und Oberflächengröße bzw. Feinheit festgestellt werden konnte. Dagegen dürfte auf Grund dieser Versuche das Enslin-Gerät wohl in die Reihe der heute gebräuchlichen bodenphysikalischen Versuchsgeräte aufgenommen werden.

Abschließend werden aus den Untersuchungen über den Einfluß der Tonminerale Schlüsse auf bautechnisch wichtige Fragen, wie Rutschungen, Setzungen und Frostgefahr, gezogen.

VII. Schrifttum.

1. Seifert, R., J. Ehrenberg, B. Tiedemann, K. Endell, U. Hofmann u. D. Wilm: Bestehen Zusammenhänge zwischen Rutschneigung und Chemie von Tonböden? Mitt. preuß. Versuchsanst. Wasserbau u. Schiffbau Heft 20. Berlin 1935.
2. Schmidt, O.: Z. phys. Chem., Bodenst.-Festband 1932.
3. Enslin, O.: Über einen Apparat zur Messung der Flüssigkeitsaufnahme von quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit. Chem. Fabrik 1933 S. 147.
4. Freundlich, H., O. Enslin u. G. Lindau: Kolloidchem. Beih. Bd. 37 (1933) S. 42.
5. Janert, H.: Landw. Jb. 1927 S. 425. — Z. Pflanzenkde., Düngung u. Bodenkde., Teil A Bd. 19 (1931) S. 281. Ebenda A Bd. 34 (1934) S. 100.
6. Loos, W.: Praktische Anwendung der Baugrunduntersuchung bei Entwurf und Beurteilung von Erdbauten und Gründungen, 3. Aufl. Berlin: Julius Springer 1937.
7. Casagrande, A.: Die Aräometer-Methode zur Bestimmung der Kornverteilung von Böden und anderen Materialien. Berlin: Julius Springer 1934.
8. Hvorslev, Juul, M.: Über die Festigkeitseigenschaften gestörter bindiger Böden. Danmarks Naturvidenskabelige Samfund. København 1937.
9. Freundlich, H.: Kapillarchemie, 4. Aufl., Bd. 2.
10. — Kolloid-Z. Bd. 46 (1928) S. 295.
11. Vageler, P.: Der Kationen- und Wasserhaushalt des Mineralbodens. Berlin 1932.
12. Duclaux: The osmotic pressure of colloidal solutions. J. Alexanders Colloid Chemistry, Vol. 1. New York 1926.
13. Beskow, G.: Tjälbildningen och Tjällyftningen med Särskild Hänsyn Till Vägar och Järnvägar. Stockholm 1935. Auszugsweise Übersetzung in Straßenbau 1936 Heft 4, 5, 9 u. 10.
14. Atterberg, A.: Die Plastizität und Bindigkeit liefernden Bestandteile der Tone. Int. Mitt. Bodenkde. Bd. 3 (1913).
15. Redlich-Terzaghi-Kampe: Ingenieurgeologie. Wien: Julius Springer 1929.
16. Kirchhoff, F. R.: Untersuchungen über die Ursachen der Böschungsrutschungen in Jura- und Kreidetonen bei Braunschweig. Geol. u. Bauwes. Wien 1930, S. 79.
17. Endell, K., H. Fendius u. U. Hofmann: Basenaustauschfähigkeit von Tonen und Formgebungsprobleme in der Keramik (Gießen, Drehen, Pressen). Ber. dtsh. keram. Ges. Bd. 15 (1934) Heft 12 S. 595.
18. — U. Hofmann u. E. Maegdefrau: Über die Natur des Tonanteils in Rohstoffen der Deutschen Zement-Industrie. Zement Bd. 24 (1935) S. 625.
19. Terzaghi, K. v.: Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage. Leipzig u. Wien: Franz Deuticke 1925.
20. Streck: Fortschritte auf dem Gebiet der Baugrundforschung. Zbl. Bauverw. Bd. 48 (1928) S. 306.