

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING

SER. C.

Avhandlingar och uppsatser.

N:o 256.

ÅRSBOK 7 (1913): N:o 3.

DIE FESTIGKEIT DER BODENARTEN  
BEI VERSCHIEDENEM WASSERGEHALT

NEBST

VORSCHLAG ZU EINER KLASSIFIKATION

VON

SIMON JOHANSSON

MIT EINER TAFEL.



Pris 1.50 kr.

SVERIGES GEOLOGISKA UNDERSÖKNING

SER. C.

Avhandlingar och uppsatser.

N:o 256.

ÅRSBOK 7 (1913): N:o 3.

DIE FESTIGKEIT DER BODENARTEN  
BEI VERSCHIEDENEM WASSERGEHALT

NEBST

VORSCHLAG ZU EINER KLASSIFIKATION

VON

SIMON JOHANSSON

MIT EINER TAFEL.



STOCKHOLM

KUNGL. BOKTRYCKERIET. P. A. NORSTEDT & SÖNER

1914

[141771]

## INHALT.

	Seite.
Einleitung . . . . .	2.
Die Konsistenzformen der Bodenarten . . . . .	7.
Beschreibung der Methode . . . . .	10.
Die Festigkeit der Bodenarten nach dem Trocknen . . . . .	15.
Die Festigkeit bei verschiedenen Wassergehalten . . . . .	25.
Sandsortierungen . . . . .	28.
Gewöhnliche Sandböden . . . . .	33.
Schluffböden und Moschluffböden . . . . .	35.
Molehme und Sandmolehme . . . . .	37.
Schlufflehme . . . . .	39.
Motone . . . . .	41.
Schlufftone . . . . .	43.
Sehr schwere Tone . . . . .	46.
Humose Böden . . . . .	50.
Nähere Diskussion der Festigkeitskurven . . . . .	52.
Der flüssige Zustand . . . . .	57.
Der plastische Zustand . . . . .	60.
Der Umschlagspunkt (die Schrumpfungsgrenze) . . . . .	68.
Der feste Zustand . . . . .	78.
Über die Wasseraufnahme der Bodenarten und über Solifluktion . . . . .	83.
Vorschlag zu einer Klassifikation der humusfreien Bodenarten . . . . .	95.

Die Bodenarten sind erst in letzter Zeit zum Gegenstand mehr systematischer Untersuchungen gemacht worden. Zwar waren schon vorher Untersuchungen angestellt worden, aber man hatte den praktischen Nutzen,<sup>1</sup> das Verhältnis der Bodenarten zur Vegetation, allzu scharf ins Auge gefasst, man hatte gleich den Alchymisten allzu eifrig Gold zu machen gesucht, ohne sich die Zeit zu einem eingehenderen Studium zu lassen. Die Resultate waren daher in vielen Fällen nicht allgemeingiltig, und die agronomische Wissenschaft kam bei den Männern der Praxis in Misskredit.

Die Erfahrung hat allmählich die sehr komplizierte Natur des Problems erkennen lassen, und das Ziel — vollständige Kenntnis des Verhältnisses der Bodenarten zur Vegetation — ist damit weiter in die Ferne gerückt. Auf die Vegetation wirken ausser dem Boden auch das Klima und biologische Faktoren ein, und die Wissenschaft von den Bodenarten muss sich daher damit begnügen, das Ziel in sich selbst, in einem besseren Verständnis der Natur der Bodenarten, zu suchen.

Eine Bodenart ist ein sehr zusammengesetzter Komplex. Sie besteht ja aus mehr oder weniger zerbröckeltem Gestein mit mehr oder weniger verwitterten Gesteinsfragmenten sowie mit oder ohne Beimischung von organischem Material, lebendem oder totem. Die Bodenarten bestehen somit aus mehr oder weniger umgewandeltem Material, in welchem die umbildenden Prozesse noch weiter vor sich gehen, oder wie

---

<sup>1</sup> »Der Fortschritt der Bodenkunde hat hierunter schwer gelitten und leidet leider auch heute noch fast unverändert unter diesen Verhältnissen.« (E. RAMANN, Bodenkunde, 3. Aufl., 1911, S. 5.)

HILGARD sagt: »*The soil is a chemico-physical and biological laboratory in constant activity.*»

Die Bodenforschung hat sich auch bereits nach verschiedenen Richtungen hin verzweigt. Seit alters hat man die mechanische Zusammensetzung der Böden studiert und daraus Schlüsse auf ihre Eigenschaften zu ziehen versucht. Eine neuere Richtung widmet sich dem Studium der bodenbildenden Prozesse, dem Einfluss des Klimas und der Vegetation auf die Verwitterung. Sie wird besonders von den russischen Pedologen vertreten und hat zur Klassifizierung der Böden nach dem Klima, in welchem sie vorkommen, und nach der Vegetation, die sie tragen (*Waldböden, Steppenböden*), geführt. Eine andere Richtung betreibt das Studium der physikalischen Eigenschaften der Böden, das in letzter Zeit eifrig gefördert worden ist.

Prinzipiell am richtigsten wäre es ja, wenn die Böden nach den darin enthaltenen Bestandteilen charakterisiert werden könnten, ein Ziel, das die mechanische Bodenanalyse seit lange erstrebt. Indessen sind die Bodenbestandteile von stark wechselnder Natur, sowohl was die mineralogische Zusammensetzung, als was die Grösse und Form der Partikeln betrifft, und jede Korngrösse hat ihre spezifischen Eigenschaften mit durch die Form und Zusammensetzung des Korns bedingten Abweichungen. Die mechanische Bodenanalyse, die die Böden ausschliesslich nach der Korngrösse durch die Einteilung des Korns in verschiedene Grössengruppen zu charakterisieren versucht, kann daher kein vollständiges Bild von den Eigenschaften der Böden geben, um so weniger da man noch nicht vollständig die Eigenschaften der verschiedenen Kornsortimente kennt,<sup>1</sup> und noch wirrer muss das Bild werden, wenn, wie das meistens der Fall ist, die Böden aus Mischungen aller möglichen Grössengruppen bestehen.

Um diesen Schwierigkeiten zu entgehn, ist ein neuer Weg eingeschlagen worden, der nämlich, direkt die Eigenschaften

<sup>1</sup> Hierüber hat ATTERBERG verdienstliche Untersuchungen angestellt. *Versuchsstationen*, Bd. 69, 1908, S. 93.

der Böden zu studieren und quantitativ dieselben zu bestimmen. Insbesondere hat ATTERBERG in seinen letzten Publikationen sich zum Vorkämpfer dieser neuen Richtung gemacht.

Die physikalischen Eigenschaften der Böden, die man besonders zu bestimmen versucht hat, sind: Permeabilität, Wasserkapazität, Porenvolumen (KOPEKKY), Schwinden (FROSTERUS), Plastizität und Festigkeit (ATTERBERG). Von diesen eignen sich die drei erstgenannten nach FROSTERUS nicht recht gut zu Merkmalen für Bodenarten.<sup>1</sup>

Diese physikalischen Bestimmungen haben jedoch die mechanische Analyse nicht überflüssig gemacht. Sie ergänzen nur dieselbe, geben uns eine wahrere Auffassung von der fraglichen Bodenart, als die mechanische Analyse allein sie gewähren könnte.

Es ist klar, dass dieselbe physikalische Eigenschaft sich nicht als Merkmal für alle Bodenarten eignet. Die Festigkeit z. B. spielt eine grosse Rolle bei den Tonen, um verschiedene Schweregrade und damit verschiedene Bearbeitbarkeit auszudrücken, wovon die Bezeichnungen schwerer Ton, leichter Ton Zeugnis ablegen, während sie für die lockeren Bodenarten nicht zur Unterscheidung verschiedener Typen geeignet ist. Zu diesem Behufe muss man sich an andere Eigenschaften halten, wie Permeabilität oder Kapillarität.

ATTERBERG ist in der Einführung physikalischer Kennzeichen in die Bodenklassifikation am weitesten gegangen. Er studiert die Bodenarten, nachdem sie mit Wasser zu einem Teig gemischt worden sind, und bestimmt die Wassergehalte, die »Grenzen«, bei denen der Teig gewisse Eigenschaften, eine gewisse Konsistenz hat. Für den Abstand zwischen den Grenzen, d. h. die Differenz des Wassergehalts bei zwei Zuständen, haben sich Zahlen ergeben, die für die einzelnen Bodenarten charakteristisch sind.

<sup>1</sup> B. FROSTERUS, Über die Einteilung der Bodenablagerungen in Moränengebieten nach der Korngrösse und den physikalischen Eigenschaften. La Pédologie, 1912, Nr. 4, S. 52.

Der Zweck der vorliegenden Untersuchung ist der gewesen, die Bodenarten auch zwischen den »Grenzen« in der Weise zu studieren, dass die Festigkeit oder Kohärenz bei verschiedenen Wassergehalten bestimmt wurde, um an den so erhaltenen »Festigkeitskurven« die Lagen der Konsistenzgrenzen zu beobachten. Sind diese natürliche Grenzen in dem Sinne, dass der Bodenteig bei ihnen seine Natur ändert, so muss dies auch aus den Kurven hervorgehn, die dann bei entsprechenden Wassergehalten Flexionspunkte anweisen müssen.

Verfasser hat auch gehofft, aus den Bestimmungen Ziffern für die Bearbeitbarkeit der Böden zu erhalten, bessere wenigstens als die bisher angewandten, bei denen die Festigkeit an bei 100° getrockneten Proben bestimmt wurde, welcher Trockenheitsgrad ja niemals in der Natur vorkommt, während andererseits die Landwirte ja den Boden bei so hohem Wassergehalt zu bearbeiten versuchen, wie mit einer guten Lockerung des Bodens vereinbar ist.

Die vorliegende Untersuchung ist auf der Chemischen Station in Kalmar ausgeführt worden. Verfasser hat dabei den Vorteil gehabt, als Material Bodenproben aus Dr. ATTERBERG's Bodenartensammlung anwenden zu dürfen. Dabei sind natürlich hauptsächlich diejenigen Bodenarten einer Untersuchung unterzogen worden, die bereits vorher (teilweise vom Verfasser als Dr. ATTERBERG's Assistent) mechanisch analysiert worden waren, und welche in ATTERBERG's Arbeit über »Mekaniska jordanalyser och klassifikationer af de svenska mineraljordslagen«<sup>1</sup> vorkommen.

Herrn Dr. ATTERBERG erlaube ich mir hier meinen ergebensten und wärmsten Dank für wertvolle Ratschläge während der Arbeit auszusprechen. Von einem so hervorragenden Forscher wie Dr. ATTERBERG, der in seiner Wissenschaft eine führende Stellung einnimmt, in das Gebiet der Boden-

---

<sup>1</sup> Kungl. Landbruksakademiens Tidskrift, 1912, Nr. 6, S. 438 ff., sowie unter dem Titel »Die mechanische Bodenanalyse und die Klassifikation der Mineralböden Schwedens« in Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. II, 1912, S. 312 ff.

forschung eingeführt zu werden, ist für den Verfasser natürlich von unschätzbarem Vorteil gewesen.

### Die Konsistenzformen der Bodenarten.

Wird Bodenpulver mit Wasser verrührt, so wird der erhaltene Teig natürlich um so lockerer, je mehr Wasser hinzugesetzt wird, und mehr Wasser muss zu Tonpulver als zu Sand hinzugesetzt werden, damit der Teig dieselbe lose Konsistenz erhalten soll, oder allgemein gesagt: je feinkörniger das Pulver ist, um so mehr Wasser vermag es zu binden, bevor der Teig so lose wird, dass er flüssig genannt werden kann.

TSCHAPLOWITZ<sup>1</sup> war wohl der erste, der einen bestimmten Zustand des Teiges fixierte, und der eine »Grenze« aufstellte. Er rührte Wasser in pulverisierten Ton ein, bis der Teig so lose wurde, dass eine durch denselben gezogene Furche nach einigen Sekunden wieder zusammenfloss. Die hierzu erforderliche Wassermenge wandte TSCHAPLOWITZ als Mass für die Plastizität der Tone an.

Nach ihm hat ATTERBERG eingehend die Eigenschaften des »Komplexes Boden + Wasser« bei variierenden Wassergehalten studiert. Geht man von TSCHAPLOWITZ' Grenze aus und setzt man mehr und mehr Bodenpulver hinzu, so erhält der Teig schliesslich eine solche Konsistenz, dass, wenn er in eine Porzellanschale genommen und mit einem Spatel in zwei Hälften geteilt wird, diese nicht zusammenfliessen, selbst nicht wenn mehrmals an den Rand der Schale gestossen wird. ATTERBERG<sup>2</sup> nennt diese Grenze die *Fliessgrenze* und will damit bezeichnen, dass der Boden bei diesem Wassergehalt aufhört flüssig zu sein. Die Masse gelangt in den festen Zustand oder, wenn es sich um Tone handelt, in einen Übergangszustand zwischen dem flüssigen und dem festen Zustande, den plastischen Zustand.

<sup>1</sup> Zeitschr. f. analyt. Chem., 31, 49, 1892. Nach ATTERBERG, Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. I, 1911, S. 9.

<sup>2</sup> Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. I, 1911, S. 30.

Bei fortgesetzter Austrocknung des Teiges, was dadurch bewirkt werden kann, dass derselbe zwischen den Fingern oder auf einem Papier zu einem Draht ausgerollt wird, wird dieser schliesslich so spröde, dass er während des Rollens in kleine Klumpen zerfällt. Hier hat ATTERBERG nun eine weitere Grenze angesetzt, die *Festigkeitsgrenze*, später umgeändert in *Ausrollgrenze*. Bei der Definition, die ATTERBERG für die Plastizität gegeben hat, dass nämlich eine Bodenart plastisch ist, wenn das Bodempulver, mit Wasser versetzt, einen Teig bildet, der sich ausrollen lässt, wird die *Ausrollgrenze* die untere Grenze für das plastische Gebiet, indem bei niedrigerem Wassergehalt der Teig zu spröde zum Ausrollen wird, und die *Fliessgrenze* die obere Grenze eben dieses Gebiets, da der Teig bei höherem Wassergehalt allzu lose ist, um gerollt werden zu können. Der Abstand zwischen diesen letzteren Grenzen ist verschieden gross bei verschiedenen Böden. Am grössten ist der Abstand bei den sehr plastischen Böden und am kleinsten bei den weniger plastischen, was ATTERBERG veranlasst hat, diese Differenz als Mass der Plastizität der Bodenarten anzusetzen.<sup>1</sup>

Ferner hat ATTERBERG die *Zusammenhaftbarkeitsgrenze*, später kürzer die *Haftgrenze* genannt, aufgestellt, welche bei noch niedrigerem Wassergehalt als die Ausrollgrenze eintritt, und welche dadurch gekennzeichnet ist, dass die spröden Klumpen, in die der Bodenteig schliesslich beim Ausrollen zerfiel, zwar anfangs durch Druck sich zusammenfügen lassen, bei fortgesetzter Austrocknung aber so spröde werden, dass sie nicht einmal bei Druck zusammenhaften, wo dann die Grenze erreicht ist. Dieser Grenzzustand ist von ATTERBERG nicht näher bei den Bodenarten studiert worden. Die Haftgrenze ist die letzte in der Reihe der aufgestellten Grenzen nach der Trockenheit hin.

Noch eine weitere Grenze ist von ATTERBERG genauer fixiert worden, nämlich die *Klebegrenze*, die dieselbe wie die ist,

<sup>1</sup> Die Plastizität der Tone. Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. I, 1911, S. 24.

welche die Tontechniker Normalkonsistenz nennen. Sie liegt zwischen der Ausrollgrenze und der Fliessgrenze, bisweilen sogar bei noch höherem Wassergehalt; bei den schwereren Böden liegt sie der Ausrollgrenze näher. Sie ist jedoch noch nicht ausführlicher studiert. Bisher sind es hauptsächlich die Lagen der Ausrollgrenze und der Fliessgrenze, die als Merkmale der Bodenarten gedient haben.

Die Eigenschaft der Böden, dass sie beim Austrocknen an Volumen abnehmen, hat zu der Aufstellung der *Schwindungsgrenze* geführt, d. h. des Punktes, bis zu welchem das Schwinden genau dem Wasserverlust entspricht. Die Grenze ist zuerst von ARON<sup>1</sup> bestimmt worden. ATTERBERG vermutet, dass die Schwindungsgrenze der Haftgrenze recht nahe liegt.<sup>2</sup> Die vorliegende Untersuchung hat ergeben, dass die beiden Grenzen in Wirklichkeit identisch sind, wenigstens bei den Tonen.

Theoretisch betrachtet sind die verschiedenen Grenzen mit Ausnahme vielleicht der Klebegrenze nur Ausdrücke für die Verschiebbarkeit oder Beweglichkeit der Bodenpartikeln im Verhältnis zu einander. Bei TSCHAPLOWITZ' Grenze enthält die Masse so viel Wasser, dass die Partikeln verhältnismässig weit von einander sich entfernt haben und daher wenig auf die gegenseitige Beweglichkeit einwirken: die Masse ist flüssig fast wie Wasser. Bei abnehmendem Wassergehalt nimmt die Dicke der Wasserhülle um die einzelnen Partikeln ab, so dass sie mehr und mehr auf einander einwirken und die Beweglichkeit herabsetzen. Bei dem Wassergehalt der Ausrollgrenze ist die gegenseitige Beweglichkeit der Partikeln so herabgesetzt, dass, wenn die Masse einem Druck ausgesetzt wird, sie eher bricht als durch den Druck deformiert wird. Vollständig unbeweglich im Verhältnis zu einander sind jedoch die Partikeln noch nicht, dies trifft erst bei der Haftgrenze ein.

---

<sup>1</sup> BISCHOF, Die feuerfesten Tone, Leipzig 1904, S. 27.

<sup>2</sup> Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. I, 1911, S. 33.

Es ist daher zu vermuten, dass, wenn man diese gegenseitige Beweglichkeit der Partikeln oder, was dasselbe ist, die Viskosität der Masse bei verschiedenen Wassergehalten irgendwie messen könnte, die obenerwähnten Grenzen besonders markierte Punkte in der »Viskositätskurve« darstellen würden, und man würde leichter den Zusammenhang verstehen, wenn man alle zwischenliegenden Stadien repräsentiert hätte.

### Beschreibung der Methode.

Zur Bestimmung der Viskosität flüssiger Körper finden sich Viskosimeter, die nach verschiedenen Prinzipien konstruiert sind. Gewöhnlich wird ein Apparat angewandt, bei dem die Viskosität aus der Durchströmungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit in Kapillarröhren berechnet wird, oder auch lässt man eine Metallscheibe in der Flüssigkeit schwingen und beobachtet die Schwingungszeit und die Dämpfung. Auch andere Methoden sind vorgeschlagen worden. Sie sind jedoch alle für homogene Flüssigkeiten konstruiert und eignen sich nicht für so heterogene Mischungen und für so hohe Konzentrationen, wie sie hier in Betracht kommen.

Zunächst wurden einige Versuche zur Bestimmung der Geschwindigkeit gemacht, mit welcher die Masse durch eine Röhre hindurchfloss. Natürlich konnten nicht Röhren von kapillaren Dimensionen verwendet werden, sondern bedeutend gröbere wurden gebraucht. Es zeigte sich jedoch, dass Wasser an den Wänden der Röhre adsorbiert wird, das als Schmiermittel fungiert, so dass die Masse durch die Röhre fast mit derselben Geschwindigkeit nahezu unabhängig von dem Wassergehalt der Masse glitt. Um der »inneren Reibung« besser zu Leibe zu kommen, wurde nun eine Röhre mit noch grösserem Durchmesser genommen, bei der aber die untere Öffnung durch eine dünne Metallscheibe mit einem 4 mm im Durchmesser haltenden Loch in der Mitte verschlossen war, durch welches letzteres Loch die Masse fließ-

sen sollte. In der Tat wurde nun eine bessere Übereinstimmung zwischen Konzentration und Ausströmungsgeschwindigkeit erhalten, da aber die Methode nicht bei einem Wassergehalt unterhalb der Fliessgrenze ohne Anwendung von Druck angewandt werden konnte, so wurde sie aufgegeben.

Es war daher notwendig, sich nach einer anderen Methode umzusehen, die auch innerhalb des plastischen und des festen Zustandes verwendbar war, welche Zustände zu studieren ja auch von grösserem Interesse ist, da ja die Böden in der Natur gewöhnlich eben in diesen Zuständen und seltener im flüssigen Zustande vorkommen.

Ein Verfahren, das bereits ATTERBERG<sup>1</sup> angewandt hat, und das über den ganzen Bereich vom flüssigen bis zum festen Zustande hin verwendet werden kann, besteht darin, einen Keil in die Masse bis zu einer gewissen Tiefe einzudrücken. Die hierzu erforderliche Belastung kann als Mass der Viskosität innerhalb des flüssigen und plastischen Gebiets und als Mass der Festigkeit innerhalb des festen benutzt werden. Belastet man den Keil, bis er in die Masse hinabdringt, so sinkt er allmählich, wenn die Masse flüssig oder plastisch ist; ist sie aber fest, so entsteht bei genügender Belastung eine Spalte, in welche der Keil plötzlich hinabsinkt. Im ersteren Falle ist die Reibung zwischen den Bodenpartikeln nicht so gross, dass diese sich nicht durch einander bewegen und dem Keil Platz machen können. Die Belastung des Keils ist in diesem Falle also ein Mass für die gegenseitige Reibung der Partikeln oder der Viskosität, wozu natürlich die Reibung der Partikeln an der Oberfläche des Keiles kommt. Im letzteren Falle kommt diese letztgenannte Reibung an der Oberfläche des Keils nicht in Betracht, sondern was hier bestimmt wird, ist nur die Kraft, welche die Partikeln an der Durchbruchfläche zusammenhält, also die Festigkeit oder die Kohärenz.

Die Beobachtungen sind demnach, streng genommen, nicht

<sup>1</sup> Kungl. Landtbruksakademiens Tidskrift, 1912, Nr. 2, S. 119 sowie in Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. II, 1912, S. 185.

für die verschiedenen Zustände vergleichbar, doch stehen die Festigkeit und die Reibung zwischen den Partikeln in gewisser Beziehung zu einander. Die Festigkeit hängt ja von der Kraft ab, womit die Partikeln einander attrahieren, und die Reibung zwischen den Partikeln ist proportional dieser Kraft, gleichwie die Reibung im allgemeinen zwischen zwei Oberflächen dem Drucke proportional ist.

Diese Methode ist es, die hier zur Anwendung gekommen ist. Zur Belastung des Keils wurde derselbe Apparat be-

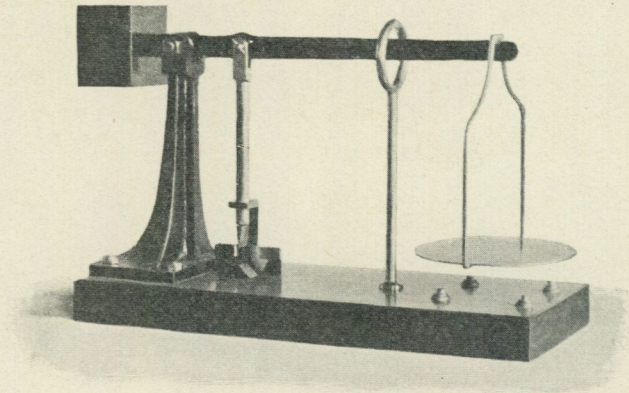


Fig. 1.

nutzt, den ATTERBERG für seine Festigkeitsbestimmungen konstruiert hat. Das Aussehen des Apparats geht deutlich aus Fig. 1 hervor. Er besteht ganz einfach aus einem Hebel, der um einen Zapfen beweglich ist, und der in einer Entfernung von  $\frac{1}{5}$  seiner Länge den Keil und am äusseren Ende eine Schale für Gewichte trägt. Das Ganze ist durch ein verschiebbares Gegengewicht ausbalanciert. Der Keil ist drehbar an dem Hebel mittelst einer ziemlich langen Stahlstange befestigt, damit die Verschiebung nach der Seite hin, welche eintritt, wenn der Hebel gesenkt wird, unbedeutend ausfällt. Die Breite des Keils beträgt 2 cm und die Winkelöffnung  $15^\circ$ . Unter dem Keil findet sich ein dreikantiges Prisma mit der Kante direkt unter der Schneide

des Keils, dazu bestimmt, die Unterlage für das Bodenprisma zu bilden, dessen Festigkeit bestimmt werden soll.

Bei sehr lockeren Böden sowie bei Festigkeitsbestimmungen im plastischen und auch flüssigen Zustande, wo eine sehr geringe Belastung des Keils erforderlich gewesen, hat sich der Apparat als zu unempfindlich erwiesen, und statt seiner

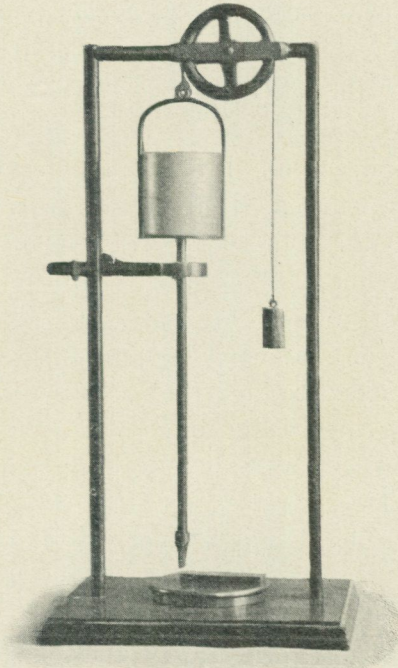


Fig. 2.

ist ein Apparat angewandt worden, dessen Aussehen aus Fig. 2 hervorgeht.

Der Keil trägt hier direkt eine Schale für das Gewicht, und ein Gegengewicht hängt an einer Schnur, die über eine leichtbewegliche Rolle läuft.

Das Verfahren ist folgendes gewesen. Von der feingeriebenen Bodenprobe wurden Sandkörner, die grösser als 0,6 mm waren, abgeseibt. Es hätte sonst nämlich geschehen können, dass die Schneide des Keils auf einem grösseren

Sandkorn zu ruhen gekommen wäre, was ja Fehler in den Bestimmungen mit sich gebracht hätte. Dass auch die kleineren Körner einen derartigen Einfluss auf das Resultat ausüben werden, wie das PUCHNER<sup>1</sup> und auch MITSCHERLICH vermuten, so dass die Schneide des Keils »durch Zufall das eine Mal überwiegend auf die Bodenkörner selbst, ein anderes Mal in die Zwischenräume zwischen den Bodenkörnern wirkt«, ist wohl wenig glaublich, da es in Anbetracht ihrer Häufigkeit das Wahrscheinlichste ist, dass die Situation ungefähr dieselbe in allen Partien der Masse sein wird. Die Übereinstimmung zwischen den einzelnen Bestimmungen ist auch gut gewesen, wenn Bestimmungen an wasserhaltiger Masse ausgeführt wurden, weniger gut, wenn die Masse getrocknet war, wobei jedoch andere Verhältnisse mitspielen.

Zu der sog. Feinerde, d. h. Partikeln von weniger als 0,6 mm Grösse, wird Wasser hinzugesetzt und die Masse wird sorgfältig mit einem Spatel bearbeitet, bis sie wohlgemischt ist und alle Aggregate zerknetet sind. Es wird so viel Wasser hinzugesetzt, dass der Teig einige wenige Prozent über die Ausrollgrenze hinauskommt, wo er dann am besten zu formen ist. Der Teig wird dann in einer Messingform zu einem Prisma von den Dimensionen  $2 \times 2 \times 19$  cm geformt, wobei Wert darauf gelegt wird, dass die Fläche, auf welche der Keil wirken wird, gleichmässig und plan ist. Von derselben Probe werden gleichzeitig 4 Prismen angefertigt.

An einem von diesen wird eine Festigkeitsbestimmung sogleich ausgeführt, und danach werden die Prismen auf einige Stunden zum Trocknen hingestellt. Währenddessen ruhen sie auf Glasstäben, so dass die Verdunstung gleichzeitig von allen Flächen her vor sich gehn kann. Vor jeder Bestimmung werden die Prismen in bedeckter Glasschale einige Zeit (die Nacht über) stehen gelassen, damit die Feuchtigkeit sich ausgleichen soll. Bei den Tonen ist nämlich die Wasserbewegung so langsam, dass das Wasser vom Innern des Prismas her nicht dasjenige zu ersetzen vermag,

<sup>1</sup> Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. III, 1913, S. 147.

das an der Oberfläche verdunstet. Bricht man daher ein Tonprisma sofort nach einige Zeit dauernder Verdunstung durch, so kann man deutlich eine äussere trocknere Schicht wahrnehmen.

Von dem Prisma werden bei den Bestimmungen Stück für Stück ungefähr 1 cm lange Stücke abgeschnitten. Bei noch feuchtem Prisma ist die Übereinstimmung so gut, dass nur zwei Stücke abgeschnitten werden, woraus die Mittelzahl erhalten wird, und die Feuchtigkeit wird an dem dazwischenliegenden Stück bestimmt. Erst bei lufttrockenen und bei 100° getrockneten Prismen wird die Übereinstimmung weniger gut. Hierbei werden zur Bestimmung der Mittelzahl mehrere Bestimmungen verwendet, der Regel nach 5—7 Stück.

Solange die Prismen sich noch innerhalb des plastischen Gebiets befanden, kam, wie erwähnt, der kleinere Apparat zur Anwendung, und der Keil wurde belastet, bis er 1 cm tief in das Prisma gesunken war. Bei Bestimmungen in diesem Zustande wird das Prisma auf eine plane Unterlage gelegt, da es zu lose ist, um gegen eine Kante zu lehnen, doch so, dass das Prisma mit dem Stück, das abgeschnitten werden soll, über den Rand der Unterlage hinausragt. Diese Vorsichtsmassregel wird beobachtet, um den Einfluss der Unterlage auf die Resultate zu vermeiden. Läge das Prisma seiner ganzen Länge nach auf der Unterlage, so würde beim Drücken des Keils die Unterlage auf das Prisma zusammenhaltend wirken, und die Reibung gegen den Keil würde um so stärker sein, je grösser der Druck wäre.<sup>1</sup>

## Die Festigkeit der Bodenarten nach dem Trocknen.

Bevor die Ergebnisse der Untersuchung über die Abhängigkeit der Festigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt mitgeteilt

<sup>1</sup> Der Einfluss der Unterlage ist von ATTERBERG nachgewiesen worden. Kungl. Landtbruksakademiens Tidskrift, 1912, S. 105.

werden, sei hier zunächst die Festigkeit der Bodenarten bei Trockenheit kurz behandelt, welche letztere ja auch als letztes Glied in den Festigkeitsreihen des Verfassers enthalten ist. Hierüber liegen verschiedene Untersuchungen vor, die den Zweck verfolgten, Zahlen für den Steifheitsgrad der Böden und damit für ihre Bearbeitungsfähigkeit zu finden. Wie weiter unten gezeigt werden wird, stehen jedoch diese beiden Momente nicht immer in direktem Verhältnis zu einander. Ein Boden kann nämlich sehr hohe Festigkeit bei vollständigem Austrocknen zeigen, während er bei auch relativ unbedeutendem Feuchtigkeitsgehalt ziemlich lose und damit leicht bearbeitbar sein kann.

Der erste, der diesbezügliche Versuche angestellt hat, war G. SCHÜBLER.<sup>1</sup> Er fertigte aus dem mit Wasser zu passender Konsistenz ausgerührten Erdteig Prismen, 4 Pariser Linien dick und breit und 2 Zoll lang, an, trocknete sie bei 50° Réaumur und bestimmte die Festigkeit mittelst eines Apparats, der dem später von ATTERBERG angewandten, wie er oben beschrieben worden ist, sehr ähnelt. Er bestand ganz einfach aus einem Hebel, der an einem gewissen Teil seiner Länge eine Schneide und an dem einen Ende eine Schale für Gewichte trug. Das Erdprisma wurde unter die Schneide gelegt und die Schale belastet, bis das Prisma zerbrach, wobei das hierzu nötige Gewicht als Ausdruck für die Festigkeit genommen wurde.

Ein Fehler, den SCHÜBLER begangen, ist der, dass er keine Rücksicht auf das Schrumpfen der Prismen genommen hat. Da die Bodenarten in sehr verschiedenem Grade schrumpfen, so werden Prismen von verschiedenen Dimensionen erhalten, womit gegeben ist, dass die Resultate nicht vergleichbar sind. Ausserdem lässt SCHÜBLER die Prismen bei der Bestimmung auf einer planen Unterlage ruhen, was auch eine Fehlerquelle in sich schliesst.

---

<sup>1</sup> Grundsätze der Agrikulturchemie. 2. Aufl., II. Teil, Leipzig 1838, S. 74.

Jochum<sup>1</sup> hat versucht, den ersten Übelstand dadurch zu vermeiden, dass er die getrockneten Prismen in einer gewissen Breite und Dicke zuschnitt, geriet aber dadurch in eine andere Fehlerquelle, indem er auf diese Weise nämlich, wie Bischoff bemerkt hat, die sog. Haut wegschnitt, die der Erfahrung gemäss die grösste Festigkeit besitzt.

F. Haberlandt<sup>2</sup> fertigte die Proben auf eine andere Weise an. Anstatt Prismen formte er Zylinder, indem er Erde in Glasröhren einstampfte. Den Erdzylinder liess er dann Wasser kapillar aufnehmen, worauf er herausgepresst und getrocknet wurde. Die Festigkeit wurde teils durch Zerschneiden des Zylinders bestimmt, teils dadurch, dass derselbe aufrecht auf das eine Ende gestellt und das andere Ende belastet wurde, bis der Zylinder zerbrach.

Ein ähnliches Verfahren, aber mit besserer maschineller Anordnung, hat H. Puchner<sup>3</sup> angewandt. Einen wunden Punkt der Methode bildet indessen das Einpressen des trockenen Bodenpulvers, da es sich als unmöglich erwiesen hat, stets dieselbe Dichtigkeit der Masse zu erhalten.

v. Piedzicki<sup>4</sup> arbeitet auch mit Zylindern, er presst aber die Erde in Glasröhren ein, nachdem er sie mit Wasser zu einem Teig von gewissem Feuchtigkeitsgehalt ausgerührt hat. Nach dem Trocknen der Erdzylinder wird die Festigkeit in der Weise bestimmt, dass ein Stahlkegel in das eine Ende des Zylinders eingepresst wird, bis derselbe zerbricht.

Ein anderes Verfahren ist von Hazard<sup>5</sup> vorgeschlagen worden, der aus 30 g mit Wasser versetzter Erde mit der Hand eine Kugel formt, die zuerst an der Luft und dann bei 110° getrocknet wird. Die Erdkugel wird dann in die eine Ecke eines gleichseitigen Dreiecks gelegt und zwei gleichgrosse Metallkugeln in die beiden anderen. Ein Brett wird darüber gelegt und darauf Gewichte, bis die Erdkugel zerbricht.

<sup>1</sup> Forsch. auf d. Geb. d. Agr.-Physik, Bd. I, 1878, S. 148.

<sup>2</sup> Bischoff, Die feuerfesten Tone, Leipzig 1904, S. 82.

<sup>3</sup> Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. III, S. 154 u. 157.

<sup>4</sup> Mitteil. d. Landwirtsch. Inst. Leipzig, H. 2, S. 3—58.

<sup>5</sup> Ramann, Bodenkunde, 3. Aufl., 1911, S. 312.

PUCHNER, der die Methode geprüft hat, bemerkt, dass eine gleichmässige Form der Kugel kaum zu erhalten ist, und dass Fehler bei Ungleichmässigkeiten der Oberfläche entstehen.

Alle die genannten Methoden genügen kaum auch nur mässigen Ansprüchen an Exaktheit. Auch mit den Verbesserungen, die ATTERBERG<sup>1</sup> eingeführt hat, kann es vorkommen, dass die einzelnen Bestimmungen an steifen Böden, wo die Festigkeit bis zu 70—80 kg beträgt, um mehrere Kilogramm von einander abweichen können. Bei leichteren Böden wird die Übereinstimmung besser.

Die Werte, die Verf. für die Festigkeit nach Trocknen der Prismen erhalten hat, erwiesen sich im allgemeinen höher als die, welche vorher für dieselben Erdproben nach ATTERBERG's Verfahren erhalten worden waren. Der Unterschied in der Behandlungsweise bestand darin, dass die Prismen erst langsam an der Luft getrocknet und dann in einen Trockenschrank bei 100° gestellt worden waren, während ATTERBERG meistens die fertigestellten Prismen direkt in den Trockenschrank ohne vorausgehendes Vortrocknen bringt. Es veranlasste mich dies, einige Versuche über den Einfluss des Vortrocknens auf die Festigkeit anzustellen, deren Ergebnisse in Tabelle 1 zusammengestellt sind. Es wurde hierzu eine Reihe Bodenarten von Kulltorp in Wassmolösa angewandt. Keine zur Klasse der sehr schweren Tone gehörige Bodenart ist hier mitgenommen worden, da nämlich Prismen aus sehr schweren Tönen zerspringen, wenn man sie direkt in den Trockenschrank stellt. Die Wasserbewegung ist hier so erschwert, dass das Wasser im Innern des Prismas bei Erhitzung in Dampf übergeht und dasselbe sprengt.

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass das Vortrocknen im allgemeinen einen erhöhenden Einfluss auf die Festigkeitszahl gezeigt hat. Ausnahmen hiervon bilden die humushaltigen Bodenarten, die humosen Motone und die humosen Moböden,

---

<sup>1</sup> Jordslagens konsistens och styfleksgrader. Kungl. Landbruksakademiens Tidskrift, 1912, S. 93.

Tab. 1. Einfluss des Vortrocknens auf die Festigkeitszahl.

Nr. und Klasse der Bodenprobe	Festigkeitszahl	
	Ohne Vortrocknen	Mit Vortrocknen
305 Schluffton . . . . .	50	66
295        > . . . . .	60	67
307 >Mo>-Ton . . . . .	46	54
306 Humoser >Mo>-Ton . . . . .	36	33
296        >        > . . . . .	22	18
301 Molehm . . . . .	18	23
300        > . . . . .	18	19
298        > . . . . .	9	10
293        > . . . . .	8	10
308        > . . . . .	8	7
310 Humoser Moboden . . . . .	6.3	6.3
304        >        > . . . . .	2.7	3.0
302        >        > . . . . .	3.0	2.3
294        >        > . . . . .	2.1	2.0
292 Humoser Sandboden . . . . .	1.3	1.3

bei denen die Festigkeitszahl bei Vortrocknen die gleiche oder sogar eine niedrigere ist.

Die Erklärung hierfür möchte ich darin erblicken, dass bei rascherem Trocknen, also bei rascherer Wasserströmung aus dem Innern des Prismas nach der Oberfläche hin, mehr von den feinsten Partikeln, dem bindenden Material, mitgerissen und an der Oberfläche abgelagert wird; letztere wird hierdurch zwar härter, gleichzeitig aber das Innere loser und die Festigkeit damit geringer. Auf diese Weise entsteht die sog. Haut, von deren Existenz man sich leicht durch Kratzen der Oberfläche mittelst eines Glasstabes überzeugen kann, wobei man deutlich fühlen kann, wie die Härte, wenn man einmal durch die äusserste Schicht hindurchgelangt ist, abnimmt. Eine bekannte Erfahrung ist auch die, dass die Erde an der Oberfläche härter (schärfer) wird, wenn sie heftigem Trocknen (Sonnenbrand) ausgesetzt wird, als wenn sie langsam trocknet. Finden sich Humusstoffe beigemischt, so die-

nen diese als Filter und sondern die im Wasser aufgeschwemmten Tonpartikeln ab.

Ein anderer Umstand, der für ein derartiges Wandern der Tonpartikeln mit dem Wasserstrom spricht, ist der, dass die Prismen bei direktem Trocknen im allgemeinen höhere Festigkeit in der Nähe der Enden als an der Mitte zeigten. Beim Trocknen werden die Enden zuerst trocken, da hier die Verdunstungsfläche grösser ist, indem die Endflächen hinzukommen, und der Wasserstrom, der stets nach der trockensten Stelle hingeht, zieht sich dorthin, aufgeschwemmte Partikeln von den zentraleren Teilen des Prismas mitführend. Diese Strömung nach den Enden hin habe ich zu verhindern versucht, indem ich mit Gummi bezogene Holzplatten an den Endflächen des Prismas befestigte, um so eine Verdunstung von diesen aus zu verhindern, und tatsächlich hatte dies eine grössere Übereinstimmung der einzelnen Bestimmungen zur Folge. Bei langsamem Trocknen der Prismen spielten diese Schutzplatten dagegen keine deutliche Rolle. Die Differenz in der Feuchtigkeit zwischen den verschiedenen Teilen des Prismas wird dann so gering, dass eine nennenswerte Wasserströmung mit dadurch bedingtem Transport von Tonpartikeln nach den Endflächen hin nicht stattfindet.

Ein derartiger Transport von Tonpartikeln spielt in der Natur eine grosse Rolle, so z. B. bei der Podsolierung und bei der Ortsteinbildung.<sup>1</sup>

*Wie wirkt der Wassergehalt beim Formen auf die Festigkeitszahl ein?* In ATTERBERG's oben angeführter Abhandlung über *Konsistenz und Steifheitsgrad der Bodenarten* findet sich die Vorschrift, dass die Prismen bei einem 2—3 % über der Ausrollgrenze oder, wenn eine solche nicht vorhanden ist, dicht über der Fliessgrenze liegenden Wassergehalt geformt werden sollen. Die Erklärung für diese Vorschrift liegt nicht nur darin, dass der Teig bei diesem Wassergehalt am besten zu handhaben ist (er klebt dann nicht, und die Prismen erhalten eine gewisse Festigkeit, was zur Folge hat,

<sup>1</sup> Siehe hierüber RAMANN, *Bodenkunde*, S. 114.

dass sie weniger leicht deformiert werden), sondern vor allem auch darin, dass die Festigkeitszahl sinkt, wenn das Prisma aus einem wasserreicheren Teig bereitet wird. So hat ATTERBERG bei einem Versuch gefunden, dass die Festigkeitszahl bis auf die Hälfte des bei dem vorgeschriebenen Verfahren erhaltenen sank, wenn das Prisma bei höherem Wassergehalt geformt wurde.

Für die vorliegende Untersuchung war es von Interesse festzustellen, wie die Verhältnisse in dieser Beziehung bei langsamem Trocknen der Prismen lagen. Um Werte für die Festigkeit auch innerhalb des plastischen Gebiets zu erhalten, haben nämlich die Prismen bei einem Wassergehalt geformt werden müssen, der höher war als der von ATTERBERG vorgeschriebene, nicht aber so hoch, dass nicht gute Prismen erhalten wurden.

Dass eine Herabsetzung der Festigkeitszahl wirklich stattfindet, habe ich bei mehreren Gelegenheiten selbst konstatieren können. Im Folgenden seien ein paar direkte Versuche mitgeteilt, die diesen Punkt beleuchten.

Aus der Bodenart Nr. 305 wurden zwei Prismen geformt, das eine bei einem Wassergehalt von 27 Prozent und das andere bei einem solchen von 18 Prozent. Das erste Prisma ergab die Festigkeitszahl 55, während das bei niedrigerem Feuchtigkeitsgehalt bereitete 66 als Festigkeitszahl ergab. Eine andere Bodenart, Nr. 295, mit den Wassergehalten 26 und 18 beim Formen der Prismen, ergab als Festigkeitszahlen 56 bzw. 66.

Die Erklärung dieser Verminderung der Festigkeit liegt in den Schrumpfungsverhältnissen. Wie weiter unten gezeigt werden wird, geht die Schrumpfung nicht so weit, wenn die Bodenart von Anfang an wasserreicher gewesen ist, d. h. die Bodenart wird in diesem Falle beim Trocknen poröser, und damit muss die Festigkeitszahl niedriger werden.

Eine so grosse Herabsetzung der Festigkeit, wie sie ATTERBERG erwähnt, habe ich jedoch nicht feststellen können. Möglicherweise hat man die Erklärung hierfür in dem Um-

stande zu suchen, dass ATTERBERG die Festigkeitszahl nach raschem Trocknen der Prismen bestimmt hat; die Differenz betreffs der Festigkeitszahl muss dann viel grösser ausfallen, da der oben angenommene Transport von Tonpartikeln nach der Oberfläche des Prismas hin leichter in einem wasserreicheren Prisma vor sich gehn wird. Dieses letztere ist poröser, da die Partikeln durch eine dickere Wasserhülle von einander getrennt liegen, ferner ist die nach der Oberfläche hinströmende Wassermenge und daher auch die transportierte Menge Tonpartikeln grösser.

Ein anderer Punkt, den ich näher untersucht habe, ist der, in welchem Grade die Festigkeitszahl von der Breite und Dicke der Prismen abhängt. Die Untersuchung geschah zu dem Zwecke, um eine Reduktion für die Schrumpfung vornehmen zu können. Die Prismen nehmen nämlich an Volumen mit der Quantität verdunsteten Wassers bis zu einer gewissen Grenze (Schrumpfungsgrenze) ab, und bei den Festigkeitsbestimmungen bei verschiedenen Wassergehalten ist es daher notwendig gewesen, bei jeder Bestimmung den Querschnitt des Prismas zu messen und dann den für die Festigkeit erhaltenen Wert auf einen solchen für ein Prisma mit einer Durchschnittsfläche von  $2 \times 2$  cm zu reduzieren.

Wie diese Reduktion auszuführen ist, hat bereits ATTERBERG angegeben.<sup>1</sup> Er kam zu dem Ergebnis, dass die Festigkeit proportional der Breite der Prismen, aber unabhängig von ihrer Dicke ist. Dass ein mehrere Zentimeter dickes Prisma dieselbe Festigkeit haben sollte wie z. B. ein nur ein paar Millimeter dickes, erscheint jedoch wenig glaublich. Die Bestimmungen sind im übrigen zu gering an Zahl, um auf Grund derselben eine Gesetzmässigkeit feststellen zu können, zumal da die Methode für Festigkeitsbestimmungen sehr unsicher ist. Es wurde daher für erforderlich erachtet, hierüber einige weitere Versuche anzustellen, deren Ergebnisse in den folgenden Tabellen dargestellt sind. Behufs Untersuchung der Einwirkung der Breite wurden die Prismen

<sup>1</sup> Kungl. Landtbruksakademiens Tidskrift, 1912, Nr. 2, S. 102.

in verschiedener Breite, aber in derselben Dicke geformt, während der Einfluss der Dicke dadurch erhalten wurde, dass die Breite konstant gehalten und die Dicke variiert wurde. Die Dimensionen wurden nach dem Trocknen der Prismen gemessen. Die Spalte für die berechnete Festigkeit enthält die Werte, die erhalten worden wären, falls Proportionalität geherrscht hätte. Bei der Berechnung wurde von der Festigkeit des grössten Prismas ausgegangen.

Tab. 2. Änderung der Festigkeit mit der Breite des Prismas.

Bodenprobe Nr.	Des Prismas		Festigkeit	
	Breite	Dicke	gefunden	berechnet
307 . . . . .	17.2	19.6	59	59
» . . . . .	15.3	19.6	48	47
» . . . . .	13.3	19.6	43	40
185 . . . . .	17.0	19.5	24	24
» . . . . .	15.9	19.3	24	23
» . . . . .	13.9	19.3	21	20
386 . . . . .	19.1	19.1	33.6	33.6
» . . . . .	14.4	18.9	24.5	25.0

Tab. 3. Änderung der Festigkeit mit der Dicke des Prismas.

Bodenprobe Nr.	Des Prismas		Festigkeit	
	Dicke	Breite	gefunden	berechnet
307 . . . . .	16.8	19.0	60	60
» . . . . .	15.1	19.0	57	54
185 . . . . .	17.3	19.0	27	27
» . . . . .	15.6	19.0	24	24
121 . . . . .	18.0	18.1	89	89
» . . . . .	14.0	18.2	82	69
» . . . . .	12.3	18.2	62	60
95 . . . . .	19.2	19.0	44	44
» . . . . .	15.8	19.0	39	36
» . . . . .	13.7	19.0	37	31
386 . . . . .	19.1	19.1	33.6	33.6
» . . . . .	15.5	19.1	26.5	27.3
» . . . . .	14.7	19.2	26.3	25.8

Die Tabelle für die Änderung der Festigkeit mit der Breite bestätigt, was ATTERBERG betreffs der Einwirkung der Breite gefunden hat, während dagegen die Tabelle über die Einwirkung der Dicke keine entsprechende Bestätigung bietet. Aus ihr geht vielmehr deutlich hervor, dass die Festigkeit mit der Abnahme der Dicke sinkt. Die Proben Nr. 185 und Nr. 386 zeigen nämlich eine vollständige Übereinstimmung zwischen gefundenen und berechneten Festigkeitszahlen. Betreffs der Bodenprobe Nr. 386, die einen etwas humushaltigen Boden darstellte, verdient hier erwähnt zu werden, dass diese eine ungewöhnlich gute Übereinstimmung zwischen den einzelnen Bestimmungen ergab, weshalb den für sie erhaltenen Resultaten das grösste Gewicht beizumessen ist.

Dass die übrigen in der Tabelle aufgeführten Bodenarten, die mehr tonhaltig sind, höhere Festigkeitswerte als die berechneten zeigen, erklärt sich aus dem Umstande, dass die Festigkeit zu einem nicht unwesentlichen Teil bei diesen ihren Sitz in der Oberflächenschicht, der »Haut«, hat. Wird die Breite vermindert, so nimmt auch gleichzeitig die Fläche, auf die der Keil einwirkt, und im übrigen auch die Durchbruchfläche völlig proportional ab, weshalb auch Proportionalität zwischen den Festigkeitszahlen bei verschiedener Breite besteht; wird dagegen die Breite konstant gehalten und nur die Dicke des Prismas vermindert, so bleibt die Fläche, auf die der Keil einwirkt, unverändert, und die Abnahme der Festigkeit beruht dann lediglich auf der Verminderung der Grösse der Bruchfläche.

Bei den folgenden Bestimmungen der Festigkeit bei verschiedenen Wassergehalten ist für Schrumpfung sowohl an Breite als an Dicke reduziert worden. Wenn die Reduktion in gewissen Fällen nicht völlig korrekt hat bewerkstelligt werden können, so spielt dies doch eine geringere Rolle, da der Hauptzweck der Untersuchung der gewesen ist, zu konstatieren, wie die Festigkeit mit dem Wassergehalt variiert.

Um schliesslich eine Vorstellung von der Genauigkeit der an getrockneten Proben ausgeführten Festigkeitsbestimmungen zu geben, seien nachstehend die Primärzahlen für ein paar Bestimmungen angegeben; teils für einen sehr schweren Ton mit weniger guter Übereinstimmung, teils für die obenerwähnte Bodenart Nr. 386, bei der die Übereinstimmung besser ist.

Festigkeitszahlen für Nr. 309: 77, 68, 67, 57, 67, 61, 76.

» » Nr. 386: 27.5, 27.0, 25.0, 26.5, 26.5,  
26.5, 26.0.

Bei Bestimmungen an wasserhaltigem Prisma ist die Übereinstimmung eine bessere. Bei niedrigeren Festigkeitsgraden ist sie so gut, dass der Mittelwert in Zehnteln angegeben werden kann.

### Die Festigkeit bei verschiedenen Wassergehalten.

Die Abhängigkeit der Festigkeit von dem Wassergehalt ist bereits früher Gegenstand von Untersuchungen zuerst von F. HABERLANDT<sup>1</sup> und später von H. PUCHNER<sup>2</sup> gewesen. Diese Untersuchungen sind jedoch ausschliesslich an sozusagen künstlichen Böden angestellt worden, an reingeschlammten Sandkörnergruppen sowie an Mischungen zwischen diesen und an Mischungen einer gewissen Körnergruppe mit besonders präpariertem Humus oder auch unter Beimischung von aus Kaolin ausgeschlammten Tonpartikeln. In seiner letzten Abhandlung betont PUCHNER<sup>3</sup> selbst, dass die an diesen künstlichen Bodenarten gewonnenen Resultate nur für die fraglichen Versuchsbodenarten Gültigkeit besitzen und nicht ohne weiteres auf alle natürlichen Böden übertragen werden können. Systematische Untersuchungen an natürlichen Bodenarten sind zuvor meines Wissens nicht ausgeführt worden,

<sup>1</sup> Forsch. a. d. Geb. d. Agr.-Physik, Bd. I, 1878, S. 148.

<sup>2</sup> Ebenda, Bd. XII, H. 3 u. 4, 1889.

<sup>3</sup> Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. III, H. 2—3, 1913.

wenn man einige von ATTERBERG<sup>1</sup> herrührende Bestimmungen ausnimmt, die jedoch zu gering an Zahl sind, als dass sie anders als in sehr groben Zügen die Abhängigkeit der Festigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt erkennen liessen.

Sowohl HABERLANDT's als PUCHNER's Verfahren waren dieselben, die die genannten Forscher bei ihren Festigkeitsbestimmungen an getrockneten Proben angewandt hatten, und die oben S. 17 erwähnt worden sind. Der Hauptzweck der Untersuchungen beider war der, festzustellen, bei welchem Wassergehalt der Boden am leichtesten zu bearbeiten ist. HABERLANDT hatte zu finden geglaubt, dass der Boden bei einer gewissen mittleren Feuchtigkeit die niedrigste Festigkeit habe und demzufolge den Geräten den geringsten Widerstand darbot, und er betont die Wichtigkeit für die Landwirte, die verschiedenen Bodenarttypen auf ihre Festigkeit hin zu untersuchen, um den für die Bearbeitung günstigsten Feuchtigkeitsgehalt zu bestimmen, bei dem die Bearbeitung mithin unter Aufwendung mindestmöglicher Kraft vorgenommen werden könne.

PUCHNER hat dagegen gezeigt, dass ein solches Minimum der Festigkeit nicht existiert. Nach ihm steigt die Festigkeit bei Tonboden proportional mit der Abnahme der Feuchtigkeit. Sandboden zeigt dagegen ein Maximum der Festigkeit bei einer mittleren Feuchtigkeit, von der aus die Festigkeit sowohl nach geringerem als nach grösserem Wassergehalt zu abnimmt. PUCHNER betont auch, dass man bei der Feststellung des geeignetsten Zeitpunktes für die Bearbeitung des Bodens nicht so sehr Rücksicht auf den Kraftverbrauch als vielmehr darauf zu nehmen hat, dass der Boden den physikalischen Zustand erlangt hat, dass er sich bei der Bearbeitung lockert.

Von besonderem Interesse in PUCHNER's Untersuchung ist die experimentelle Feststellung eines Festigkeitsmaximums bei den Sandarten bei einer mittleren Feuchtigkeit. Zwar ist es eine allgemein bekannte Sache, dass feuchter Sand

<sup>1</sup> Kungl. Landtbruksakademiens Tidskrift, 1912, S. 119 sowie Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. II, 1912, S. 185.

eine grössere Festigkeit besitzt als trockener. So kann feuchter Sand eine gewisse Form behalten, zerfällt dagegen zu Pulver, wenn er eine gewisse Trockenheit erlangt hat. Ein anderes bezeichnendes Beispiel für dieselbe Sache, das von HALL<sup>1</sup> angeführt wird, ist die verschiedene Festigkeit des Sandes in verschiedenen Niveaus an einer sandigen Küste. »Über der Uferlinie findet sich ein Gebiet mit trockenem und beweglichem Sand, worin der Fuss einsinkt, danach, nahe dem Wasser, ein anderes Gebiet gleichfalls mit sehr beweglichem Sand, woselbst die Sandkörner vollständig von Wasser umgeben sind. Zwischen diesen beiden fühlt sich der Sand, obwohl von ganz derselben Natur, doch fest für den Fuss an.« Hier hat der Sand eben den für das Maximum der Festigkeit erforderlichen Wassergehalt.

Die Erklärung hierfür hat auch PUCHNER geliefert, indem er das Festigkeitsmaximum als dadurch verursacht ansieht, dass bei einem gewissen Feuchtigkeitsgehalt Wassermenisken zwischen den Körnern entstehen, die diese zusammenhalten. Bei höherem Wassergehalt liegen die Sandkörner vollständig in Wasser eingebettet, und keine zusammenhaltenden Wassermenisken zwischen den Körnern können dann vorkommen.

Man kann sich nun fragen: muss nicht bei den übrigen Bodenarten, z. B. bei den Tonen, wo zwar die Poren äusserst fein sind, doch aber Menisken entstehen müssen, bei einem gewissen Feuchtigkeitsgrad ein entsprechendes Verhältnis eintreten? Aus den bisher ausgeführten Festigkeitsbestimmungen an Tonen geht nicht hervor, dass ein analoges Verhältnis bei ihnen statthat. Wie oben erwähnt, hatte PUCHNER gefunden, dass die Festigkeit bei Tonen proportional der Abnahme der Feuchtigkeit zunahm. In seinem Buche *Le Sol*, a. a. O., vermutet jedoch HALL, dass dem Festigkeitsmaximum bei den Sandarten ein gewisser physikalischer Zustand bei den Tonen entspricht. Er sagt hierüber: »Es giebt ein Stadium beim Trocknen des Tons, in welchem er in Stücke zerfällt, wenn man ihn bearbeitet;

<sup>1</sup> A. D. HALL et A. DEMOLON, *Le Sol*, Paris 1906, S. 134.

dieses Stadium repräsentiert wahrscheinlich das analoge Stadium beim Sande bei partieller Durchfeuchtung, in welchem die Kohäsion durch Wassermenisken verursacht wird.» Ich hoffe im Folgenden klarstellen zu können, wie es sich hiermit verhält.

Die Untersuchung bezweckt gleichzeitig zu veranschaulichen, inwieweit die mechanische Analyse mit Verteilung der Körner in Gruppen nach ATTERBERG's System einen Ausdruck für die physikalischen Eigenschaften der Bodenarten, insbesondere ihre Festigkeit, liefern kann.

Betreffs des Verfahrens bei der mechanischen Analyse ist hier vielleicht zu erwähnen, dass die alte Methode, nach welcher der Boden vor dem Schlämmen mit Säure und Lauge behandelt wurde, aufgegeben ist, und dass stattdessen der Boden vor dem Schlämmen mit einer kräftigen Bürste gemäss BEAM's<sup>1</sup> Vorschrift bearbeitet wird. Diese Behandlung ergibt, wie sich gezeigt hat, hinreichend reine Schlämmpunkte, um verwendet werden zu können.

Für die verschiedenen Kornsortimente wendet ATTERBERG folgende Terminologie und Einteilung an:

<i>Kies</i> . . . . .	20—2 mm
<i>Sand</i> . . . . .	2—0,2 »
<i>Mo</i> . . . . .	0,2—0,02 »
<i>Schluff</i> . . . . .	0,02—0,002 »
<i>Ton</i> . . . . .	< 0,002

### Sandsortierungen.

Die nachstehend untersuchten Sandsortierungen sind aus Bodenproben ausgeschlämmt, die vor dem Schlämmen mit Säure und Lauge behandelt worden waren. Die Oberfläche der Körner ist hierdurch von möglicherweise anhaftenden Verwitterungsprodukten befreit worden, die sonst die

<sup>1</sup> BEAM, Fourth report of the *Welcome*, Tropical Researches Laboratories, Sudan 1911, S. 37.

Festigkeit beeinflusst hätten, so dass das Verhältnis derselben zur Korngrösse mehr oder minder undeutlich hervorgetreten wäre.

Die nachstehende Tabelle sowie die Festigkeitskurven, Tafel I, Bild 1, illustrieren die Änderungen der Festigkeit mit dem Wassergehalt bei den verschiedenen Sortierungen.

K o r n g r ö s s e							
0.1—0.03		0.03—0.01		0.01—0.003		< 0.003	
Feuchtigk.	Festigk.	Feuchtigk.	Festigk.	Feuchtigk.	Festigk.	Feuchtigk.	Festigk.
0	0	0	0.05	0	0.3	0	3.4
0.6	0.04	1.3	0.2	0.3	0.4	1.2	2.9
8.6	0.4	9.9	1.1	2.1	0.6	2.6	2.8
11.0	0.4	11.5	1.0	11.3	1.9	21.9	3.8
14.6	0.5	17.5	1.4	14.2	2.3	27.1	3.6
16.1	0.6	18.5	1.3	17.8	2.7	37.1	3.7
18.0	0.8	19.5	1.5	21.8	2.6	41.4	3.3
18.3	0.4	22.5	1.4	24.7	3.5	45.2	3.9
—	—	—	—	26.1	1.4	47.7	1.5

Aus den Kurven geht deutlich die charakteristische Eigenschaft der Sandarten hervor, sehr rasch aus flüssigem in festen Zustand überzugehen und umgekehrt. Hat der Sand seine grösste Festigkeit erreicht, so genügt ein ganz unbedeutender Zusatz von Wasser, um die Festigkeit plötzlich sinken zu lassen. Bei Verminderung des Wassergehalts dagegen sinkt die Festigkeit nur allmählich von ihrem Maximalwert herab. Dieser letztere liegt für die verschiedenen Sortierungen bei folgenden Wassergehalten:

Korngrösse	Max. Festigkeit
0.1 — 0.03	18.0
0.03—0.01	22.5
0.01—0.003	24.7
< 0.003	45.2

Je feiner demnach die Sortierung ist, bei um so höherem Wassergehalt liegt die grösste Festigkeit. PUCHNER hat, wie bereits S. 25 erwähnt, Festigkeitsbestimmungen an Sand-sortierungen bei verschiedenen Wassergehalten vorgenommen und gleichfalls ein Maximum der Festigkeit bei einer gewissen mittleren Feuchtigkeit gefunden, dieses Maximum liegt aber nach PUCHNER für die feinkörnigeren Sandarten bei einem niedrigeren Feuchtigkeitsgrad als für die gröberen, demnach entgegengesetzt den hier erhaltenen Befunden. Aus PUCHNER's Festigkeitsreihen geht hervor, dass die grösste Festigkeit für die verschiedenen Sandsortierungen bei folgenden Wassergehalten liegt:

Korngrösse	Max. Festigkeit
2.0—1.0	13.6
1.0—0.5	14.7
0.5—0.25	16.0
0.25—0.171	16.0
0.171—0.114	17.0
0.141—0.071	12.0
0.071—0.01	6.2

Dass PUCHNER von den meinigen abweichende Werte erhalten hat, ist wohl auf die Verschiedenheit der Methoden zurückzuführen. Bei diesen Bestimmungen ist PUCHNER so zuwege gegangen, dass ein Keil 1 cm tief in den Sand, der in einer Schale placiert war, eingedrückt wurde. Hierbei hat natürlich eine beträchtliche Reibung überwunden werden müssen, da die Wände der Schale zusammenhaltend auf die Masse gewirkt haben müssen, so dass der Spaltenbildung bei der Belastung des Keils entgegengewirkt wurde. Dass eine erhebliche Reibung zustande gekommen ist, hält auch PUCHNER selbst für wahrscheinlich. Er fand nämlich, dass bei der Sandsortierung 0,071—0,01 der Keil bis zu 2,47 kg Belastung brauchte, um hinabzusinken, wenn der Sand in lufttrockenem Zustande war, was vollständig der Reibung zuzuschreiben ist, da genau genommen keine Belastung hätte

notwendig sein sollen, indem trockener Sand keine Festigkeit besitzt. Bei der von mir angewandten Methode, Spaltung eines Prismas, tritt keine Reibung auf, wenn das Prisma die Trockenheit erreicht hat, dass es bei der Belastung des Keils plötzlich zerbricht.

Die Lage der höchsten Festigkeit, wie ich sie gefunden habe, fällt mit dem Zustande zusammen, wo die Poren des Sandes eben mit Wasser angefüllt sind und die Sandkörner an einander lehnen, so dass bei einer weiteren Verminderung des Wassergehalts die Körner einander nicht näher rücken können, sondern die Poren einen Teil des Wassers abgeben müssen. Man erkennt dies daran, dass hellere Partien in der Masse entstehen, die Farbe umschlägt. Den entsprechenden Zustand hat VAN BEMMELEN bei den Gelen den *Umschlagspunkt* genannt. *Das Festigkeitsmaximum der Sandarten liegt somit bei dem Umschlagspunkt.* Weiter unten wird dieser Zusammenhang noch näher erörtert werden. Wie wir sehen werden, kommt gerade ein Knie in der Festigkeitskurve der Böden an dem Umschlagspunkt zu liegen.

Man sollte erwarten, dass das Festigkeitsmaximum oder der Umschlagspunkt bei demselben Wassergehalt für die verschiedenen Sortierungen läge, da der Wassergehalt an dem Umschlagspunkt das Porenvolumen angeben muss, und dieses geometrischen Berechnungen gemäss, die Körner als kugelförmig angenommen, unabhängig von der Korngrösse ist. Bei Bestimmung des Porenvolumens bei Sandsortierungen hat auch ATTERBERG<sup>1</sup> dasselbe nahezu konstant gefunden, unabhängig von dem Feinheitsgrad. Er fand für die gröberen Sortierungen ein Porenvolumen von 40,5 Volumprozent, nur für die zwei feinsten Sortierungen 0,02—0,01 und 0,01—0,005 ein etwas höheres Porenvolumen, nämlich 42,5 Volumprozent.

Im Gegensatz hierzu zeigen die mitgeteilten Kurven, Tafel I, Bild 1, indessen, dass der Umschlagspunkt für die feinkörnigeren Sortierungen bei höherem Wassergehalt liegt, für die Sor-

<sup>1</sup> Versuchsstationen, Bd. 69, 1908, S. 105.

tierung mit Partikeln unter 0,003 mm sogar so hoch wie bei 45,2 Gewichtsprozent. Das Resultat stimmt mit den Werten überein, die WOLLNY<sup>1</sup> für das Porenvolumen gefunden hat. Nach ihm beträgt das Porenvolumen für die

Sortierung	2—1	mm	. . . . .	38,2	Volumprozent
»	1—0,5	»	. . . . .	39,1	»
»	0,5—0,25	»	. . . . .	40,6	»
»	0,25—0,17	»	. . . . .	41,3	»
»	0,17—0,11	»	. . . . .	43,6	»
»	0,11—0,07	»	. . . . .	46,9	»
»	0,07—0,01	»	. . . . .	47,9	»

Die Reihe zeigt eine ziemlich starke Zunahme des Porenvolumens mit dem Feinheitsgrad.

Da der Umschlagspunkt und damit das Porenvolumen sich bei den Sandarten sehr leicht direkt dadurch bestimmen lässt, dass man den Wassergehalt bestimmt, bei welchem der Sand plötzlich erhärtet, so sind einige derartige Bestimmungen ausgeführt worden. Hierbei wurde so verfahren, dass das Sandpulver mit Wasser in einer Schale verrührt und dann trockenes Pulver in kleinen Portionen unter Bearbeitung der Masse mit einem Spatel hinzugesetzt wurde, bis dieselbe plötzlich erhärtete, worauf dann der Wassergehalt bestimmt wurde. Nachstehend seien auch die einzelnen Bestimmungen angeführt, um eine Vorstellung von der Genauigkeit zu geben. Leider hat nicht dasselbe Material wie zu den Festigkeitsbestimmungen angewandt werden können, da die Sandproben nach der 2-Zahl neusortiert wurden. Das Resultat weist in dieselbe Richtung wie die Kurven.

Sortierung	0,2 — 0,06	mm	23,5, 23,3	Mittel	23,4	Gewichtsprozent
»	0,06 — 0,02	»	26,5, 26,2	»	26,3	»
»	0,02 — 0,006	»	27,8, 27,2	»	27,5	»
»	0,006 — 0,002	»	31,5, 31,0	»	31,2	»

<sup>1</sup> Forsch. a. d. Geb. d. Agr.-Physik, Bd. VIII, 1886, S. 368.

Eine andere Sache, die bezüglich der Festigkeit der Sand-sortierungen einige Aufmerksamkeit verdient, ist ihre Festigkeit bei Trockenheit. Nach der gewöhnlichen Definition von Sand soll derselbe bei Trockenheit keine Festigkeit besitzen. Die grösste hier berücksichtigte Sortierung, 0.1—0.03, zeigt keine Festigkeit, während die nächstfolgende, 0.03—0.01, eine Festigkeit von 0.05 kg zeigt, eine so unbedeutende, dass sie praktisch als 0 betrachtet werden kann. Wären nicht feinere Partikeln als bis zu 0.02 mm, der Grenze, die ATTERBERG zwischen Mo und Schluff aufgestellt hat, bei dieser Sortierung berücksichtigt worden, so wäre man natürlich dem Festigkeitsgrade 0 noch näher gekommen. Mo kann demnach zu den Sandsorten gerechnet werden und bezeichnet den feinsten Sand, zu dem ihn auch ATTERBERG aus anderen Gründen rechnet.<sup>1</sup>

### Gewöhnliche Sandböden.

Bei dem folgenden Bericht über die Festigkeit natürlicher Böden ist es zweckmässig gewesen, die untersuchten Böden in Klassen nach ATTERBERG'S Klasseneinteilung zu vereinigen. Es wird sich dabei zugleich herausstellen, ob die Klassen natürliche sind, insofern die zur selben Klasse gehörigen Böden auch gleichartige Festigkeitskurven aufweisen. Die Klassen werden jedoch hier in entgegengesetzter Reihenfolge behandelt, so dass der Anfang mit den losen Böden, der Klasse *Moböden und Sandmoböden* (= *gewöhnliche Sandböden*), gemacht wird.

Von dieser Klasse ist nur eine Bodenart, Nr. 258, die ein Moboden ist, untersucht worden. Sie besass folgende mechanische Zusammensetzung:

	Plastizitätszahl	Fließgrenze	Festigkeitszahl	Mech. Zusammensetzung				
				Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus
258 Schwemmsand, Kalmar . . .	0	19	2.4	32.4	59.2	2.0	5.8	0.6

<sup>1</sup> Versuchsstationen, Bd. 69, 1908, S. 127 u. 137.

Wassergehalt	Festigkeit
0	2.4
0.4	1.7
5.3	0.4
8.8	0.2
13.2	0.2
14.9	0.2
15.8	0.2
19.7	0.3
21.6	0.1

Bei dem Umschlagspunkt O zeigt die Kurve (Tafel I, Bild 2) noch niedrigere Festigkeit als selbst die grösste der reinen Sandsortierungen, die Sortierung 0.1—0.03, was auf gröberes Material bei dieser Bodenart hindeutet. Dass die Fliessgrenze hier bei niedrigerem Wassergehalt (19) liegend befunden worden ist als der Umschlagspunkt (19.7), ist wohl auf Bestimmungsfehler zurückzuführen, da bei Fliessgrenzbestimmungen an grobkörnigen Böden dadurch Fehler entstehen können, dass das Wasser in den grossen Poren leichtbeweglich ist. Nach Trockenheit hin zeigt die Kurve einen Anstieg bis zur Festigkeit 2.4, offenbar verursacht durch eine Beimischung eines Bindemittels, nämlich Ton, der nach der Analyse in einer Menge von 5.3 Prozent vorhanden ist. Es fragt sich da, ob diese Bodenart rechtmässigerweise zu den Sandböden zu rechnen ist, für die ja verlangt wird, dass sie bei Trockenheit keine Festigkeit besitzen. Um so grobkörnige Böden wie die hier fragliche in die Klasse der Sandböden einordnen zu können, hat ATTERBERG von der älteren Definition des Sandbodens abgehn und für die Klasse eine Festigkeitszahl bis einschliesslich 7 einräumen müssen. Gewisse Gründe sprechen jedoch gegen die Zweckmässigkeit dieser Änderung der Begriffe, worauf weiter unten in dem Abschnitt *Vorschläge zu einer Klassifikation* näher einzugehn sein wird.

**Schluffböden und Moschluffböden.**

Zu dieser Klasse rechnet ATTERBERG diejenigen Böden, deren Festigkeitszahlen unter 7 liegen, und die Schluff als überwiegenden Bestandteil enthalten. Die diesbezüglichen Böden sind alle von den Einsendern als Fließlehme bezeichnet worden, d. h. sie haben die Neigung, in flüssigen Zustand überzugehen, und bereiten daher grosse Schwierigkeiten beim Drainieren und bei der Anlage von Bauten, für welche letztere sie einen sehr unsicheren Grund abgeben.

Nur zwei Bodenarten sind hier zur Untersuchung gekommen. Zwei andere hierhergehörige humushaltige Böden sind gleichfalls untersucht worden, werden aber erst im Zusammenhang mit den Festigkeitskurven der übrigen humushaltigen Böden behandelt werden.

		Plastizitätszahl	Fließgrenze	Festigkeitszahl	Mech. Zusammensetzung				
					Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus
328	Fließlehm, <sup>1</sup> Värmland . . . .	0	22	5.4	—	25.5	58.5	16.0	—
90	» , Ramsjö . . . .	0	19	1.4	2.4	40.8	46.2	9.3	1.3

Nr. 328		Nr. 90	
Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit
0	5.4	0	1.4
1.0	3.0	0.7	1.1
2.7	2.0	2.2	0.8
12.3	3.0	6.4	1.5
14.7	2.7	12.1	1.5
18.9	2.5	16.6	2.4
22.2	2.0	18.2	2.1
25.6	0.7	18.3	1.3
—	—	21.7	0.1

<sup>1</sup> Von dieser Bodenart sagt der Einsender Dir. RHODIN, dass sie wie Sirup in den Gräben floss.

Die hierhergehörigen Kurven (Tafel I, Bild 3) gleichwie alle nachfolgenden sind, was die Festigkeit betrifft, in kleinerem Masstabe als die bisher mitgeteilten, nämlich in 5 mal so kleinem, wiedergegeben, was bei einem Vergleich mit den genannten Kurven in Betracht zu ziehen ist. Die Kurven ähneln sehr der für die feineren reingeschlämmten Kornsortierungen auf Tafel I, Bild 1, gegebenen, mit einem geradlinigen Verlauf vom Umschlagspunkte nach Trockenheit hin und mit nach dieser letzteren hin abnehmender Festigkeit. Vom Umschlagspunkte an zeigen die Kurven bei zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt eine sehr rasche Abnahme der Festigkeit bis herab zu flüssigem Zustand. Fließgrenze und Umschlagspunkt fallen daher bei diesen Bodenarten nahezu zusammen (vgl. die Tabelle und die Kurve). Nur ein unbedeutender Zusatz von Wasser ist bei dem Boden im Stadium der grössten Festigkeit erforderlich, damit er in fließenden Zustand übergehe. Hierin liegt eben das Charakteristische für die sog. Fließlehme.

Man sollte eigentlich erwarten, dass die ziemlich hohen Tongehalte den Boden fester, bindiger, besonders bei Trockenheit, machen sollten, wie dies der Fall bei dem Ton in der oben mitgeteilten Sandbodenart ist. Dass es nicht geschieht, beruht darauf, dass der »Ton« der Analysentabelle nicht wirklich bindender Ton ist, sondern seiner Korngrösse und damit seinen Eigenschaften nach sich der Gruppe Schluff nähert, somit der reingeschlämmten Korngruppe  $< 0.003$  vergleichbar ist, bei der die allerfeinsten Partikeln bei der Behandlung mit Säure und Lauge aufgelöst worden sind.

Um die Grobkörnigkeit des »Tons« direkt zu konstatieren, sind Schlämmungen mit längerer Absetzungszeit an einigen hierhergehörigen Bodenarten sowie an einigen anderen, die gleichfalls trotz relativ hohen Tongehalts nicht die Eigenschaften der Tone in erwartetem Grade aufwiesen, vorgenommen worden. Eine solche Schlämmung mit 64-stündiger Absetzungszeit und 10 cm Flüssigkeitssäule, wobei nach ATTERBERG Körner kleiner als  $0.6 \mu$  abgesetzt werden, ergab für die Bodenart Nr. 90 das Resultat, dass von den 9.3 Pro-

zent »Ton» nur 0.3 Prozent unter 0.6  $\mu$  lag. Dieselbe Zerlegung einer anderen dieser Klasse zugehörigen Bodenart, Nr. 89, Trehörningssjö, welche die Zusammensetzung

Mo . .	6.3 %	hatte,	ergab	bei	neuer	Zerlegung:	Mo . .	6.3 %
Schluff	59.0	»	»	»	»	»	Schluff	59.0
Ton	. 33.0	»	»	»	»	»	Ton	{ 2 $\mu$ — 0.6 $\mu$ 26.6
								< 0.6 $\mu$ 6.4
Humus	1.7	»	»	»	»	»	Humus	1.7

Die letztere Zerlegung zeigt deutlicher als die erste, dass die fragliche Bodenart der Klasse der Schluffböden zuzuweisen ist.

### Molehme und Sandmolehme.

Mit dieser Klasse beginnt eine Reihe Böden, die ATTERBERG als Übergangsformen zwischen Sandböden und wirkliche Tone gestellt, und die er als Lehme bezeichnet hatte. Als hauptsächlichsten Bestandteil enthalten sie Mo oder Schluff und im übrigen so viel Ton, dass ihre Festigkeitszahl 7 übersteigt, aber doch nicht hinreichend, um sie plastisch in dem Sinne zu machen, den ATTERBERG dem Begriff Plastizität beilegt, nämlich im Sinne von Ausrollbarkeit. Die Ausrollbarkeit ist demnach die Eigenschaft, die die diesbezüglichen Bodenarten von den wirklichen Tonen abgrenzt. Ihre Grenze gegenüber den Sandböden ist durch die Festigkeitszahl 7 bezeichnet. Den Lehmen entsprechen nach ATTERBERG im Englischen die *Loams*, im Französischen die *Limons*.

Die hierhergehörigen Bodenarten sind in zwei Klassen, *Molehme* (*Sandmolehme*) und *Schlufflehme*, eingeteilt, je nachdem Mo oder Schluff in ihrer Zusammensetzung vorherrscht. Wir behandeln zunächst einige Molehme.

		Plastizitätszahl	Fließgrenze	Festigkeitszahl	Mech. Zusammensetzung				
					Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus
<i>Molehme:</i>									
109	Svartingstorp . . . . .	0	18	36	1.3	72.6	11.7	14.4	—
301	Wassmolösa . . . . .	0	20	26	4.6	70.2	16.6	8.4	—
107	Blekinge (kaolinhaltig) . . . . .	0	23	16	21.1	45.3	19.6	14.0	—
363	Böhmen . . . . .	0	26	10	25.1	40.8	15.3	19.0	—
361	„ . . . . .	0	21	26	36.8	32.2	14.7	16.4	—

Nr. 109		Nr. 301		Nr. 107		Nr. 363		Nr. 361	
Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit
0	35.7	0	26.2	0	16.5	0	9.7	0	26.2
0.7	26.7	1.1	16.0	0.4	12.4	2.2	8.0	1.7	12.4
1.8	19.0	4.9	3.4	2.3	6.6	3.2	5.3	3.0	10.2
5.1	9.5	9.3	1.4	5.0	5.2	9.2	3.0	6.7	6.1
8.0	4.8	14.3	1.2	8.0	5.2	14.4	2.9	8.4	4.8
10.1	3.4	17.0	1.2	9.8	5.2	15.7	2.9	14.3	3.0
12.0	2.4	18.7	0.5	13.4	4.0	21.0	2.3	18.3	1.8
14.9	2.0	20.8	0.2	14.3	3.5	25.9	0.3	20.8	0.3
16.6	1.3	—	—	17.5	1.8	—	—	—	—
18.6	0.5	—	—	19.8	1.0	—	—	—	—
21.3	0.2	—	—	21.0	0.5	—	—	—	—

Das Charakteristischste für diese Böden ist ihre geringe Festigkeit in feuchtem Zustande, dagegen ungewöhnlich hohe Festigkeit bei Trockenheit. So z. B. zeigen die Kurven für Nr. 301 und Nr. 109 (Tafel I, Bild 4) beim Umschlag eine ziemlich unbedeutende Festigkeit von nur 1 bzw. 2 kg, bei Trocken aber eine Festigkeit von bis zu 26 und 36 kg. Infolge der grobkörnigen Natur der Böden sind die Poren relativ weit, und die Wassermenisken, die die Partikeln in feuchtem Zustande zusammenhalten, erhalten in grösseren Poren eine geringere Krümmung, womit ihre zusammenhaltende Kraft geringer wird. Bei Trockenheit dagegen wird die hohe Festigkeit durch

Tonpartikeln verursacht, die man als der Oberfläche der grösseren Körner aufgelagert und diese verbindend annehmen muss.

Der Umschlagspunkt liegt bei den Böden dieser Klasse bei ziemlich niedrigem Wassergehalt, d. h. das Porenvolumen ist relativ klein. Der Umschlagspunkt ist im übrigen in den Kurven wenig markiert. Die Kurve für Nr. 363 erweist diese Bodenart als eine Übergangsform zur nächsten Klasse, sowohl was die ziemlich hohe Lage des Umschlagspunktes als was die relativ unbedeutende Steigerung der Festigkeit nach Trockenheit hin betrifft.

### Schlufflehme.

	Plastizitätszahl	Flie遶grenze	Festigkeitszahl	Mech. Zusammensetzung						
				Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus		
<i>Schlufflehme:</i>										
111 Fliesslehm, Forse, Ängermanland . . . . .	0	24	16	—	12.0	56.0	32.0	—		
<i>Moschlufflehme:</i>										
185 Fliesslehm, Johannishus, Blekinge . . . . .	2	24	34	—	28.4	50.4	21.0	0.2		
117 Kosta, Småland . . . . .	0	21	6.5	0.7	32.5	48.0	18.8	—		

Nr. 111		Nr. 185		Nr. 117	
Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit
0	16.0	0	34.0	0	6.5
1.0	9.5	1.1	23.5	0.8	5.6
1.6	8.3	2.6	15.6	6.1	3.8
10.9	4.4	4.0	12.2	7.8	3.5
16.6	4.0	6.8	9.5	9.5	3.7
19.7	3.1	11.2	5.4	11.3	3.3
21.5	0.7	16.6	3.7	12.7	3.2
24.9	0.2	18.3	3.4	13.7	3.2
—	—	21.8	1.0	14.1	3.3
—	—	—	—	17.4	2.5
—	—	—	—	19.6	0.9

Auch diese Klasse umfasst Böden, die als Fliesslehme gleich den Schluffböden auftreten, mit denen sie nahe überein-

stimmen. Der Unterschied ist nur der, dass die hierhergehörigen Böden etwas mehr wirklichen Ton enthalten, was eine etwas höhere Festigkeit zur Folge hat.

Die einzige für die Klasse typische der hier untersuchten Bodenarten ist Nr. 111, die ihren Umschlagspunkt (Tafel I, Bild 5) bei hohem Wassergehalt, 21 Prozent, und eine geringe Steigerung der Festigkeit nach Trockenheit hin hat. Schon hieraus lässt sich vermuten, dass der hohe »Ton«-Gehalt, der nach der Analysentabelle 32 Prozent beträgt, nur zu einem unbedeutenden Teil aus wirklichem Ton bestehen wird. Eine vorgenommene Schlämmung von 64 Stunden zeigte auch, dass nur 7.2 Prozent unter der Grenze  $0.6 \mu$  lagen.

Nr. 117 gehört eigentlich zu den Schluffböden, da die Festigkeitszahl nicht ganz 7 erreichte, mit welcher Klasse sie auch im übrigen vollkommen überstimmt. Ebenso ist auch Nr. 185 nicht der hier behandelten Klasse zuzurechnen. Der starke Anstieg der Festigkeitskurve mit abnehmender Feuchtigkeit deutet auf einen ziemlich hohen Gehalt an Bindemittel, d. h. Ton, und eine Prüfung auf Ausrollplastizität ergab auch, dass der Tongehalt ausreichend war, um der Bodenart plastische Eigenschaften, wenn auch in unbedeutendem Grade (Plastizität 2), zu verleihen; die Bodenart ist daher zu den ausrollplastischen zu rechnen oder als eine Übergangsform zu diesen anzusetzen. Obwohl sie von dem Einsender als Fließlehme bezeichnet worden ist, deutet doch der in der Kurve wenig markierte Umschlagspunkt darauf hin, dass die Fließeigenschaft jedenfalls wenig ausgesprochen ist.

Bei Nr. 111 liegt der Umschlagspunkt bei höherem Wassergehalt als bei den beiden letzterwähnten Bodenarten. Die erstere besteht aus einem besser sortierten Material, nämlich aus Partikeln, die hauptsächlich derselben Korngruppe, Schluff, angehören, während die beiden anderen ihrer Korngrösse nach mehr variieren, was eine Verminderung des Porenvolumens zur Folge haben muss, da die kleineren Körner sich in die Zwischenräume zwischen den grösseren einlagern.

## Motone.

	Plastizitätszahl	Ausrollgrenze	Fließgrenze	Festigkeitszahl	Mech. Zusammensetzung				
					Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus
163 Ugerup . . . . .	9	17	26	39	—	36.6	29.8	33.6	—
95 Lindby, Öland . . . .	—	19	—	48	2.8	54.0	21.4	21.8	—
307 Kulltorp, Wassmolösa	6	16	22	59	13.8	48.6	30.2	17.5	—
(274 Ekenäs, Värmland) .	8	18	26	17	3.0	48.0	27.9	29.1	—

Nr. 163		Nr. 95		Nr. 307		Nr. 274	
Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit
0	39	0	48	0	59	0	17.5
0.9	34	1.8	28	1.8	34	0.7	12.5
1.7	27	4.4	17	2.2	29	6.3	7.2
3.7	23	8.4	13	4.6	18	11.2	5.2
5.5	19	14.6	6.0	7.8	13.0	11.7	5.1
6.4	18	18.1	1.8	10.4	8.0	14.4	4.6
10.3	13	19.5	0.9	13.8	4.4	15.3	4.0
13.0	11	—	—	16.8	1.0	16.8	0.8
16.6	3.1	—	—	19.8	0.6	20.5	0.1
17.5	1.3	—	—	—	—	—	—
20.7	0.6	—	—	—	—	—	—
21.8	0.2	—	—	—	—	—	—

Hiermit beginnen die ausrollplastischen Bodenarten. Der Tongehalt beginnt nun so hoch zu werden, dass er ausreicht, um die Böden soweit plastisch zu machen, dass sie in Fäden ausgerollt werden können. Die Ausrollgrenze fällt mit einem Flexionspunkt der Kurve zusammen, der gewöhnlich jedoch weniger scharf ist als der Punkt, der den Umschlagspunkt repräsentiert, welcher letzterer Knieform aufweist. Oberhalb der Ausrollgrenze verlaufen die Festigkeitskurven (Tafel I, Bild 6) in gerader Linie und nähern sich darauf der X-Achse asymptotisch. Ein der Ausrollgrenze entsprechender Flexionspunkt tritt ja

auch an den Kurven der nicht ausrollplastischen Bodenarten hervor, dass diese aber demungeachtet nicht ausgerollt werden können, beruht darauf, dass die Festigkeit in diesem Zustande zu niedrig ist, um den zum Ausrollen erforderlichen Zusammenhang zu bewirken. Die Festigkeitskurven deuten somit darauf hin, dass die Ausrollgrenze sozusagen eine natürliche Grenze bei den Böden darstellt, bei der diese ihren Charakter wechseln. Bei den Festigkeitsbestimmungen findet man auch, dass der Keil, der innerhalb des plastischen Gebiets allmählich in das Prisma einsinkt, nachdem die Ausrollgrenze erreicht worden ist, bei hinreichender Belastung das Prisma zum Bersten bringt. Die Grenze, nach ATTERBERG's Verfahren bestimmt, wurde auch in den Zustand verlegt, in welchem der Teig sich nicht mehr ausrollen lässt, sondern bei Druck in kleine Klumpen zerbricht.

Die Motone stehen den Molehmen sehr nahe, was sowohl aus der mechanischen Zusammensetzung als auch aus der Ähnlichkeit der Festigkeitskurven hervorgeht. Beide Klassen haben Mo als hauptsächlichsten Bestandteil, der Tongehalt ist aber bei den Motonen etwas höher, was auch eine höhere Festigkeit bei diesen Bodenarten zur Folge hat. Wie bei den Molehmen liegt auch hier der Umschlagspunkt bei niedrigem Wassergehalt und ist wenig markiert (bei Nr. 307 überhaupt nicht), und die Festigkeit steigt sehr rasch mit abnehmender Feuchtigkeit. Die Motone unterscheiden sich von den Molehmen nur dadurch, dass die Festigkeit in feuchtem Zustande (bei O) höher ist.

In Anbetracht der hohen Festigkeit der hierhergehörigen Bodenarten ist es wahrscheinlich, dass ein wesentlicher Teil des »Tons« der Analysentabelle auch aus wirklichem Ton, demnach aus Partikeln von sehr geringer Grösse, besteht. Um dies zu konstatieren, wurde an Nr. 95 eine Schlämmung wie vorher mit 64-stündiger Absetzungszeit ausgeführt, wobei nur 3.8 Prozent des »Tons« eine Korngrösse über  $0.6\mu$ , der Rest, 18 Prozent, eine geringere Korngrösse hatte.

Indessen steht nicht die Festigkeitszahl in direktem Verhältnis zum Tongehalt, was bereits aus den drei hier ange-

fürten Bodenarten hervorgeht. Nicht nur der Feinheitsgrad der Partikeln, sondern auch ihre mineralogische Zusammensetzung ist hierbei von Bedeutung. Nr. 307, die den niedrigsten Tongehalt unter ihnen hat, weist nichtsdestoweniger den höchsten Festigkeitsgrad auf, einen Festigkeitsgrad, der im Verhältnis zum Tongehalt ungewöhnlich hoch ist. Das Gleiche war der Fall bei allen untersuchten von dem Grundstück (Kulltorp, Wassmolösa) herrührenden Bodenarten. Wahrscheinlich ist es eine besondere mineralogische Zusammensetzung des Tons dieser Bodenarten, die die unerwartet hohe Festigkeit bewirkt. Man könnte vermuten, dass der Ton zu wesentlichem Teile aus einer Eisenhydratverbindung besteht, welche Verbindungen nach ATTERBERG's letzter Untersuchung<sup>1</sup> hohe Festigkeit besitzen, und diese Vermutung erhält auch durch die rostbraune Farbe der Bodenarten eine Bestätigung.

Nr. 274 illustriert die Unzulänglichkeit der mechanischen Analyse für eine vollständige Charakterisierung der Bodenarten. Der Zusammensetzung nach ist die fragliche Bodenart zu den Motonen zu rechnen, die Festigkeitskurve zeigt aber deutlich, dass sie der Klasse der Schlufftone und zwar der Unterabteilung der Moschlufftone zuzuweisen ist, mit denen sie ihren Eigenschaften nach vollständig übereinstimmt.

### Schlufftone.

	Plastizitätszahl	Anrollgrenze	Fließgrenze	Festigkeitszahl	Mech. Zusammensetzung					
					Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus	
<i>Schlufftone:</i>										
231 Vassbo, Dalarna . . .	7	24	31	23	—	5.1	50.1	43.4	1.4	
39 » » . . .	2	27	29	14	—	3.8	46.5	47.6	2.1	
<i>Moschlufftone:</i>										
168 Hafdhem, Gottland . .	10	19	29	31	—	24.4	43.7	31.9	—	
124 Öbbestorp, Kalmar . .	5	18	23	31	—	21.3	52.1	26.5	—	

<sup>1</sup> K. Landbruksakademiens Tidskrift, 1913, S. 436 sowie Int. Mitteilungen f. Bodenkunde, Bd. III, Heft. 4.

Nr. 231		Nr. 39		Nr. 168		Nr. 124	
Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit	Wassergehalt	Festigkeit
0	23	0	13.5	0	31	0	31
1.8	18	2.0	10.4	0.9	21	1.3	25
4.2	14.2	5.6	6.5	1.6	18.0	2.3	22.6
10.1	9.0	9.7	5.5	4.5	12.7	4.0	19.6
16.8	6.5	14.1	5.8	6.0	11.5	5.5	16.0
19.5	6.3	18.4	6.0	8.7	10.0	8.2	13.2
21.8	6.0	20.6	5.7	11.5	9.1	11.6	9.4
24.4	3.0	23.4	5.0	14.3	8.5	14.1	7.8
25.8	1.5	25.2	3.6	16.2	5.9	17.1	2.3
28.6	0.4	26.4	2.0	17.8	3.8	21.2	0.9
—	—	27.0	0.8	19.2	2.1	—	—
—	—	—	—	21.6	1.0	—	—

Die zu dieser Klasse gehörigen Bodenarten sind nach ATTERBERG dadurch charakterisiert, dass der Gehalt an Schluff höher ist als der an irgend einer anderen Korngruppe, und dass die Festigkeits- und die Plastizitätszahl niedriger sind als bei den *sehr schweren Tonen*. Die Klasse ist von ATTERBERG in zwei Gruppen eingeteilt worden, *moarme* und *moreiche Schlufftone*, und aus den Festigkeitskurven (Tafel I, Bild 7) ersieht man, dass diese Einteilung völlig berechtigt ist, indem die Kurven für Nr. 231 und Nr. 39 einen Typus für sich, abweichend von den beiden übrigen, darstellen.

Die Verschiedenheit der beiden Kurventypen wird eigentlich durch die Lage des Umschlagspunktes bedingt, der bei der Gruppe Schlufftone, Nr. 231 und Nr. 39, bei bedeutend höherem Wassergehalt, bei 23 und 24 Prozent, liegt als bei den Moschlufftonen, wo der Umschlag bei etwa 14 Prozent Wassergehalt geschieht. Wie oben erwähnt, deutet die Lage des Umschlagspunktes darauf hin, dass die Bodenart aus einem Gemisch verschiedener Korngruppen besteht, was auch durch die Analysentabelle bestätigt wird, woselbst die Moschlufftone als unsortierte Bodenarten hervortreten.

Grosse Übereinstimmung in dem allgemeinen Aussehen der Kurven herrscht zwischen den zu dieser Klasse gehörigen Bodenarten und den Repräsentanten der Schlufflehme und Schluffböden, an welche Klassen die Schlufftone sich auch der mechanischen Zusammensetzung nach eng anschliessen. Die Schlufftone stehen zu den Schlufflehmern in demselben Verhältnis wie die Motone zu den Molehmern.

Gleichwie bei den Schlufflehmern verlaufen die Kurven der moarmen Gruppe nach dem Umschlagspunkte eine relativ lange Strecke in gerader, horizontaler Linie, bei den Kurven der moreichen Gruppe fehlt dagegen dieses horizontale Stück, und die Kurven beginnen sofort nach dem Umschlag anzusteigen. Denkt man sich dieses Stück aus den erstgenannten Kurven weggenommen, so stimmen diese mit den Kurven der anderen Gruppe überein. Mit anderen Worten, die Moschlufftone befinden sich bereit sam Umschlagspunkt in dem Zustande, den die Schlufftone erst erreichen, nachdem ein grosser Teil des Porenwassers verschwunden ist, da bei fortgesetztem Trocknen die Wasserhülle um die einzelnen Partikeln herum verdünnt wird, was ihre gegenseitige Annäherung und damit eine Zunahme der Festigkeit zur Folge hat.

Der Tongehalt ist bei den Schlufftonen wie bei den ihnen nahestehenden Schlufflehmern ziemlich hoch, gleichwie aber bei den letzteren der Ton zum grössten Teil aus Partikeln bestand, die der Grösse nach nahe der unteren Grenze für Schluff lagen, so ist das auch bei den hier fraglichen Bodenarten der Fall. So zeigte es sich, dass bei Nr. 231 25,3 Prozent eine Korngrösse zwischen  $2 \mu$  und  $0,6 \mu$  aufwiesen und nur 18,1 Prozent eine solche unter  $0,6 \mu$  hatten; ebenso wurden von Nr. 39 bei entsprechender Zerlegung 33,8 Prozent Ton, der zwischen der Schluffgrenze und  $0,6 \mu$  lag, und nur 13,8 Prozent noch feinerer erhalten. Hätte man die Zerlegung weiter getrieben, so würde es sich vermutlich gezeigt haben, dass ein grosser Teil des nun erhaltenen feineren Tones unter  $0,6 \mu$  dieser Grenze ziemlich nahe lag. Der

Gehalt an feineren kolloidalen Partikeln ist daher in diesen Bodenarten unbedeutend.

### Sehr schwere Tone.

		Plastizitäts- zahl	Anstroll- grenze	Fließgrenze	Festigkeits- zahl	Mech. Zusammensetzung				
						Sand	Mo	Schluff	Ton	Hu- mus
164.	Hyllinge . . . . .	31	22	53	75	—	5.2	27.0	67.8	—
162.	Ugerup . . . . .	26	24	50	93	—	13.3	16.7	69.4	0.6
121.	Svedala . . . . .	17	24	41	94	—	12.3	32.2	54.2	1.3
166.	Hyllinge . . . . .	15	20	35	55	—	9.5	33.5	57.0	—
309.	Kulltorp, Wassmolösa . .	15	16	31	94	4.1	20.2	34.3	41.4	—
85.	Saltkällan, Bohuslän. . .	13	24	37	49	—	21.0	22.1	54.9	0.9
<i>Übergangsformen:</i>										
275.	Högsrum, Sundsvall . . .	9	26	35	34	—	4.4	33.0	62.3	—
161.	Mulde, Gottland . . . . .	10	23	33	22	—	8.7	40.7	50.6	—

Nr. 164		Nr. 162		Nr. 121		Nr. 166		Nr. 309		Nr. 85		Nr. 275		Nr. 161	
Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit
0	75	0	93	0	94	0	55	0	94	0	49	0	34	0	22
7.5	40	4.8	48	5.1	53	1.6	40	3.3	54	2.9	31	2.2	22	1.4	20
12.5	30	6.6	42	10.6	38	4.1	30	4.4	44	7.2	29	4.6	16	4.3	13.9
15.3	30	10.8	29	13.2	36	8.6	24	9.7	30	12.6	26	7.6	15	9.9	14.4
23.4	11.5	14.0	28	16.1	25	11.7	20	12.8	19	14.6	24	9.4	13.2	12.2	15.5
31.2	3.3	16.5	20	21.4	9.5	16.7	15.9	17.2	6.8	19.2	18	14.2	11.7	15.9	14.8
37.2	1.4	21.9	7.6	22.1	6.7	20.6	8.5	20.9	1.7	24.2	6.0	18.1	10.0	18.4	14.6
37.7	1.0	22.5	6.4	22.8	6.4	23.6	3.5	22.9	1.2	25.5	3.5	23.2	9.1	21.6	6.0
39.0	0.6	27.6	3.1	25.8	3.5	26.4	2.0	—	—	26.1	2.5	26.7	3.1	24.9	2.7
46.2	0.4	31.4	1.4	27.3	2.3	28.5	1.3	—	—	31.2	0.8	29.1	1.8	26.9	1.5
—	—	33.7	0.6	29.4	1.5	30.2	0.8	—	—	33.2	0.3	34.5	0.5	30.1	0.7
—	—	—	—	32.1	1.0	35.1	0.3	—	—	—	—	—	—	33.3	0.2

Schliesslich seien einige Kurven (Tafel I, Bild 8 u. 9) für Bodenarten mitgeteilt, die den sehr schweren Tönen angehören.

Bei diesen Bodenarten ist nach ATTERBERG der Gehalt an Ton grösser als der an irgend einer anderen Korngruppe und die Festigkeits- und die Plastizitätszahl höher als innerhalb der übrigen Klassen. Diese Charaktere aber stehen doch nicht immer in Proportion zu einander, was die beiden Böden Nr. 275 und Nr. 161 zeigen, bei denen der Tongehalt hinreichend hoch ist, um sie den sehr schweren Tonen zuweisen zu lassen, die Festigkeitszahlen aber, die ja den Ausdruck für die Zähigkeit des Bodens abgeben, relativ niedrig sind. ATTERBERG hat daher diese Böden als Übergangsformen zu den Schlufftonen aufgestellt. Die Kurven dieser Bodenarten sind auch völlig gleich denen der Schlufftone, und ihnen nach zu urteilen, findet sich kein Anlass, sie von einander zu trennen. Die Festigkeit beim Umschlagspunkt ist jedoch etwas höher, was auf etwas feineres Material als bei den oben angeführten Schlufftonen deutet. Nr. 161 erinnert sogar an die Schluffböden, indem die Kurve nach dem Umschlage dieselbe abwärtsgehende Tendenz zeigt, wie wir sie bei dieser Klasse fanden, ein Zeichen dafür, dass die Bodenart gleich den Schluffböden nahezu frei von wirklichen Tonpartikeln ist.

Zu den Übergangsformen ist auch Nr. 85 zu rechnen. Die hohe Festigkeit beim Umschlagspunkt stellt sie zu den sehr schweren Tonen, die Lage des Umschlagspunktes aber bei hohem Wassergehalt und der geradlinige Verlauf der Kurve während eines längeren Stückes nach demselben lassen die Kurve der Schlufftone ähneln. Die Bodenart ist insofern interessant, als sie den dem Eisenbahnverkehr so gefährlichen Bohusläner Tonen angehört. Die Probe ist bei Saltkällan in Bohuslän entnommen, woselbst vor einigen Jahren ein grösserer Erdrutsch eintraf. G. DE GEER und L. VON POST,<sup>1</sup> die die Ursachen des Erdrutsches näher studiert haben, wollen denselben darauf zurückführen, dass der Ton hier unter der Grundwasseroberfläche liegt und dieselbe nasse Beschaffenheit bewahrt hat, die er bei seinem Absetzen

<sup>1</sup> Jordskredet vid Smedberg i Bohuslän. S. G. U. Årsbok 5 (1911), Nr. 6.

hatte. Indessen geschieht es ja meistens, dass Tone in hinreichender Tiefe unter der Grundwasseroberfläche liegen, ohne dass sie deshalb so lose wie die Bohusläner Tone zu sein brauchen. Ganz sicher sind diese von einer speziellen Natur, und die Kurve zeigt auch, dass die hier von *Saltkällan* herführende Probe sich den Schlufftonen nähert, die eine Anlage zum Fliessen haben. Auch lässt sich die Möglichkeit denken, dass der Ton im Laufe der Zeit nasser geworden ist, als er es gleich nach der Sedimentierung war. Wenn man annimmt, dass feine, unverwitterte, ziemlich gleichgrosse Partikeln zur Absetzung kommen, so ergibt sich damit ein sehr grosses Porenvolumen. So hatte die reingeschlammte Kornsortierung mit Partikeln unter  $3 \mu$  ein Porenvolumen, das einem Wassergehalt von 45 Prozent entsprach. Wenn nun die Partikeln verwittern, in kleinere zerfallen, so lagern sich diese in die Poren ein, es hat das eine Verminderung des Porenvolumens zur Folge, und die entsprechende Quantität Wasser wird die Dicke der Wasserhülle um die Partikeln herum vermehren, welche hiermit leichter beweglich werden; der Ton sieht auf diese Weise aus, als wenn er nasser geworden wäre, obwohl der Wassergehalt derselbe ist.

Der Umschlagspunkt liegt bei den übrigen wirklich sehr schweren Tönen bei ungewöhnlich niedrigem Wassergehalt. Nr. 166 hat den Umschlagspunkt bei 16 Prozent, alle übrigen bei noch niedrigerem Wassergehalt trotz ihrer Feinheit. Es muss dies darauf beruhen, dass die Tone Partikeln haben, die hinreichend klein sind, um sich in die feinen Poren, welche die Schluffpartikeln und Partikeln von noch kleinerer Grösse bilden, einlagern zu können. Eine so feine Verteilung kann unmöglich allein durch mechanische Zermahlung von Gesteinsmaterial zustande kommen, hierbei muss die Verwitterung tätig sein, wobei die kleinsten Partikeln angegriffen werden und in noch kleinere zerfallen.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> B. KURILOW, Additionsprodukte und Erdboden. La Pédologie, 1912, Nr. 2, S. 93.

Die hierhergehörigen Kurven stimmen ihrem allgemeinen Habitus nach unter einander fast vollständig überein und unterscheiden sich von denen der vorhergehenden Klassen durch die hohe Festigkeit beim Umschlagspunkt und durch den unmittelbar danach einsetzenden starken Anstieg der Kurven. So zeigt die Kurve für Nr. 121, welche Bodenart die schwerste von den hier behandelten ist, eine Festigkeit beim Umschlagspunkt von bis zu 35 kg und bei vollständiger Trockenheit 94 kg, während die entsprechenden Zahlen für die wenigst schwere, Nr. 166, 17 und 55 sind. Die letztere Bodenart muss sich in der Praxis etwa halb so schwer bearbeitbar zeigen wie die erstgenannte.

Die Kurven der sehr schweren Tone können als aus zwei einzelnen Kurven zusammengesetzt angesehen werden, die einander im Umschlagspunkt schneiden, und von denen die eine die Änderung der Festigkeit innerhalb des plastischen Gebiets und die andere innerhalb des festen Gebiets zum Ausdruck bringt, wenn nämlich der Umschlagspunkt als Grenze zwischen den beiden Zuständen angesetzt wird.

Die so gut wie sofort einsetzende rasche Zunahme der Festigkeit nach dem Umschlage deutet darauf hin, dass die schweren Tone nicht das Porenwasser in eine mit der bei den übrigen Bodenarten vergleichbaren Weise enthalten, sondern das Porenwasser befindet sich hier, wie HALL<sup>1</sup> hervorgehoben hat, infolge der Kleinheit der Poren innerhalb der Attraktionssphäre der Partikeln und kann als an der Oberfläche der Partikeln adsorbiert angesehen werden.

Die Ausrollgrenze fällt nahezu mit dem Flexionspunkt an dem Teil der Kurve, der das plastische Gebiet repräsentiert, zusammen, von welchem Punkt an die Kurve sich in gerader Linie der X-Achse nähert.

<sup>1</sup> Le Sol, S. 135.

## Humose Böden.

	Plastizitäts- zahl	Ausroll- grenze	Fließgrenze	Festigkeits- zahl	Mech. Zusammensetzung				
					Sand	Mo	Schluff	Ton	Humus
<i>Schwach humoser Moschluff:</i>									
110. Högsby, Småland . . . . .	0	—	30	6	9.2	33.8	43.2	11.0	2.8
<i>Schluffschwarzerde:</i>									
115. Forsse, Ångermanland . . . . .	0	—	40	5	0.4	16.5	43.2	31.3	8.6
<i>Tonerde:</i>									
97. Gisselö, Östergötland . . . . .	12	25	37	57	0.1	8.5	16.8	70.0	4.6
16. Harg, Uppland . . . . .	6	52	58	27	—	17.2	24.4	52.3	6.1

Nr. 110		Nr. 115		Nr. 97		Nr. 16	
Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit	Wasser- gehalt	Festig- keit
0	6.4	0	5.2	0	57	0	27
1.3	5.4	2.6	7.2	4.1	49	4.1	23
2.7	3.7	5.0	4.2	5.6	35	6.8	14.7
6.3	2.6	7.1	3.7	14.8	21	10.0	13.2
10.2	2.6	11.5	3.6	16.6	20	16.4	11.0
13.7	2.9	15.0	3.4	21.4	16.0	30.1	7.6
16.6	2.8	17.1	3.3	26.6	6.5	32.7	6.4
19.3	3.0	17.5	3.4	30.6	3.8	38.1	5.2
21.8	3.1	23.9	3.9	32.0	1.4	41.7	3.9
27.3	2.6	29.8	3.3	34.8	1.0	44.5	2.1
30.0	0.8	38.8	0.6	40.6	0.4	50.8	0.6
33.4	0.3	44.1	0.2	—	—	53.2	0.4

In einem besonderen Abschnitt sollen hier einige Proben von humosen Böden angeführt werden. ATTERBERG hat in seiner Klasseneinteilung die humosen mit den humusfreien Bodenarten vereinigt und sie alle von gemeinsamen Gesichtspunkten aus, nach ihrer mechanischen Zusammensetzung, Festigkeit und Plastizität, behandelt. Bei unserer Unter-

suchung hat es sich jedoch als unmöglich erwiesen, gleichzeitig mehrere Eigenschaften zugrunde zu legen. So z. B. muss die Bodenart Nr. 16 ihrer mechanischen Zusammensetzung nach zu den sehr schweren Tönen gerechnet werden, da der Tongehalt überwiegt, aus den Festigkeitskurven (Tafel 1, Bild 10) geht aber hervor, dass die Bodenart nicht sehr zäh ist. Bei Nr. 97 dagegen ist der Humusgehalt nicht hinreichend gewesen, um die Merkmale der schweren Tone ganz zu verwischen, der Umschlagspunkt liegt aber bei so hohem Wassergehalt wie bei 22 Prozent, was sonst nie bei den schweren Tönen geschieht; bei Nr. 16 liegt der Umschlagspunkt sogar bei ca. 40 Prozent. Der Humusgehalt erhöht den Umschlagspunkt bedeutend und damit die Wasserkapazität, was ja auch seit alters bekannt ist.

Eine andere Eigentümlichkeit bei den Kurven der humosen Böden ist die abwärtsgehende Tendenz bezüglich der Festigkeit, die diese bei 100° Trocknung zeigen. Nr. 115 zeigt, bei 100° getrocknet, eine niedrigere Festigkeit gegenüber Lufttrockenheit und die humosen Tone zwar eine nicht niedrigere, aber aus den Kurven ersieht man, dass die Festigkeit sozusagen eine Neigung hat höher zu steigen. Bei Nr. 110 ist der Humusgehalt allzu niedrig, als dass diese Eigenheit deutlich hervortreten könnte.

In Anbetracht der vollständig von denen der übrigen humusfreien Böden abweichenden Eigenschaften der humosen Bodenarten erscheint es nicht zweckmässig, sie ein und derselben Klasse zuzuweisen, sondern sie müssen gesondert je für sich behandelt werden.

Auch MITSCHERLICH<sup>1</sup> hat bei seiner bekannten Einteilung der Böden nach der Hygroskopizität, in der er einen Ausdruck für die Gesamtoberfläche der Partikeln erblickt, um auch die humosen Böden in das System einordnen zu können, den Begriff »innere Oberfläche« einführen müssen, welche letztere bei den Humusstoffen auftritt und bewirkt, dass die humosen Böden sogar die schwersten Tone an Hygroskopizität übertreffen. Bei Anwendung von Benzol anstatt Wasser bei

<sup>1</sup> Bodenkunde für Land- und Forstwirte, 2. Aufl., 1913, S. 73.

Hygroskopizitätsbestimmungen wird diese »innere Oberfläche« nicht angefeuchtet, und die Werte, die dann für die »Hygroskopizität« erhalten werden, stimmen nach MITSCHERLICH mit den Eigenschaften der Bodenart im übrigen wohl überein. Wie dem nun auch sei, so macht jedenfalls eine Beimischung von Humusstoffen, die ihrer Natur nach ganz verschiedene Mineralstoffe darstellen, eine besondere Behandlung dieser Böden notwendig.

### Nähere Diskussion der Festigkeitskurven.

Gleich von Anfang an frappierte mich die Ähnlichkeit der auf Tafel I wiedergegebenen Kurven mit denen, die VAN BEMMELEN<sup>1</sup> über die Wasserverdunstung der Hydrogele mitgeteilt hat, und es lag für mich nahe, für diese Festigkeitskurven der Hauptsache nach dieselbe Erklärung anzuwenden, die VAN BEMMELEN für die Gele aufgestellt hat.

VAN BEMMELEN'S Untersuchungen sind von grundlegender Bedeutung für die Auffassung der Struktur der Gele gewesen. Sie finden sich daher ziemlich ausführlich in Lehrbüchern der Kolloidchemie referiert, insbesondere hat ZSIGMONDY<sup>1</sup> eingehend die Kurven VAN BEMMELEN'S diskutiert und zur Erklärung die Kapillaritätsgesetze herangezogen. Ich kann mich daher darauf beschränken, in grösster Kürze hierüber zu berichten.

Der Zweck der Untersuchungen VAN BEMMELEN'S war der, festzustellen, ob Hydrogele von Kieselsäure, Eisenhydrat und anderen Stoffen das Wasser chemisch gebunden oder nur adsorbiert halten. Er ging von der Voraussetzung aus, dass, falls das Wasser zu einem Teil chemisch gebunden ist, dies in der Dampfdruckkurve des Hydrogels zum Ausdruck kommen wird. Diese muss nämlich einen Kniefpunkt eben bei dem dem chemisch gebundenen Wasser entsprechenden

<sup>1</sup> Die Absorption. Dresden 1910, S. 196.

<sup>2</sup> ZSIGMONDY, Kolloidchemie Leipzig 1912 S. 148—164.

Wassergehalt aufweisen, und danach muss sich der Dampfdruck konstant halten, solange noch Gelwassermoleküle unzerlegt vorhanden sind.

VAN BEMMELEN verfuhr in der Weise, dass das Hydrogel zuerst in einen mit Wasserdampf gesättigten Raum (Druck des Wasserdampfs 12,7 mm) gestellt und darin so lange stehen gelassen wurde, bis es nach Ausweis von Wägungen Wasser weder aufnahm noch abgab. Danach wurde das Gel in Räume mit stufenweise abnehmendem Dampfdruck gestellt, wobei es jedesmal, wenn der Dampfdruck gesenkt wurde, eine gewisse Quantität Wasser verlor. Bei konstantem Gewicht wurde das Gel behufs Bestimmung des Wassergehalts gewogen. Der gewünschte Dampfdruck wurde dadurch erhalten, dass das Gel in einen Exsikkator über Schwefelsäure von stufenweise zunehmender Konzentration gestellt wurde, bis schliesslich konzentrierte Schwefelsäure zur Anwendung kam (Druck des Wasserdampfs nun 0 mm). VAN BEMMELEN erhielt nachstehende Kurve, die den Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt des Gels und dem Druck des Wasserdampfes im Gasraume zeigt.

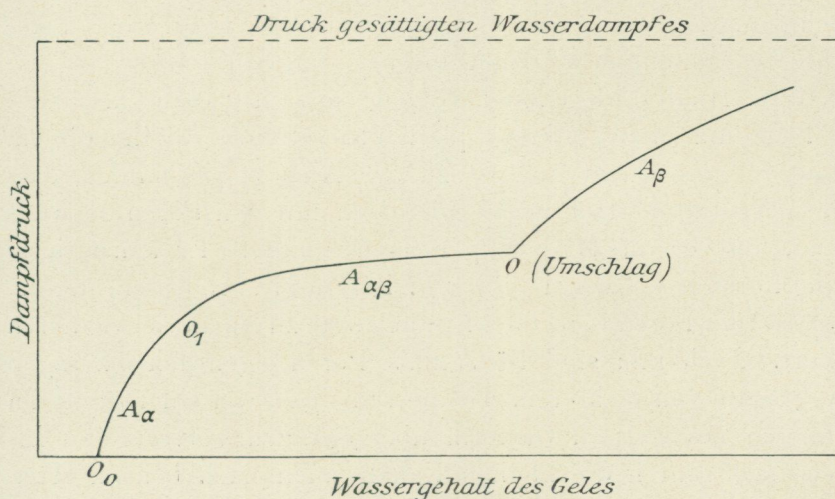


Fig. 3.

Bei Verminderung des Dampfdrucks nimmt auch der Wassergehalt des Gels gemäss einer Kurve ab, deren verschiedene Teile  $A_\beta$ ,  $A_{\alpha\beta}$  und  $A_\alpha$  besondere Zustände des Gels repräsentieren. Der Kurventeil  $A_\beta$  liegt nahe der Linie, welche den Druck gesättigten Wasserdampfs markiert, welcher Linie sie sich asymptotisch bei steigendem Wassergehalt des Gels nähert, d. h. von einem sehr wasserhaltigen Gel verdunstet Wasser fast wie von einer freien Wasseroberfläche. Bei abnehmendem Wassergehalt muss der Dampfdruck im Gasraum mehr und mehr erniedrigt werden, damit Verdunstung stattfinden soll (das Wasser wird in dem Gel gebunden, adsorbiert gehalten). Dieser Zustand fährt bis zu einem Punkte O hin fort, wo eigentümliche Verhältnisse eintreffen. VAN BEMMELEN hat nachgewiesen, dass das Volumen des Gels die ganze Zeit hindurch während des durch  $A_\beta$  dargestellten Zustandes um einen dem Volumen der verdunsteten Wassermenge entsprechenden Betrag abgenommen hat. Bei Punkt O aber hört das Gel auf sich zusammenzuziehen, es ist nun fest geworden, und eine fortgesetzte Wasserverdunstung hat zur Folge, dass gasgefüllte Hohlräume im Inneren des Gels auftreten. Dies kann man leicht mit dem blossen Auge wahrnehmen. Ein wassergefülltes Kieselsäuregel, wenn wir ein solches betrachten, ist klar und durchsichtig, damit aber, dass gasgefüllte Hohlräume entstehen, zeigt es sich trübe (Umschlag).

BÜTSCHLI hat mikroskopisch Kieselsäuregel in diesem Stadium untersucht und ist zu der Ansicht gekommen, dass die gasgefüllten Hohlräume identisch mit den Poren des Gels sind, die er im Mikroskop messen konnte. Er konstatierte eine Porengrösse von 1 bis  $1,5 \mu$ . ZSIGMONDY<sup>1</sup> indessen, der die Grösse der Poren berechnet hat, gelangte zu einem viel kleineren Wert. Nach ihm sind BÜTSCHLI's Poren eigentlich sozusagen Aggregate von mehreren. Ist die Flüssigkeit an einer Stelle im Inneren des Gels in Gasform übergegangen, so verbreitet das Gas sich durch die kleinen Kanäle auch nach benachbarten Poren, und anstatt einer einzigen Pore, wie es im Mikroskop

<sup>1</sup> Kolloidchemie, S. 157.

erscheint, liegt in Wirklichkeit eine ganze Ansammlung von Poren vor, deren Zwischenwände zu dünn sind, um im Mikroskop sichtbar zu sein. Gasgefüllte Partien können gleichzeitig an mehreren Stellen in dem Gel auftreten, und diejenigen Teile des Gels, die zwischen diesen Partien liegen, sind — meint ZSIGMONDY — von BÜTSCHLI als eine einfache Wand betrachtet worden, weshalb er auch eine viel zu grobe Struktur des Gels erhielt.

Den mechanischen Verlauf beim Wasserverlust des Gels denkt sich ZSIGMONDY ungefähr auf folgende Weise. Ein wasserhaltiges Gel mit einem Wassergehalt über dem des Umschlagspunktes besteht aus Partikeln, Submikronen und Amikronen, die gesondert von einander gleichsam schwimmend im Wasser liegen. Nebenstehende Figur nach ZSIGMONDY illustriert das Verhältnis. Wenn das Wasser verdunstet, beginnen konkave Menisken sich zwischen den Partikeln an der Oberfläche auszubilden. Nach dem, was betreffs des Ansteigens einer Flüssigkeit in einer Kapillarröhre bekannt ist, wird das Ansteigen eben durch die Konkavität der Flüssigkeitsoberfläche in der Röhre verursacht. Der konkave Meniskus übt eine saugende Wirkung auf die darunterliegende Flüssigkeitsmasse aus, um so stärker je mehr die Konkavität ausgebildet ist, und hierbei werden die Wände der Kapillarröhre natürlich mit entsprechender Kraft nach unten gepresst. Eben diese Tatsache ist es, deren sich ZSIGMONDY zur Erklärung des Schwindens des Gels bedient. Die konkaven Wassermenisken an der Oberfläche des Gels pressen die oberflächlichen Partikeln mit einer ihrer Konkavität entsprechenden Kraft herab. Diese üben ihrerseits einen Druck auf die darunterliegenden Partikeln aus, und das Gel nimmt an Volumen ab, bis die Partikeln einander berühren und infolge ihrer Starrheit nicht weiter dem Druck nachgeben können. Bei fortgesetzter Verdunstung nimmt nun die Konkavität der Menisken an der Oberfläche zu, und das Saugen

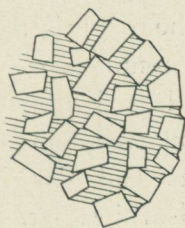


Fig. 4

wird schliesslich so stark, dass die Flüssigkeit im Inneren des Gels analog dem Verhältnis beim Kochen einer Flüssigkeit in Dampf übergeht. In diesem Zeitpunkte trifft der Umschlag ein (das Gel wird unklar, matt an Farbe).

Nach dem Umschlage verläuft die Kurve gerade und fast horizontal bis zum Punkte  $O_1$ , d. h. das Gel verliert Wasser bei ungefähr demselben Dampfdruck im Gasraum. Das Wasser, das zwischen  $6$  und  $6_1$  verdunstet, auf der Strecke  $A_{\alpha\beta}$ , hat denselben Dampfdruck gehabt und ist demnach seiner Natur nach identisch mit ersterem gewesen. VAN BEMMELEN ist auch der Ansicht, dass das auf der Strecke  $A_{\alpha\beta}$  abgegebene Wasser Porenwasser gewesen ist, das die Zwischenräume zwischen den Partikeln ausgefüllt hat. Ein anderer Umstand, der hierfür spricht, ist der, dass das Gel bei  $6_1$  seine Trübheit verliert, es wird wieder durchsichtig und klar, die optische Inhomogenität ist verschwunden, indem alle Hohlräume von einem optisch gleichartigen Stoff, Dampf oder Luft, eingenommen werden.

Der Kurventeil  $A_\alpha$  kann eigentlich als eine Fortsetzung von  $A_\beta$  angesehen werden. Während dieses Zustandes verliert das Gel das Wasser, das an den Wänden der Partikeln adsorbiert ist. Je dünner die adsorbierte Flüssigkeitsschicht wird, um so niedriger wird auch der Dampfdruck derselben, und um so mehr muss man daher den Dampfdruck im Gasraum senken, damit eine Verdunstung stattfinden soll.

Die Ähnlichkeit zwischen der eben beschriebenen *Abwässerungskurve* VAN BEMMELEN's und den hier mitgeteilten Festigkeitskurven der Bodenarten ist unverkennbar. Bei den Festigkeitskurven der Bodenarten tritt der Umschlagspunkt gleichfalls als ein Kniepunkt auf, von wo aus die Kurve dann mehr oder weniger weit in fast horizontaler Richtung verläuft, um danach umzubiegen ( $6_1$ ) und nach Trockenheit hin emporzusteigen. Man hat somit Anlass anzunehmen, dass dieselben Faktoren bei der Veränderung der Festigkeit der Bodenarten wirksam sind wie die, welche das Verhalten der Gele beim Verdunsten bedingen, und dass Bodenarten

und Gele gleichartigen Bau aufweisen. Diese Übereinstimmung der Struktur wird noch weiter durch nachstehende Tabelle nach VAN BEMMELEN bestätigt, der auch die Änderung der mechanischen Eigenschaften mit dem Wassergehalt bei den Gelen qualitativ bestimmt hat.

Wassergehalt in Mol pro Mol $\text{SiO}_2$	Beschaffenheit des Hydrogels
40—30	Das Gel lässt sich schneiden.
20	» » ist ziemlich fest.
10	» » zerbröckelt (zerbirst).
6	» » lässt sich in dem Aussehen nach trockenes Pulver zerreiben.

Ganz dieselbe Änderung der mechanischen Eigenschaften, wie die Tabelle sie zeigt, findet man auch bei den Böden. Das Stadium, in welchem das Gel »zerbröckelt«, fällt mit der Ausrollgrenze des Bodens zusammen, und ca. 10 Mol Wasser ist daher der Wassergehalt des Gels an der Ausrollgrenze. Bei fortgesetztem Austrocknen wird das Gel gleich den Böden schliesslich so spröde, dass es »sich in dem Aussehen nach trockenes Pulver zerreiben lässt«.

Im Anschluss an das eben Angeführte mögen hier etwas eingehender die Faktoren erörtert werden, die auf die Festigkeit der Bodenarten einwirken. Natürlich kann dies nur ganz oberflächlich geschehen, da die Kräfte, auf denen die Festigkeit eigentlich beruht, Kohäsionskräfte und Oberflächenspannung, noch sehr unvollständig bekannt sind.

### Der flüssige Zustand.

Wird eine Bodenart mit Wasser angerührt, so adsorbieren die einzelnen Partikeln Wasser an ihrer Oberfläche in einer gewissen Dicke, der sog. Adsorptionshülle, ausserhalb welcher das Wasser nicht unter dem Einfluss der Partikeln steht.

Liegen die einzelnen Partikeln so weit auseinander, dass die Adsorptionshüllen einander nicht berühren, so hindern sie nicht die gegenseitige Beweglichkeit, und die Aufschwemmung ist leichtbeweglich fast wie Wasser, jedoch nicht vollständig, da die Reibung zwischen den aufgeschwemmten Partikeln und dem Wasser der Bewegung entgegenwirkt und demnach Viskosität bewirkt.

A. EINSTEIN und E. HATSCHEK<sup>1</sup> haben eine auf theoretische Berechnung gegründete Formel für die Einwirkung suspendierter, kolloidaler Partikeln auf die Viskosität aufgestellt, nach welcher die Viskosität unabhängig ist von der Grösse der Partikeln, aber proportional der Konzentration zunimmt. Die Formel lautet:

$\eta^1 = \eta \left( 1 + k \frac{v_1}{v} \right)$ , wo  $\eta^1$  = Viskosität der kolloidalen Lösung,  $\eta$  = Viskosität des Lösungsmittels,  $v_1$  = Gesamtvolumen der suspendierten Partikeln,  $v$  = Gesamtvolumen des Systems, mithin  $\frac{v_1}{v}$  ein Ausdruck für die Konzentration;  $k$  schliesslich ist eine Konstante.

Die Formel verlangt, dass die Kurve, die den Zusammenhang zwischen Viskosität und Konzentration illustriert, in einer geraden Linie verlaufen soll, was auch HATSCHEK und andere für einige kolloidale Lösungen experimentell nachgewiesen haben; bei einer gewissen Konzentration weicht aber die Kurve von dem geradlinigen Verlauf ab, und die Viskosität beginnt rasch anzusteigen, was ein Zeichen dafür ist, dass die Konzentration nun so gross geworden ist, dass die Partikeln einander berühren.

Ausserdem soll nach der Formel die Viskosität unabhängig von dem Feinheitsgrade der Partikeln sein, da die Korngrösse nicht in der Formel enthalten ist. In diesem Punkte ist aber die Formel unsicher, S. ODÉN's<sup>2</sup> Untersuchung der Viskosität kolloidaler Schwefellösungen nach zu urteilen. Er

<sup>1</sup> Koll.-Zeitschr. 7, 1910.

<sup>2</sup> Nov. Act. Reg. Soc. Scient. Upsal., Ser. IV. Vol. 3, Nr. 4, S. 102.

fand, dass die Viskosität mit dem Dispersitätsgrade zunahm.

Über die Festigkeit der Bodenarten innerhalb des flüssigen Gebiets, d. h. ihre Viskosität, geben die Festigkeitskurven keinen Aufschluss, da die Bestimmungen an Prismen ausgeführt sind, geformt bei Wassergehalten, die nur wenige Prozent über dem der Ausrollgrenze lagen. Behufs entsprechender Bestimmungen im flüssigen Zustande musste daher die Masse in eine Schale genommen und wie vorher der Keil bis zu 1 cm Tiefe in den lockeren Teig eingedrückt werden. Die hierzu erforderliche Belastung kann der Viskosität proportional gesetzt werden. Von den so untersuchten Böden sollen hier nur zwei als Beispiele angeführt werden, nämlich Nr. 164, sehr schwerer Ton, und Nr. 111, Schlufflehm.

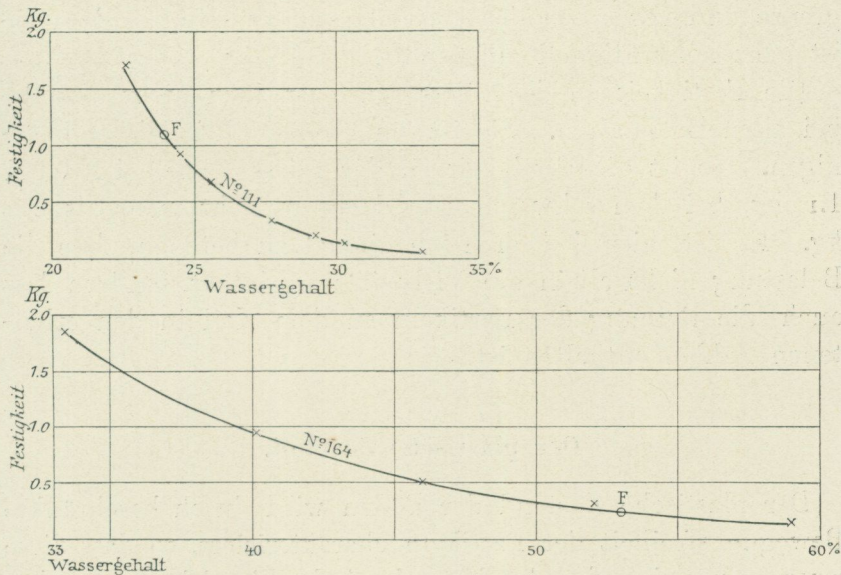


Fig. 5.

Die Viskosität nimmt bei hohem Wassergehalt mit Zunahme desselben längs einer geraden Linie ab, bei niedrigerem Wassergehalt steigt die Viskosität rascher mit abnehmender Feuchtigkeit. Diese Kurven ähneln somit den Viskositätskurven für kolloidale Lösungen.

Dass der Feinheitsgrad, wie S. ODÉN gefunden hat, gleichfalls auf die Viskosität einwirkt, kann man deutlich bei einem Vergleich zwischen den beiden Kurven sehen. Bei demselben Wassergehalt, also bei gleicher Konzentration, ist die erforderliche Belastung für die beiden Bodenarten sehr verschieden. Bei der feinkörnigeren Bodenart ist die Viskosität bedeutend höher und sinkt langsamer, während der grobkörnigere Typus nur einen geringen Zusatz von Wasser braucht, um sehr leichtflüssig zu werden.

Von besonderem Interesse ist es, die Lage der Fliessgrenze zu beobachten, die an den Kurven mit F bezeichnet ist. Bei Nr. 164 liegt diese auf dem geraden Teil der Kurve. Die Fliessgrenze kann daher nicht eine natürliche Grenze bei den Bodenarten in demselben Sinne wie die Ausrollgrenze und vor allem der Umschlagpunkt sein, sondern sie ist ganz konventionell aufgestellt.

Die Festigkeit an der Fliessgrenze ist auch nicht dieselbe bei allen Bodenarten. Sie ist am grössten bei den grobkörnigen. So ist die Festigkeit an der Fliessgrenze bei Nr. 111 1.1 kg, bei dem schweren Ton dagegen nicht mehr als 0.25 kg. Es ist hier jedoch noch einmal zu betonen, dass die Belastung nicht allein die Viskosität ausdrückt, sondern dass auch die Reibung der Partikeln an dem Keil in den erhaltenen Zahlen enthalten ist.

### Der plastische Zustand.

Der plastische Zustand der Böden wird durch beschränkte Bewegungsfreiheit der Partikeln charakterisiert, so dass diese zwar gegen einander durch mechanische Einwirkung verschoben werden können, dann aber, wenn diese aufgehört hat, ihre Lage beibehalten. Die Bodenarten sind, mit einem Wort, formbar. Diese Verschiebbarkeit der Partikeln kommt in den Festigkeitskurven zum Ausdruck, die hier, gleichwie bei dem flüssigen Zustande, richtiger als Zähigkeits- oder Viskositätskurven zu bezeichnen wären.

Von der Fliessgrenze an bis zur Ausrollgrenze hin verlaufen die Kurven in ziemlich gerader Linie, steigen dann aber mehr oder minder rasch zum Umschlagspunkte hin an, hierin völlig der VAN BEMMELEN'schen Kurve, Abschnitt A<sub>α</sub>, gleichend. Einen sehr raschen Anstieg zeigen die Kurven für die reingeschlämmten Sandböden, desgleichen für Schluffböden und auch für Moschlufflehme, zu denen die Fliessböden gerechnet werden. Die Gesamtoberfläche der Partikeln muss bei diesen Bodenarten relativ klein sein, da ein geringer Wasserzuschuss die Wasserhülle um die einzelnen Partikeln herum soweit zu verdicken vermag, dass diese relativ weit von einander zu liegen kommen und die Masse demnach leichtflüssig wird. Die Schlümmungen, die an einigen Schluffböden und Moschlufflehen mit längerer Absetzungszeit vorgenommen worden sind, haben auch gezeigt, dass der Gehalt an sehr feinen Partikeln bei diesen Bodenarten gering ist. Je grösser die Gesamtoberfläche der Partikeln ist, d. h. je kleiner sie sind, um so mehr Wasser muss die Bodenart aufnehmen oder abgeben, um aus einem Grenz- zustand in einen anderen überzugehn. Es lässt sich demnach von der Plastizitätszahl, die den Abstand zwischen Fliessgrenze und Ausrollgrenze bezeichnet, auch sagen, dass sie ein relatives Mass für die Gesamtoberfläche der Partikeln abgibt.

Nach ATTERBERG's Definition der Plastizität, dass nämlich ein Boden plastisch ist, wenn er sich zu Drähten ausrollen lässt, was bei allen Wassergehalten zwischen der Fliess- und der Ausrollgrenze möglich ist, umschliessen also diese Grenzen das plastische Gebiet, und die Plastizitätszahl ist dasselbe wie das Plastizitätsgebiet; nimmt man aber den Plastizitätsbegriff in seiner ursprünglichen Bedeutung als Formbarkeit, so muss das plastische Gebiet weiter ausgedehnt werden, nämlich bis zum Umschlagspunkte, da die Partikeln bis zu dieser Grenze, wenn auch unter Anwendung von Druck, verschiebbar sind. Erst beim Umschlagspunkte wird die Masse so spröde, dass kleinere Klumpen auch nicht durch Druck dazu gebracht werden können zusammenzu-

halten (Haftgrenze). Ein anderer Umstand, welcher zeigt, dass die Partikeln erst am Umschlagspunkte ihrer Lage nach fixiert sind, ist der, dass das Schrumpfen bis zum Umschlagspunkte und nicht weiter vor sich geht, und da Schrumpfen darin besteht, dass die Partikeln sich einander nähern, d. h. beweglich sind, so ist dies ein weiterer Grund, der für die Erweiterung des Plastizitätsgebietes bis zum Umschlagspunkte spricht. Die Beweglichkeit der Partikeln wird ja geringer und geringer, je näher man dem Umschlagspunkte kommt, und als praktische Grenze der Plastizität kann daher ATTERBERG's Ausrollgrenze angewandt werden. Damit ein Ton für die Tonindustrie verwendbar sei, verlangt man, dass er wenigstens so plastisch ist, dass er sich ausrollen lässt.

Von sehr grosser Bedeutung für die Tonindustrie wäre es, eine Methode für die quantitative Bestimmung der Plastizität zu erhalten, sowohl um Vergleiche zwischen der Anwendbarkeit verschiedener Tone anstellen als auch um den Kraftverbrauch bei den Maschinen, die den Ton im plastischen Zustande bearbeiten sollen, berechnen zu können. Zahlreiche Methoden sind auch vorgeschlagen worden, die mehr oder minder gelungen sind, und von denen hier einige nach ATTERBERG,<sup>1</sup> der ausführlich über dieselben berichtet, angeführt seien.

ATTERBERG teilt sie in folgende Gruppen ein:

- A. Methoden, welche den Ton in plastischer Form verwenden.
- B. » welche die Plastizität aus der Festigkeit des trockenen Tons berechnen.
- C. » welche die Wasseraufnahmefähigkeit als Massstab der Plastizität verwenden.
- D. » welche den Plastizitätsgrad aus dem »Bindevormögen« berechnen.
- E. » welche die Geschwindigkeit des Zerfallens der Tone in Wasser als Massstab der Plastizität benutzen.

<sup>1</sup> Int. Mitteilungen für Bodenkunde, Bd. I, S. 6.

F. Methoden, welche annehmen, dass der Gehalt der Tone an kolloidalen Substanzen den Massstab der Plastizität liefern.

Die meisten, die die Plastizität zu bestimmen versucht haben, haben den Ton in plastischer Form und eben in dem Zustande verwendet, wo er nicht mehr klebt (Normalkonsistenz). Neun derartige Methoden teilt ATTERBERG mit, von denen hier nur einige angeführt seien.

Eine von JOCHUM vorgeschlagene Methode besteht darin, dass aus dem Ton Stäbchen von 15 cm Länge und  $10 \times 10$  mm Durchschnitt geformt werden. Die Stäbchen werden in einem besonderen Apparate über einen abgerundeten Dorn gebogen, bis sich ein Riss in der Oberfläche zeigt. Die Grösse des Biegungswinkels wird als Massstab der Plastizität genommen.

Nach einer anderen Methode, die ZSCHOKKE benutzt hat, wird ein Tonstab an den beiden Enden in einem Apparat befestigt, der so konstruiert ist, dass die Kraft, die zum Zerreißen des Stabes erforderlich ist, registriert wird. Die Verlängerung des Tonstabes, bis derselbe zerreisst, wird »Deformationsfähigkeit« und die hierzu notwendige Kraft in kg pro Quadratcentimeter Zugfestigkeit genannt; das Produkt aus beiden stellt den Plastizitätskoeffizienten dar, der ein Mass für die Plastizität abgibt. Wie man sieht, tritt hier ein neuer Faktor bei der Bestimmung des Plastizitätsbegriffs auf, nämlich die Zugfestigkeit.

In den Tonfabriken bedient man sich gewöhnlich des folgenden qualitativen Verfahrens, um zu entscheiden, ob ein Ton verwendbar ist oder nicht. Von einem plastischen Tone wird verlangt, dass er sich zu einem Draht formen lässt, der, wenn man ihn zu einem Ringe zusammenlegt, keine Risse am Rande zeigen darf; oder wenn aus dem Ton Kugeln geformt werden, so sollen diese sich auf die Hälfte des Durchmesser zusammendrücken lassen, ohne dass Sprünge an den Rändern auftreten.

Von sonstigen Methoden sei eine von BISCHOF<sup>1</sup> angegebene, zur Gruppe D gehörige angeführt, bei welcher das »Bindevermögen« bestimmt wird. Unter dem Bindevermögen versteht BISCHOF die Eigenschaft des Tones, Sand aufzunehmen, ohne dass die Festigkeit in trockenem Zustande verloren geht. Die Festigkeit bestimmt BISCHOF dadurch, dass er mit einem Pinsel die getrocknete Sand- und Tonmischung 25 mal hin und zurück bestreicht. Das »Bindevermögen« des Tones gegenüber dem Sande hört auf, wenn die Oberfläche beim Bestreichen deutlich konkav wird. Um Zahlen für das Bindevermögen oder nach BISCHOF die Plastizität zu erhalten, werden zu dem Ton 1, 2, 3 bis zu 15 Gewichtsteile Sand hinzugesetzt, und diejenige Mischung, die eine konkave Oberfläche nach dem Bestreichen zeigt, bezeichnet den Plastizitätsgrad. Zeigt z. B. ein Ton, der mit 10 Gewichtsteilen Sand versetzt ist, beim Bestreichen Konkavität, nicht aber die Mischung mit 9 Gewichtsteilen Sand, so hat der Ton die Plastizität 10.

ATTERBERG's Methode zur Plastizitätsbestimmung ist bereits oben erwähnt worden.

Um die plastischen Eigenschaften eines Tones vollständig kennen zu lernen, genügt es nicht zu wissen, zwischen welchen Wassergehalten er plastisch ist. Die plastische Masse setzt auch dem Formen einen gewissen Widerstand entgegen, welche Eigenschaft man Zähigkeit nennt, und diese ist in verschiedenen Fällen ganz verschieden. Sie variiert nicht nur mit dem Wassergehalt, sondern ist auch bei gleichem Wassergehalt bei verschiedenen Tönen höchst verschieden. Einige Forscher haben sogar die Zähigkeit als das Wesentliche bei der Plastizität angesehen, wovon ihre Methoden zu Plastizitätsbestimmungen zeugen, die darauf ausgehen, die Zähigkeit entweder direkt innerhalb des plastischen Gebietes (z. B. ZSCHOKKE) oder auch die Festigkeit bei getrocknetem Ton (z. B. JOCHUM, OLSCHESKY) zu bestimmen, welcher letztere einen Masstab für die plastische Zähigkeit abgeben soll.

<sup>1</sup>C. BISCHOF, Die feuerfesten Tone, Leipzig 1904. 3. Aufl., S. 76.

Im grossen und ganzen besteht zwar eine gewisse Beziehung zwischen Plastizitätszahl und Zähigkeit, so dass im allgemeinen diese proportional sind, jedoch nicht immer, was man konstatieren kann, wenn man die Festigkeitskurven genauer prüft. So z. B. sind die Plastizitätszahlen bei den sehr schweren Tönen Nr. 121 und Nr. 162 17 für den ersteren und 26 für den letzteren, während die Festigkeit des ersteren am Umschlagspunkte 35 kg, die des letzteren dagegen in demselben Zustande nur 28 kg ist.

Schon aus diesen beiden Beispielen ergibt sich die Notwendigkeit, bei Plastizitätsbestimmungen nicht nur die Grösse des Plastizitätsgebietes (die Plastizitätszahl), sondern auch die Festigkeit oder die Zähigkeit im plastischen Zustande anzugeben. Die Festigkeitskurven innerhalb des plastischen Gebietes liefern ja hierüber die vollständigste Auskunft; für den praktischen Gebrauch dürfte aber eine Festigkeitsbestimmung an der Grenze des Plastizitätsgebietes, am Umschlagspunkte, genügen. Prüft man die Festigkeitskurven, so findet man, dass eine Festigkeit von etwa 4 kg am Umschlagspunkte notwendig ist, damit die Bodenart ausrollbar, also in ATTERBERG's Sinne plastisch sei.

Einen noch eklataneren Beweis für die Unabhängigkeit der Festigkeit von der Plastizitätszahl liefert eine Untersuchung von feingeriebenem Biotit, dessen Partikeln ausschliesslich unterhalb der 0.002 mm-Grenze lagen. Die nachstehende Tabelle gibt die Festigkeitszahlen des Biotits an.

Die Glimmerpartikeln besitzen ein ungewöhnlich grosses Vermögen, Wasser zu binden, die Fliessgrenze liegt nämlich bei einem so hohen Wassergehalt wie 85 Prozent. A priori möchte man sich vielleicht denken, dass die Glimmerpartikeln infolge ihrer tafelförmigen Ausbildung sich dicht aneinanderlagern und daher kleines Porenvolumen und niedrige Fliessgrenze aufweisen würden. Das wirkliche Verhalten deutet aber auf eine sehr lose Lagerung der Partikeln, die in der Weise entstehen könnte, dass diese Partikeln ohne jede Orientierung vorkommen. Der Umschlagspunkt liegt

Wassergehalt.	Entsprechende Festigkeit.
0.0	19.0
2.7	8.4
9.0	7.4
15.7	7.4
27.7	6.9
34.9	7.0
38.2	6.1
44.0	4.4
48.5	2.9
53.1	1.6
60.2	0.9
65.1	0.5
71.7	0.3

auch bei hohem Wassergehalt, nämlich ungefähr 40 Prozent, und die Probe zeigt dort eine Festigkeit von nicht mehr als etwa 6 kg, während die Plastizitätszahl 32 ist. Die Festigkeitsserie ähnelt sehr denen der humosen Böden, bei denen die Humusstoffe stark Wasser absorbieren, aber die Festigkeit vermindern.

*Worauf beruht die Plastizität?* Hierüber sind mehrere Theorien aufgestellt worden.<sup>1</sup> Nach ARON'S Ansicht verursacht die Kugelform der suspendierten Partikeln die Plastizität.

SCHLÖESING hält ganz einfach die kolloidale Tonsubstanz für die Ursache der Plastizität.

Nach OSTEN ist die Plastizität bedingt durch den Kaolinitgehalt des Tons, durch die tafelförmige Ausbildung und die glatte Oberfläche der Kaolinitpartikeln.

RÖSSLER meint, dass folgende Momente in Betracht zu ziehen sind: die Beweglichkeit der kleinsten Partikeln, ihre Adhäsion, die Gegenwart eines flüssigen Dispersionsmittels, die Oberflächenbeschaffenheit, die Biegsamkeit und die Grösse und das Gewicht der Partikeln. — Was die Form der Partikeln betrifft, so ist die blätterige, tafelförmige Ausbildung

<sup>1</sup> Siehe hierüber BISCHOF a. a. O., S. 21 und 22.

am besten sowohl für das Gleiten als für die Adhäsion. Die Kanten müssen abgerundet und die Oberfläche muss glatt sein, was im allgemeinen bei tafelförmigen Kristallen auch der Fall ist.

ZSCHOKKE erblickt die Ursache der Plastizität in der chemischen und physikalischen Verwandtschaft (?) des tonhaltigen Stoffes mit Wasser.

OLSCHEWSKY betrachtet die Plastizität als Folge einer porösen, schwammartigen Beschaffenheit der Tonsubstanz und gründet diese Ansicht auf einen Versuch von DAUBREE, welcher fand, dass Feldspatmehl, in Wasser gemahlen, plastisch war, wenn auch in geringem Grade, während trocken geriebenes Pulver der Plastizität ermangelte. Beim Reiben in Wasser löst dieses, meint OLSCHESKY, Hohlräume oder Kanäle in den Partikeln aus, die das Pulver plastisch machen.

ATTERBERG hat neulich verschiedene Stoffe bei verschieden feiner Verteilung auf plastische Eigenschaften untersucht.<sup>1</sup> Er ist zu der Ansicht gelangt, dass ein Stoff, um plastisch zu sein, eine Korngrösse unter 0.002 mm aufweisen muss, und dass ausserdem die Partikeln eine glimmerähnliche Form haben müssen. So hat ATTERBERG gefunden, dass Biotit, Hämatit und Limonit, die tafelförmige oder fadenförmige Kristalle haben, bei hinreichend feiner Verteilung plastisch sind, nicht dagegen Quarz, Kieselsäurehydrat und Tonerdehydrat, in wie feiner Verteilung sie auch vorkommen mögen.

Plastizität ist eigentlich dasselbe wie beschränkte Bewegungsfreiheit der Partikeln, worauf auch bereits mehrere Autoren hingewiesen haben (BIEDERMANN, ARON, RÖSSLER). Der plastische Zustand beginnt, wo diese Bewegungsfreiheit so gering ist, dass die Fliessgrenze erreicht ist, und er endet, wo die Partikeln ihrer Lage nach fixiert sind, demnach am Umschlagspunkt. Vom Umschlagspunkte aus gelangt der Boden in den plastischen Zustand dadurch dass er et-

<sup>1</sup> K. Landtbruksakademiens Tidskrift, 1913, S. 41 sowie Int. Mitteilungen f. Bodenkunde, Bd. III, 1913, Heft. 4.

was Wasser aufnimmt, das die Partikeln etwas von einander trennt. Ist die Partikeloberfläche gross, wie bei den schweren Tonen, so ist mehr Wasser nötig, um die Wasserhülle um die einzelnen Partikeln zu verdicken, und um diese bis zu einem gewissen Grade leichtbeweglich zu machen. Ist die Partikeloberfläche klein, d. h. sind die Partikeln relativ gross, wie z. B. bei den Schluffböden, so ist hierzu weniger Wasser nötig, und Umschlagspunkt und Fliessgrenze kommen nahe an einander zu liegen, d. h. die Bodenart ist wenig plastisch. Die notwendige Bedingung der Plastizität ist demnach hinreichend feine Verteilung des Materials, und umgekehrt, bei hinreichend feiner Verteilung müssen alle Stoffe sich als plastisch in dem weiteren Sinne erweisen, den ich hier dem Plastizitätsbegriffe gegeben habe.

Was nun die andere Seite des Plastizitätsbegriffes, nämlich die Festigkeit oder Zähigkeit, betrifft, so hängt diese ab von der Feinheit der Verteilung (die Partikeln haben mehr Berührungspunkte), der Form (die Partikeln können einander längs ganzen Flächen berühren), den Adhäsionskräften, der Oberflächenspannung des Wassers und dem Porenvolumen beim Umschlagspunkte, denn, wenn dieses gross ist, wie es bei dem feinzerriebenen Biotit der Fall war, ist die Masse weniger konzentriert und daher die Festigkeit geringer.

#### **Der Umschlagspunkt (die Schrumpfungsgrenze).**

Aus den Festigkeitskurven hat sich ergeben, dass der Umschlagspunkt die stärkst markierte Grenze ist. Die Kurven zeigten nämlich an diesem Punkte ein deutliches Knie, was darauf hinwies, dass die Bodenart an diesem Punkte ihren Charakter ändert. Dieselben Erscheinungen, die nach VAN BEMMELEN am Umschlagspunkt der Hydrogele auftreten, zeigen sich auch bei den Böden. So schlägt an diesem Punkte die Farbe um, der Boden wird spröde, die Festigkeit ist eine Strecke nach dem Umschlage konstant oder fast konstant, ganz wie die Hydrogele nach dem Umschlagspunkt

Wasser bei konstantem Dampfdruck ( $A_{\alpha\beta}$ ) abgaben. Der Boden hört am Umschlagspunkte auf zu schrumpfen.

Sehr wünschenswert wäre es, eine Methode zur direkten Bestimmung dieser wichtigen Grenze zu erhalten, ohne dass man den beschwerlichen Umweg einzuschlagen brauchte, sie aus der Festigkeitskurve der Böden festzustellen. Einige Versuche in dieser Richtung sind angestellt worden, indem man den Farbumschlag oder, wenn dieser, wie bei hellen Böden, schwer zu fixieren war, die Haftgrenze bestimmte, d. h. den Zeitpunkt, wo der Boden spröde wird. Im ganzen ergaben die Bestimmungsmethoden ziemlich gute Übereinstimmung mit der Bestimmung des Umschlagspunktes aus den Kurven, bisweilen aber auch fehlerhafte Werte. Eine völlig objektive Methode wurde schliesslich durch Bestimmung der Schrumpfungsgrenze erhalten.

Der zuerst die Schrumpfung der Tone genauer studierte, war ARON;<sup>1</sup> er fand, dass ein Ton um genau soviel schrumpft, wie das Volumen des verdunsteten Wassers beträgt, und dass die Schrumpfung bis zu einem gewissen, von ARON als *Schwindungsgrenze* bezeichneten Punkte fortfährt, wo sie plötzlich haltmacht. Dies ist eben der Augenblick, wo die Partikeln einander berühren, so dass ein weiteres Zusammenrücken unmöglich ist (Umschlagspunkt).

Behufs Messung der Schrumpfung verfuhr ARON folgendermassen. Bei einem gewissen Wassergehalt wurden Prismen geformt, und diese mit Querstrichen, einem an jedem Ende, in bestimmtem Abstände von einander versehen. Darauf wurden die Prismen zum Trocknen hingestellt. Die Annäherung der Querstriche an einander gab die lineare Schrumpfung an. Wurde die Schrumpfung von Zeit zu Zeit gemessen, so konnte man ungefähr bestimmen, bei welchem Wassergehalt sie aufhört (Schrumpfungsgrenze).

Nach dieser Methode hat ATTERBERG<sup>2</sup> die Schrumpfungsgrenze für einige Bodenarten bestimmt, desgleichen FROSTE-

<sup>1</sup> BISCHOF, Die feuerfesten Tone, S. 27.

<sup>2</sup> Int. Mitteilungen f. Bodenkunde, Bd. I, 1911, S. 34.

RUS,<sup>1</sup> der die Grösse der Schrumpfung, von der Normalkonsistenz an gerechnet, als ein klassifizierendes Merkmal für die humusfreien Böden anwendet.

Die Methode ist jedoch nicht völlig exakt. So können Fehler bei der Messung des Abstandes zwischen den Querstrichen entstehen, und ausserdem kann es leicht geschehn, dass die Prismen beim Trocknen sich etwas biegen, da es ja nicht immer gesagt ist, dass die Verdunstung ebenso rasch von allen Seiten des Prismas aus vor sich geht, und eine ungleichmässige Verdunstung zur Folge haben muss, dass das Prisma mehr längs einer Seite als längs einer anderen schrumpft. Eine exaktere Volumenbestimmungsmethode als lediglich durch Messung mittelst Massstabes wäre daher erwünscht.

R. TRNKA<sup>2</sup> hat eine Volumenbestimmungsmethode vorgeschlagen, nach welcher ein Erdklumpen, dessen Volumen bestimmt werden soll, mit einer Hülle von Paraffin überzogen und dann in ein Pyknometer mit Wasser eingetaucht wird, wobei dann das Volumen auf gewöhnliche Weise bestimmt wird. Die Methode soll völlig exakt sein.

Für die hier fraglichen Bestimmungen ist die TRNKA'sche Methode jedoch nicht geeignet, da das Volumen gemessen werden soll, während die Verdunstung vor sich geht, welche letztere natürlich durch eine Paraffinhülle unmöglich gemacht wird. Ich bediente mich daher eines anderen Verfahrens. Ein (etwa 6 oder 7 ccm grosser) Erdklumpen wurde in ein Pyknometer mit weitem Hals eingetaucht, das Quecksilber enthält. Das Quecksilber hat negative Kapillaritätskonstante und kann folglich nicht in die Poren der Bodenart eindringen. Der Übelstand, dass, wo der Erdklumpen mit einer Kante den Pfropfen des Pyknometers berührte, Quecksilbermenisken sich bildeten, die das Quecksilber daran hinderten, vollständig eine scharfe Ecke auszufüllen, wurde dadurch vermindert,

<sup>1</sup> La Pédologie, Nr. 4, 1912, S. 25.

<sup>2</sup> WAHNSCHAFFE u. SCHUCHT, Wissenschaftliche Bodenuntersuchungen, 3. Aufl., Berlin 1914.

dass der Erdklumpen nach oben zu konisch geformt wurde, so dass er den Pfropfen nur mit einer Spitze berührte.

Die Bestimmung wird auf gewöhnliche Weise ausgeführt. Zuerst wird das mit Quecksilber gefüllte Pyknometer gewogen und dann der Erdklumpen, dessen Volumen bestimmt werden soll, niedergedrückt, wobei dann die entsprechende Quantität Quecksilber herausfließt. Der Erdklumpen wird dann aus dem Pyknometer herausgenommen und dasselbe mit dem darin enthaltenen Quecksilber aufs neue gemessen, wonach aus der Differenz das Volumen berechnet wird. Die Methode erwies sich als völlig exakt.

Unter Anwendung der eben beschriebenen Methode ist das Volumen bei abnehmendem Wassergehalt für die in der nachstehenden Tabelle aufgeführten, sehr schweren Tone bestimmt worden, von denen Nr. 16 und Nr. 97 humos sind.

Nr. 121.		Nr. 161.		Nr. 16.		Nr. 97.	
Wassergehalt.	Vol.	Wassergehalt.	Vol.	Wassergehalt.	Vol.	Wassergehalt.	Vol.
32.5	4.68	28.1	4.83	54.2	4.40	35.4	4.36
28.1	4.40	24.3	4.54	48.8	4.17	30.8	4.07
23.5	4.07	20.4	4.24	43.1	3.92	24.9	3.76
19.8	3.81	16.9	3.99	37.7	3.76	17.0	3.42
14.9	3.57	12.3	3.94	30.6	3.68	12.8	3.42
11.8	3.36	9.4	3.93	25.8	3.66	7.3	3.38
7.1	3.29	3.9	3.92	13.6	3.64	6.7	3.36
5.7	3.29	2.8	3.97	8.7	3.65	5.3	3.35
5.1	3.29	2.4	3.96	6.3	3.59	5.1	3.31
0	3.25	0	3.95	5.2	3.62	0	3.29
—	—	—	—	0	3.57	—	—

Die Zahlen für Nr. 161 und Nr. 97 liegen den beigegebenen Schrumpfungskurven zugrunde (S. 77, Fig. 6). Jede Kurve besteht aus zwei geraden Linien, die in der Schrumpfungsgrenze zusammenstossen. Betrachtet man die Festigkeitskurven der betreffenden Bodenarten (Tafel I, Bild 8 u. 10), so findet man, dass der Umschlagspunkt bei demselben Wassergehalt wie die Schrumpfungsgrenze liegt. Vor dem Umschlagspunkte

nimmt das Volumen mit der Quantität verdunsteten Wassers ab, nach demselben aber ist das Volumen bei den humusfreien Böden konstant oder fast konstant. Bei den humosen Böden dagegen fährt das Schrumpfen auch nach dem Umschlagspunkte fort, aber in beträchtlich reduziertem Tempo. Vermutlich beruht dieses Nachschrumpfen darauf, dass die Struktur der Humusstoffe eine andere ist, dass sie aus Partikeln von einer kleineren Grössenordnung als die kleinsten Mineralpartikeln aufgebaut sind, und dass daher das zwischen ihnen befindliche Wasser stärker gebunden ist und erst später verdunstet.

Oben ist darauf hingewiesen worden, dass die Lage des Umschlagspunktes das Porenvolumen der Bodenart angibt.<sup>1</sup> Nach den Festigkeitskurven variiert die Lage desselben bei den humusfreien oder humusarmen Bodenarten von etwa 10 bis hinauf zu 25 Prozent. Der niedrige Wert kommt den unsortierten Bodenarten zu, mit Partikeln, die mehreren Korngruppen angehören, wobei die kleineren Körner sich zwischen die grösseren einlagern und zu einem Teil die Zwischenräume ausfüllen können. Die Lage des Umschlagspunktes kann so in gewissen Fällen einen Fingerzeig betreffs der mechanischen Zusammensetzung der Bodenart geben, wo sich dies nicht deutlich aus der Analyse ergibt. So kann man aus der Lage des Umschlagspunktes einen Schluss auf die Feinverteilung der Partikeln innerhalb der Tongruppe ziehen, zu welcher Partikeln von 0.002 mm bis hinab zu Molekülgrösse, also Partikeln von sehr verschiedenen Grössenordnungen, gerechnet werden. Zeigt z. B. die mechanische Analyse einen hohen Gehalt an Schluff und auch an Ton, liegt aber der Umschlag bei hohem Wassergehalt, so ist die Bodenart sortiert, und der »Ton« enthält wenig kolloidale Partikeln, wenig wirklichen Ton. Liegt andererseits der Umschlagspunkt niedrig, so darf man eine Mischung von grösseren und kleineren

<sup>1</sup> Statt das Porenvolumen in Volumprozenten auszudrücken, wie es früher gebräuchlich gewesen ist, drückte ich dasselbe in Gewichtsprozenten Wasser aus, was eine bessere Vorstellung von der Quantität Wasser gewährt, die eine Bodenart aufnehmen kann, wenn sie ihre dichteste Lagerung besitzt.

Partikeln vermuten. Eine direkte Schlämmung mit längerer Absetzungszeit liefert ja die beste Auskunft hierüber, ist aber unpraktisch, insofern sie allzu lange Zeit erfordert. Eine Schlämmung mit einer Absetzungszeit von 64 Stunden, bei der eine Scheidung der Körner nach  $0.6 \mu$  erhalten wird, nimmt mehrere Wochen in Anspruch.

Für die sehr schweren Tone haben die Kurven einen sehr niedrigen Wert für den Umschlagspunkt ergeben, der somit auf unsortiertes Material deutet, trotzdem sie gewöhnlich in Wasser abgesetzt sind. In der landwirtschaftlichen Litteratur werden die sehr schweren Tone als sehr poröse Bodenarten bezeichnet; so wird für diese ein Porenvolumen von 50 Volumprozent oder etwas darüber angegeben, während das Porenvolumen der Sandböden nur 25—30 Volumprozent beträgt. Sieht man zu, wie die Zahlen erhalten worden sind, so findet man, dass sie wenigstens für die feinkörnigen Böden nicht dem wirklichen Verhältnis entsprechen. Das Porenvolumen wird nämlich gewöhnlich in der Weise bestimmt, dass das getrocknete Bodenpulver in ein Gefäß von bekanntem Volumen getan und leicht zusammengeschüttelt wird, worauf die Oberfläche eben gestrichen wird. Dann wird die Probe gewogen und unter der Annahme, dass das eigentliche Gewicht der Partikeln 2.6 ist, wird das Porenvolumen berechnet. Bei den Tönen wird indessen die Lagerung bei diesem Verfahren allzu locker, da die leichten Tonpartikeln hierbei natürlich nicht ihre dichteste Lagerung einnehmen, und Werte werden erhalten, wie es in der Natur keine entsprechenden giebt, wo die Tone im Gegenteil gewöhnlich sich als sehr kompakte Bodenarten erweisen. *Das wirkliche Porenvolumen (Volumen bei dichtester Lagerung) der Bodenarten wird aus der Lage des Umschlagspunktes erhalten, welcher bei den Tönen auch niedrig in voller Übereinstimmung mit unserer Vorstellung von diesen Bodenarten liegt.*

Der Umschlagspunkt lässt sich leichter und genauer durch die Feststellung der Schrumpfungsgrenze als aus den Festigkeitskurven bestimmen. Nach der ersteren Methode ist es

nicht einmal notwendig, so viele Volumbestimmungen bei verschiedenen Wassergehalten zu machen, dass die Schrumpfungskurve gezeichnet werden kann, denn, da diese aus zwei geraden Linien besteht, deren eine horizontal verläuft, so genügen zwei Volumbestimmungen, die eine bei einem Wassergehalt über dem Umschlagspunkt und die andere bei einem solchen darunter. Die Volumverminderung ist dann gleich der Quantität Wasser, die der Erdklumpen über dem Umschlagspunkte enthält, welcher letzterer dann dadurch erhalten wird, dass man den ursprünglichen Wassergehalt um die aus der Volumverminderung erhaltene Quantität Wasser, in Prozente umgerechnet, vermindert.

Ein Beispiel möge dies veranschaulichen. Eine Probe hat bei einem Wassergehalt von 25 Prozent ein Volumen von 5 cm. Nachdem so viel Wasser verdunstet ist, dass der Wassergehalt unter den Umschlagspunkt hinabgelangt ist, wird das Volumen aufs neue bestimmt und beträgt nun 4 cm. Die Volumverminderung beträgt also 1 cm, entsprechend 1 g Wasser. Ist das Gewicht der getrockneten Probe 8 g, so entspricht 1 g Wasser 12.5 Prozent, um welchen Betrag der ursprüngliche Wassergehalt 25 Prozent vermindert werden muss, um den Umschlagspunkt zu erhalten, der also in diesem Fall bei 12.5 Prozent liegt.

Nach dieser Methode ist der Umschlagspunkt für die Bodenarten bestimmt worden, für welche Festigkeitskurven festgestellt worden sind, mit Ausnahme der reinen Sandböden, der Schluffböden und der Moschlufflehme, da diese unmittelbar über dem Umschlagspunkte so lose werden, dass ein hinreichend zusammenhaltender Erdklumpen nicht erhalten werden kann. Will man für diese den fraglichen Punkt erhalten, so dürfte eine Bestimmung der Grenze für das plötzliche Erhärten den besten Wert des Umschlagspunktes liefern.

In der nachfolgenden Tabelle sind zum Vergleich die Schrumpfungsgrenze, bestimmt auf die oben angegebene Weise, und der aus den Kurven erhaltene Umschlagspunkt zusammengestellt. Die Zahlen in den Spalten für den Wasserge-

halt bezeichnen die Anfangsfeuchtigkeit bei den Schrumpfungsbestimmungen und bei den Festigkeitsbestimmungen.

Klasse und Nummer der Bodenart.	Wassergehalt.	Schrumpfungsgrenze.	Wassergehalt.	Umschlagspunkt.
<i>Moschlufflehme:</i>				
109 . . . . .	20.5	16.0	21.3	16.0
107 . . . . .	22.4	16.4	24.1	12.0 ?
363 . . . . .	23.6	18.3	25.9	19.0
<i>Motone:</i>				
163 . . . . .	21.7	13.6	21.8	13.4
95 . . . . .	21.9	16.0	19.5	15.0
274 . . . . .	19.2	15.2	20.5	14.6
<i>Schlufftonböden:</i>				
231 . . . . .	30.2	21.0	31.5	22.8
39 . . . . .	30.6	22.5	31.1	23.5
168 . . . . .	21.6	14.0	24.3	14.5
124 . . . . .	20.8	15.0	25.5	14.2
<i>Humose Tonböden:</i>				
97 . . . . .	35.4	22.0	40.6	22.0
16 . . . . .	52.0	38.0	53.2	40.0
<i>Sehr schwere Tone:</i>				
164 . . . . .	32.7	12.4	46.2	15.4
162 . . . . .	40.2	14.0	33.7	14.0
121 . . . . .	33.7	12.1	32.1	13.0
166 . . . . .	28.1	14.9	35.1	17.0
309 . . . . .	24.7	11.5	22.9	11.0
85 . . . . .	33.6	17.6	33.2	18.0
275 . . . . .	32.4	21.2	34.5	23.0
161 . . . . .	28.0	16.4	33.3	18.4

Die Übereinstimmung zwischen den Zahlen spricht dafür, dass die beiden Grenzen identisch sind. Etwas höhere Werte zeigen im allgemeinen die Zahlen des Umschlagspunktes, gewöhnlich aber ist hier das Prisma bei höherem Wassergehalt angefertigt als das Stück, an dem die Schrumpfungsbestimmung ausgeführt worden ist. Der Wassergehalt der

Bodenart bei der Anfertigung des Prismas hat nämlich einen gewissen Einfluss auf die Lage des Umschlagspunktes, indem der Umschlagspunkt oder die Schrumpfungsgrenze um so höher liegt, je höher der Wassergehalt ist, bei dem das Prisma angefertigt wurde.<sup>1</sup> Einige Versuche zeigen dies deutlich. Zu denselben wurden die sehr schweren Tone Nr. 162 und Nr. 121 angewandt.

Nr. 162		Nr. 121	
Wassergehalt.	Umschlagspunkt.	Wassergehalt.	Umschlagspunkt.
40.2	14.0	33.7	12.1
32.9	12.7	28.7	11.1
26.2	11.4	25.5	11.3

Die Tabelle zeigt, dass, bei je niedrigerem Wassergehalt die Bodenart geformt wird, um so niedriger der Umschlagspunkt liegt. Die Erklärung hierfür liegt nahe. Je niedriger der Wassergehalt ist, bei dem die Formung geschieht, um so besser müssen die Ungleichmässigkeiten der Partikeln beim Drücken sich an einander fügen und das Porenvolumen in demselben Masse kleiner werden, gegenüber dem Verhältnis bei hohem Wassergehalt, wo die Partikeln durch eine dickere Wasserschicht von einander getrennt liegen und vielleicht einander nur in vereinzeltten Punkten berühren. Da sie dann beim Schrumpfen sich einander nähern, kann es ja leicht eintreffen, dass hervorstehende Ecken gegen einander stossen und die Partikeln sozusagen aufgestapelt werden.

Die Änderung der Lage des Umschlagspunktes mit der Anfangsfeuchtigkeit liefert die Erklärung für die von ATTERBERG nachgewiesene Tatsache, dass die Festigkeitszahlen der Böden um so niedriger sind, bei je höherem Wassergehalt die Prismen hergestellt werden, denn ein poröserer Körper muss geringere Festigkeit besitzen als ein dichterere von im

<sup>1</sup> ARON giebt im Gegensatz hierzu an, dass die Schrumpfungsgrenze stets dieselbe ist unabhängig von der Anfangsfeuchtigkeit.

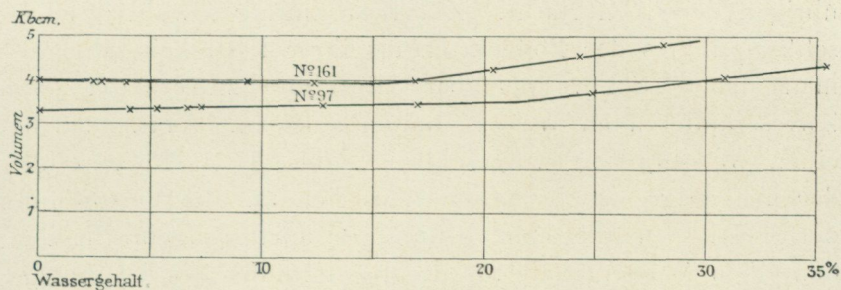


Fig. 6.

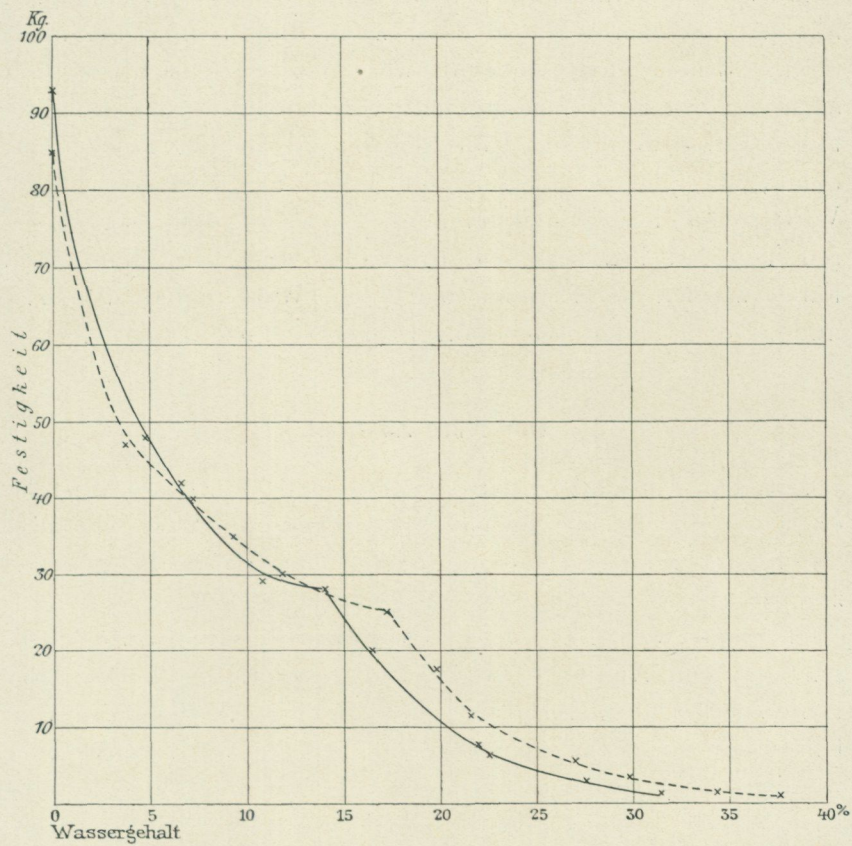


Fig. 7.

übrigen derselben Natur. Zur Bestimmung sowohl des Umschlagspunktes der Bodenarten als ihrer Festigkeitszahl muss man daher, um vergleichbare Resultate zu erhalten, von korrespondierenden Wassergehalten ausgehn. ATTERBERG hat einen Wassergehalt vorgeschlagen, der 2—3 Prozent über der Ausrollgrenze liegt, sofern es sich um die Bestimmung der Festigkeitszahl handelt, und es dürfte angebracht sein, denselben Wassergehalt für die Bestimmung des Umschlagspunktes zu wählen.

Es ist klar, dass eine Verschiedenheit des Wassergehaltes beim Formen der Prismen für Festigkeitsbestimmungen auch eine Verschiedenheit des Aussehens der Festigkeitskurven mit sich bringen wird, so dass, wenn die Prismen bei niedrigerem Wassergehalt geformt werden, der Umschlagspunkt nach niedrigerem Wassergehalt verschoben werden und die Festigkeit sowohl am Umschlagspunkt als bei Trockenheit näher, im plastischen Zustande aber niedriger sein wird. Vorstehende Festigkeitskurven, die sich auf den sehr schweren Ton Nr. 162 beziehen, illustrieren dies. In dem einen Falle wurden die Prismen bei einem Wassergehalt von 47.0 und in dem anderen bei 33.7 Prozent geformt.

### Der feste Zustand.

Mit dem Umschlage tritt der Boden in den festen Zustand ein, der durch eine gewisse Sprödigkeit der Masse, bedingt durch die relative Unbeweglichkeit der Partikeln, gekennzeichnet ist.

Gleichwie VAN BEMMELEN's »Abwässerungskurve« vom Umschlage, dem Abschnitt  $A_{\alpha\beta}$  an, in gerader, fast horizontaler Linie verläuft, so verlaufen auch die Festigkeitskurven vom Umschlagspunkte an meistens eine Strecke weit in mehr oder weniger horizontaler Richtung. Offenbar liegt hier dieselbe Ursache wie bei dem geradlinigen Verlauf der »Abwässerungskurve« zugrunde, woraus hervorgeht, dass die zwischen den Punkten O und  $O_1$ ,  $A_{\alpha\beta}$ , weggehende Feuchtigkeit denselben

Dampfdruck besitzt und demnach in dem Gel in einem physikalisch gleichartigen Zustand vorkommen muss. Nach VAN BEMMELEN ist es das sog. Porenwasser, das während dieser Zeit weggeht.

Sind die Poren sehr klein, so liegt ein relativ grosser Teil des Porenwassers innerhalb der molekularen Attraktionssphäre der Partikeln und ist demnach an der Oberfläche der Partikeln adsorbiert, und nur ein geringerer Teil ist eigentliches Porenwasser, weshalb bei den feinkörnigeren Bodenarten das horizontale Stück der Kurve kürzer sein muss, was auch bei den sehr schweren Tönen der Fall ist.

HALL<sup>1</sup> hat berechnet, dass alles Wasser, das sich in den Poren eines Tones befindet, unter der Wirkung der molekularen Attraktionskräfte stehn muss, vorausgesetzt dass der Durchmesser der Partikeln zu  $0.2 \mu$  angesetzt werden kann. Ein Wassermolekül kann sich nämlich höchstens in einem Abstände von  $\frac{1}{3}$  des Durchmessers der Partikeln von der Oberfläche einer Partikel befinden, d. h. in diesem Falle in einem Abstand von  $0.04 \mu$ , nach QUINKE wirkt aber die molekulare Attraktion bereits in einem Abstand von  $0.05 \mu$ .

Völlig so fein scheinen indessen gewöhnlich die Poren nicht einmal bei den sehr schweren Tönen zu sein, denn bei allen mit Ausnahme von Nr. 309 findet man das horizontale Gebiet, wenn auch bedeutend reduziert, wieder.

Die Undurchdringlichkeit der Töne für Wasser beruht nach HALL eben auf der Feinheit der Poren, welche bewirkt, dass alles Wasser molekular gebunden vorkommt.

Bei einigen Böden hat es sich gezeigt, dass die Festigkeitskurven gleich nach dem Umschlagspunkt sogar im Sinken begriffen sind. Dies gilt für die reingeschlammten Sandarten sowie für Schluffböden und einige Moschlufflehme, d. h. für die Böden, die wirklichen Ton entbehren.

Wie wir vorher mit ZSIGMONDY angenommen haben, bilden sich beim Verdunsten kleine konkave Menisken zwischen den

<sup>1</sup> Le Sol. S. 110.

Körnern an der Oberfläche aus, und diese Menisken drücken die Partikeln zusammen. Dass es diese zusammenhaltende Kraft der Menisken ist, die die Festigkeit bewirkt, erscheint klar bei den Sandarten oder bei den Böden, die bei Trockenheit zu einem losen Pulver zerfallen, wo also die Kohäsion allzu gering ist, um auch nur die Schwere der Partikeln aufzuheben. Die mit der Feuchtigkeit eintretende Abnahme der Festigkeit kann dann als auf Verminderung der Anzahl zusammenhaltender Menisken beruhend angesehen werden, die ja gleichzeitig damit eintreten muss, dass die Poren allmählich an Wasser entleert werden.

Die nach der Trockenheit hin schliesslich eintretende Steigerung der Festigkeit kann mehr oder weniger rasch geschehen. Die Festigkeit der bei  $100^{\circ}$  getrockneten Probe kann bei einigen Böden recht hohe Beträge erreichen, und zwar trotzdem die Festigkeit am Umschlagspunkt sehr unbedeutend sein kann. Als besonders eigentümlich in dieser Hinsicht seien die beiden Molehme Nr. 109 und Nr. 301 genannt, die am Umschlagspunkt eine Festigkeit von 2 bzw. von 1 kg hatten, getrocknet aber die Festigkeiten 36 bzw. 26 kg zeigten.

Worauf diese rasche Steigerung der Festigkeit in der Nähe der Trockenheit eigentlich beruht, ist nicht leicht zu verstehn, zumal da die Schrumpfvversuche kein oder ein nur sehr unbedeutendes Schrumpfen der Böden nach dem Umschlagspunkt ergaben, so dass also der gegenseitige Abstand der Partikeln nahezu derselbe bleibt; eine erhebliche Steigerung der Kohäsionskräfte sollte daher nicht zu erwarten sein.

Die vollständigste Auskunft über die Zähigkeit oder den Grad der Bearbeitbarkeit erhält man natürlich aus den Festigkeitskurven, die die Zähigkeit bei allen Wassergehalten zeigen. ATTERBERG benutzt die Festigkeitszahl, d. h. die Festigkeit der bei  $100^{\circ}$  getrockneten Probe, als Mass der Zähigkeit. Dies hat jedoch die Misslichkeit an sich, dass die Festigkeit der Böden in einem Zustande bestimmt wird, in welchem man

nie einen Tonboden bearbeiten kann, denn man würde solchenfalls Hämmer benötigen, um ihn zu zerkleinern; übrigens kann es auch nicht zu so starkem Austrocknen des Bodens kommen, indem höchstens einzelne Schollen in starker Sonnenhitze auf 40—50° erwärmt werden.

Die Festigkeitszahl könnte ja demungeachtet als Mass der Zähigkeit angewandt werden, falls die Festigkeit proportional der Zunahme des Wassergehalts abnähme, was jedoch nach Ausweis der Kurven nicht der Fall ist. Am richtigsten wäre es natürlich, die Zähigkeit bei einem Wassergehalt zu bestimmen, bei welchem die Böden bearbeitet werden können. Den zweckmässigsten Wassergehalt hierfür scheint der Umschlagspunkt zu repräsentieren, da der Boden eben dann in den Zustand eingetreten ist, in welchem er sich am besten zur Bearbeitung eignet. Diese ist natürlich bei so hohem Wassergehalt wie möglich vorzunehmen, damit die geringste Kraft in Anspruch genommen wird, andererseits aber nicht bei so hohem Wassergehalt, dass der Boden sich im plastischen Zustande befindet. Hierin sind die Tonböden sehr diffizil. Es genügt nicht, dass der Boden so trocken ist, dass er nicht an den Geräten klebt, er muss noch trockener sein, denn wenn der Boden innerhalb des plastischen Gebietes bearbeitet wird, so hat dies zur Folge, dass die körnige Struktur, die eventuell vor der Bearbeitung vorhanden war, und die notwendig ist, damit Luft und Pflanzenwurzeln in einen Tonboden sollen eindringen können, zerstört wird. Durch die Geräte werden die Erdklumpen gegeneinander gedrückt, und wenn dann der Boden sich in plastischem Zustande befindet, backen jene zusammen und die Erde wird folglich noch dichter, als sie vorher schon war; man erhält somit eine der beabsichtigten entgegengesetzte Wirkung. Es ist auch den Landwirten zur Genüge bekannt, dass die Struktur eines Tonbodens sehr leicht sich durch Bearbeitung zu unzweckmässiger Zeit zerstören lässt. Praktiker haben auch ein Verfahren, den geeigneten Zeitpunkt für die Bearbeitung zu bestimmen. Die Erde wird in die Hand genommen und zusammengepresst;

ist sie dann so trocken, dass sie sich nicht zu einem Ball zusammenpressen lässt, sondern zerbröckelt, so ist die Zeit für die Bearbeitung gekommen — eine praktische Methode, die Haftgrenze oder den Umschlagspunkt zu bestimmen.

Sollte die Festigkeit am Umschlagspunkt bereits so hoch sein, dass ein Paar Zugtiere nicht die erforderliche Kraft zu liefern vermögen, so ist der Boden bei gewöhnlicher Bestellungswiese als Kulturboden unbrauchbar. Nr. 121 z. B., die zähste der hier angeführten Bodenarten, hat bereits am Umschlagspunkt eine Festigkeit von 35 kg, d. h. 35 kg sind notwendig, um mittelst eines Keiles ein Prisma von nur 2 cm Breite und 2 cm Dicke zum Bersten zu bringen. Ganz sicher ist dieser Boden allzu zäh, um am Umschlagspunkte bearbeitet werden zu können. Zwar sind keine Versuche über den Kraftverbrauch bei der Bearbeitung verglichen mit der auf angegebene Weise erhaltenen Festigkeit angestellt worden, bedenkt man aber, dass die Arbeit, die ein Paar Zugtiere leisten können, nur 150 kgm (eine Pferdekraft = 75 kgm) beträgt, so ist es unwahrscheinlich, dass die Kraft zweier Pferde dazu ausreichen wird, einen Pflug in dem genannten Boden vorwärtszuziehen, auch wenn man berücksichtigt, dass die Erde bei natürlicher Lagerung mehr oder weniger locker ist, was natürlich den Widerstand vermindert.

Bei den sehr schweren Tönen steigt die Festigkeit stark fast unmittelbar nach dem Umschlagspunkt, so dass, wenn auch die Festigkeit an diesem Punkt für die Bearbeitung nicht zu hoch sein sollte, der Boden nur einige wenige Prozente trockener zu werden braucht, um dies unmöglich zu machen. Man muss daher den richtigen Zeitpunkt sehr genau wahrnehmen.

Es ist klar, dass, da die plastischen Eigenschaften am Umschlagspunkt nicht plötzlich, sondern erst allmählich aufhören, es möglich sein wird, den Boden mit Vorteil auch noch bei einem Wassergehalt zu bearbeiten, der um einige Prozent den genannten Punkt übersteigt. Der Umschlags-

punkt ist daher als eine theoretische Grenze für die Bearbeitbarkeit aufzufassen.

Bei der Herbstbestellung bedeutet es wenig, wenn der Boden im plastischen Zustande bearbeitet wird, da der Frost während des Winters die Lockerheit des Bodens wiederherstellt, wenn sie verloren gegangen ist. Dass der Frost einen lockernden Einfluss auf den Boden ausübt, ist eine bekannte Sache, die auch experimentell nachgewiesen worden ist, betreffs des Mechanismus bei diesem Prozesse herrscht aber nicht volle Einigkeit der Ansichten.<sup>1</sup> Eine Auflockerung des Bodens kann nicht eintreten, ohne dass dieser einen Wassergehalt besitzt, der sich wenigstens in der Nähe des Umschlagspunktes befindet. Der Boden zerbricht dann bei dem Druck, der dadurch entsteht, dass das Wasser in den Hohlräumen zu Eis gefriert und damit an Volumen zunimmt. Dass das Wasser bei der Frostbildung zu Kristallisationszentren zusammengezogen wird, und dass damit die umgebenden Partien trockener werden (unter den Umschlagspunkt gelangen), habe ich zuvor nachgewiesen.<sup>2</sup>

### Über die Wasseraufnahme der Bodenarten und über Solifluktion.

Bisher haben wir ausschliesslich die Erscheinungen bei abnehmender Feuchtigkeit der Bodenarten behandelt. Im Nachstehenden sollen kurz auch die Verhältnisse bei zunehmender Feuchtigkeit, wobei die Böden, statt Wasser abzugeben, solches aufnehmen, berührt werden. Schon a priori ist es verständlich, dass die Fähigkeit der Böden, Wasser aufzunehmen, beschränkt sein muss, denn sonst würden sie bei reichlichem Niederschlage eine so lose Konsistenz annehmen, dass sie wegflössen, was nur ausnahmsweise geschieht. Die

<sup>1</sup> MITSCHERLICH, Bodenkunde für Land- und Forstwirte. 2. Aufl., Berlin 1913, S. 89.

<sup>2</sup> Om fuktighetens fördelning och salpeters vandrings i lerjord. Medd. fr. Ultuna Lantbruksinstitut 1910, Nr. 10.

Sandböden z. B. können Wasser bis zu einem dem Umschlagspunkt entsprechenden Feuchtigkeitsgehalt aufnehmen, werden dann aber hart und fest. Und geht man über ein Tonfeld nach Regen, so merkt man, dass der Ton zwar so viel Wasser aufgenommen hat, dass er lose und klebrig geworden ist; untersucht man ihn aber genauer, so findet man, dass nur die oberflächlichste Schicht so feucht ist, dass sie klebt. Der darunterliegende Ton hat gewöhnlich auch nach sehr reichlichem Niederschlag nicht so viel Wasser aufnehmen können, dass er klebt. So viel Wasser, dass er zu fließen beginnt, nimmt er gewöhnlich nicht auf.

Es giebt jedoch gewisse Bodenarten, die sog. Fließlehme, die Wasser in so grosser Menge aufnehmen, dass sie in trögflüssige Form übergehen. Die Erscheinung (*Erdfließen*, *Solifluktion*) hat in letzter Zeit seitens der Geologen viel Aufmerksamkeit gefunden, nachdem J. G. ANDERSSON<sup>1</sup> sie von Beeren-Eiland und den Falklandsinseln beschrieben hat, woselbst Solifluktion in viel grösserem Massstabe vorkommt, als wir es bei uns gewohnt sind. Eine erschöpfende Erklärung ist bisher für die Erscheinung jedoch nicht geliefert worden. J. G. ANDERSSON ist der Ansicht, dass die Solifluktion an periglaziale Gebiete gebunden ist, wo sie durch eigenartige klimatologische Verhältnisse hervorgerufen wird. Der nächste Anlass für das Erdfließen ist der, dass die staubfeine Erde so viel Schmelzwasser aufnimmt, dass sie in flüssigen Zustand gerät. SERNANDER,<sup>2</sup> der die Erscheinung in unseren Hochgebirgsgegenden studiert hat, betont den engen Zusammenhang derselben mit sog. Schneelagern, d. h. bis weit in den Sommer hinein liegen bleibenden Schneewehen.

In einer Schrift »Om s. k. jäslera och om villkoren för dess bildning» weist HÖGBOM<sup>3</sup> darauf hin, dass Erdfließen auch in nicht arktischen Gegenden auftreten kann. Die sog.

<sup>1</sup> Solifluction, a component of subaërial denudation. The Journal of Geology, Vol. XIV, 1906.

<sup>2</sup> Flytjord i svenska fjälltrakter. G. F. F., Bd. 27, 1905.

<sup>3</sup> G. F. F., Bd. 27, 1905.

Sätertäler sind durch Erdfliessen entstanden, indem Wasser von unten her sich in die Erdschichten eingesogen und sie in flüssigen Zustand versetzt hat. HÖGBOM meint, dass alle Bodenarten unter gewissen Bedingungen in flüssigen Zustand geraten können, und dass sog. Gärton (jäslera) keine bestimmte Bodenart ist, dass aber Moablagerungen eine besondere Neigung zum Fliessen haben (der Ausdruck Mo bei HÖGBOM umfasst etwas feinere Partikeln als derselbe Ausdruck bei ATTERBERG).

In Übereinstimmung mit HÖGBOM hat auch STEN DE GEER<sup>1</sup> sich über die Bildungsweise der Sätertäler und ihre Abhängigkeit von der Korngrösse der Sedimente geäussert. »Überall, wo Grundwasser vorhanden ist, werden ältere Feinerdterrassen von solchen Ravinen zerschnitten. Die Abhängigkeit der Sätertäler von der Korngrösse des Sediments ergibt sich sehr deutlich aus ihrer geographischen Ausbreitung im Verhältnis zu grösseren Geröllablagerungen, wie bei Hällsjöfältet in Karlskoga bergslag. Auf dem Geschiebegrus selbst, gleichwie auf dem dicht daneben liegenden weiten Sandfeld, finden sich keine Ravinen. Danach kommt eine Zone von 'mjäla' (d. i. sehr feinem Sand), die eben durch Zweigtäler dieses Typus reich skulptiert ist, und schliesslich beginnt noch feinerer Ton, wo sie dagegen vollständig fehlen.»

Auch BJÖRLYKKE<sup>2</sup> fasst Fliesserde als eine besondere Bodenart auf. Er beschreibt sie als eine feinere, mehlähnliche Bodenart, hauptsächlich bestehend aus äusserst feinen Quarzkörnern und etwas Kaolin und Tonpartikeln, abgesetzt in stillstehendem Wasser oder ausgewaschen aus älteren Moränen und wieder abgesetzt auf geneigtem oder ebenem Terrain. Die Bodenart hat in Norwegen seitens der Bevölkerung besondere Namen erhalten, in einigen Gegenden wird sie »koppjord«, in anderen »kvabb« genannt. Besonders ist es die Zeit im Frühling, wenn der Frost aus der Erde geht, wo das Erdfliessen auftritt.

<sup>1</sup> Klarälvens serpentinnopp och flodplan. S. G. U. Årsbok 4 (1910), S. 179.

<sup>2</sup> Om jordbunden i skogen, Kristiania 1903, S. 11.

Stellt man die von verschiedenen Forschern angegebenen Bedingungen für das Erdfließen zusammen, so sind die wichtigsten folgende: die Bodenart muss vor allem zum Fließen geneigt sein, zu welchem Zweck sie aus staubfeinem Sande, Schluff oder »mjäla« bestehen muss, ferner müssen gewisse äussere Bedingungen vorhanden sein, wie dass der Frost aufhört, oder dass das Grundwasser zu der fraglichen Bodenschicht Zutritt hat, was eine gewisse Durchlässigkeit des Bodens voraussetzt. W. v. LOZINSKY<sup>1</sup> dagegen ist der Ansicht, dass eine undurchdringliche und »schlüpfrige« Schicht darunter liegen muss, wenn Fließen zustande kommen soll.

Die Fliesserde steht offenbar in Zusammenhang mit dem Wasseraufnahmevermögen der Bodenarten. Kann ein schwerer Ton so viel Wasser aufnehmen, dass er sich der Fliessgrenze nähert, so wird er ja zu einer Fliesserde ebensogut, wie ein Schluffboden oder »mjäla« es wird.

Über das Wasseraufnahmevermögen sind einige Versuche ausgeführt worden. Die seit alters angewandte Methode zur Bestimmung desselben, wobei Erde in trockenem, feinerriebenen Zustand mehr oder weniger stark gepresst zur Wasseraufnahme gebracht wird, giebt allzu hohe Werte ohne Gegenstück in der Natur. Die Methode ist denn auch in letzterer Zeit verworfen worden.<sup>2</sup> Es war daher notwendig, einen anderen Weg zu beschreiten, wollte man den natürlichen Verhältnissen näher kommen. Boden in natürlicher Lagerung gerät ja bei allerhand Wassergehalten in Berührung mit Wasser, und es ist nicht sicher, dass bei verschiedenem Anfangsstadium das Endresultat dasselbe ist. Am zweckmässigsten schien es daher, zu untersuchen, wie die Bodenart sich bei verschiedenem Wassergehalt gegenüber Wasser verhält. Zu diesem Zwecke wurde ein Prisma aus der Bodenart bei einem gewissen Wassergehalt geformt und dann zum Trocknen hingestellt. Von Zeit zu Zeit wurden Würfel von dem Prisma abgeschnitten, die dann verschiedene Wasserge-

<sup>1</sup> Comptes Rendus XI Congrès Géologique international 1910, S. 1039.

<sup>2</sup> KOPECKY, Die physikalischen Eigenschaften des Bodens. Prag 1904.

halte aufwiesen. Die Würfel wurden in bedeckte, etwas Wasser enthaltende Schalen gestellt und dann beobachtet, wie sie sich dem Wasser gegenüber verhielten. Sie wurden dann eine Woche lang in Wasser stehn gelassen, worauf ihr Feuchtigkeitsgehalt bestimmt wurde, nachdem sie zuerst mittelst Filtrierpapier von dem an der Oberfläche adhärierenden Wasser befreit worden waren. Derartige Bestimmungen sind natürlich ziemlich unsicher und können nur einen qualitativen Ausdruck für die Wasseraufnahme liefern.

Im Folgenden seien die Beobachtungen an zwei Bodenarten mitgeteilt, von denen die eine, Nr. 162, ein sehr schwerer Ton, und die andere, Nr. 328, ein Schluffboden war, von dem Einsender, Herrn Direktor Rhodin, als Fließlehm, der »wie Sirup in den Gräben floss«, bezeichnet.

**Nr. 162. Umschlagspunkt = 16. Fließgrenze = 50.**

Wassergehalt		Bemerkungen
vorher	nachher	
50.0	56.1	Würfel unverändert.
33.6	44.6	» »
30.2	43.4	» »
14.8	39.3	Kleine Spalten, auf den Seiten sich etwas abblättern.
4.8	—	Der Würfel zerbarst vollständig.

**Nr. 328. Umschlagspunkt = 22. Fließgrenze = 22.4.**

Wassergehalt		Bemerkungen
vorher	nachher	
22.7	23.3	Die Seiten so hoch, wie das Wasser stand, teilweise herabgestürzt.
22.0	28.4	d:o d:o
11.9	—	Der Würfel vollständig zerflossen.
6.9	—	» » » »

Befindet sich der Boden bei einem Wassergehalt unter dem Umschlagspunkt, so dass er also teilweise mit Luft angefüllt

ist, so dringt Wasser kapillar ein und verdrängt die Luft, die dabei den Würfel zersprengt. Die Zersprengung erstreckt sich jedoch bei den Tonen nicht auf die einzelnen Körner. Bei den tonfreien Bodenarten dagegen, wo ein Bindemittel zwischen den einzelnen Körnern fehlt, geht der Zerfall weiter. Über dem Umschlagspunkt blieben die Tone dem Anschein nach unberührt. Der Wassergehalt hatte jedoch etwas zugenommen, um so mehr, je weniger wasserhaltig der Ton von Anfang an war. Wahrscheinlich beruht die Zunahme des Wassergehalts, was den schweren Ton betrifft, nur auf einer Zunahme in der äussersten Schicht und auf anhaftendem Wasser, da ja die schweren Tone zu dicht sind, als dass das Wasser tiefer eindringen könnte.

Um das Anhaften von Wasser an der Oberfläche des Würfels zu vermeiden und den Würfel nicht nachher mit Filtrierpapier abtrocknen zu brauchen, was natürlich eine Unsicherheit der Resultate zur Folge haben muss, wurde die Bodenart bei verschiedenen Wassergehalten in Röhren von 3 cm Höhe, die unten mit weitmaschigem Stoff zugebunden waren, eingestampft. Die Röhren wurden dann eine Woche lang in Wasser stehn gelassen, so tief, dass die Wasseroberfläche ausserhalb der Röhren bis zur oberen Fläche der Erdsäule heranreichte. Versuche konnten nur bei Feuchtigkeitsgehalten oberhalb des Umschlagspunktes angestellt werden, da die Bodenart unterhalb desselben sich nicht gut zusammenpressen lässt. Die Probe war unterdessen vor Verdunstung dadurch geschützt, dass die oberen Enden der Röhren mit Wattepfropfen verstopft waren. Vor der Feuchtigkeitsbestimmung wurde die unterste Schicht der Erdsäule, die in direkter Berührung mit dem Wasser gewesen war, weggeschnitten.

Aus der Tabelle geht hervor, dass die geringste Quantität Wasser, wenn überhaupt welches, Nr. 307, ein Moton, aufgenommen hat, da die geringe Zunahme, die die Tabelle zeigt, innerhalb der Grenzen der Versuchsfehler liegt. Bei den übrigen, weniger tonhaltigen Bodenarten, die leichter

für Wasser durchlässig sind, ist eine Zunahme vorgekommen, aber nur um einige wenige Prozente über die Anfangsfeuchtigkeit. Von einem trockneren Ausgangsstadium aus kann eine Bodenart nicht denselben Wassergehalt erreichen wie von einem feuchteren aus. D. h. mit anderen Worten, die humusfreien Bodenarten sind nicht in Wasser schwellbar. Auch in dieser Beziehung ähneln die Bodenarten den oben-erwähnten Gelen.

Im Zusammenhang mit den obenerwähnten Untersuchungen über die Wasserverdunstung (»Entwässerung») der Gele hat VAN BEMMELEN auch die Wasserabsorption (»Wiederwässerung») studiert. Es zeigte sich, dass, wenn man das Gel bei Wiedererhöhung des Dampfdrucks Wasser aufnehmen liess, es nicht alles Wasser aufnehmen konnte, das es bei einer vorhergehenden Entwässerung verloren hatte, sondern in den Fällen, wo der Wassergehalt des Gels zu Anfang über dem Umschlagspunkt lag, nahm es nur weitere 0.2—0.3 Mol Wasser pro Mol Kieselsäure auf.

Klasse und Nummer der Bodenart	Wassergehalt		Zunahme
	vorher	nachher	
<i>Moton</i> , 307 . . . . .	29.0	29.0	0.0
» » . . . . .	23.4	24.5	1.1
» » . . . . .	17.0	17.8	0.8
<i>Moschlufflehm</i> , 185 . . . . .	30.6	33.6	3.0
» » . . . . .	26.3	31.0	4.7
» » . . . . .	22.1	24.4	2.3
<i>Schluffboden</i> , 328 . . . . .	31.9	31.9	0.0
» » . . . . .	29.0	30.8	1.8
» » . . . . .	25.3	27.5	2.2

Lag das Ausgangsstadium unter dem Umschlagspunkt, so nahm das Gel zunächst so viel Wasser auf, dass die Hohlräume ausgefüllt wurden (bis zum Umschlagspunkt), und dazu noch weiter dieselbe Quantität wie im vorigen Falle. Eine Volumzunahme bei der Wasseraufnahme konnte nicht

konstatiert werden. Die Gele von Kieselsäure gleichwie von Aluminium- und Eisenoxydhydrat sind nicht schwellbar im Gegensatz zu Gelatine, Agar-Agar, Stärkekörnern und anderen organischen Substanzen, die die Fähigkeit besitzen, ansehnliche Quantitäten Wasser unter Zunahme ihres Volumens aufzunehmen.

Die genauere Ursache dieses Unterschiedes zwischen schwellbaren und nichtschwellbaren Körpern kennt man noch nicht. NÄGELI<sup>1</sup> hat die Theorie aufgestellt, dass bei schwellenden Körpern eine grössere Attraktion gegenüber Wasser als zwischen den Partikeln untereinander bis zu einem gewissen Abstände zwischen diesen besteht. Die Attraktion gegenüber den Wassermolekülen soll rascher mit dem Abstände als die Attraktion zwischen den Partikeln unter einander abnehmen.

In voller Übereinstimmung mit dem Verhalten des Kieselsäuregels gegen Wasser, wenn es sich über dem Umschlagspunkt befand, stehen auch die Bodenarten, indem nur einige wenige Procente Wasser noch weiter aufgenommen werden können. Soll daher eine Bodenart zum Fliesen neigen, eine Fliesserde sein, so müssen diese wenigen Prozent genügend sein, um die Festigkeit in so hohem Grade herabzusetzen, dass Fliesen eintritt, d. h. für diese Bodenarten müssen die Festigkeitskurven rasch mit zunehmendem Wassergehalt sinken, was bei den Kurven der Schluffböden, der Moschlufflehme und teilweise der Schlufftone auch der Fall ist. Demnach bei den Bodenarten, die hauptsächlich aus Schluff und Partikeln benachbarter Grösse bestehen, die aber wenig wirklichen Ton enthalten.

Schon mittelst einer oberflächlichen Untersuchung kann man entscheiden, ob man es mit einer Fliesserde zu tun hat oder nicht. Ein Teig aus Fliesserde ist nämlich wie eine Flüssigkeit von hoher Viskosität, die Ähnlichkeit mit einer Flüssigkeit ist aber nicht nur darauf beschränkt, dass die

---

<sup>1</sup> ZSIGMONDY, Kolloidchemie, S. 70.

Erde sich in flüssigem Zustande befindet (ein zäher Ton wird ja auch, mit einer hinreichenden Menge Wasser verrührt, flüssig), sondern in Analogie mit einer Flüssigkeit ist der Teig wie von einer zähen Hülle umgeben. Die Hülle ist gleichsam eine festere Haut, die den mehr leichtbeweglichen Inhalt umgibt. Bei Drücken auf eine Stelle der Oberfläche pflanzt sich der Druck wie in einer Flüssigkeit durch die Masse bis zur Hülle hin fort, die in eine schaukelnde Bewegung in gleichem Takt mit den Stößen versetzt wird. Es bildet dies ein gutes Erkennungszeichen für Fließerde.

Ein anderes Merkmal der Fließerde, das vermutlich gleichfalls mit der zähen Oberfläche zusammenhängt, ist das, dass der Teig in Fäden fast wie Sirup ausgezogen werden kann.

Damit die innere Masse sich leichtbeweglich halten soll, ist erforderlich, dass die Partikeln so klein sind, dass ihre Schwere im Verhältnis zu ihrer Oberfläche eine geringe Rolle spielt. Grössere Sandpartikeln bilden ein festeres Skelett und erlauben dem Wasser, zwischen den Körnern zu passieren, ohne selbst an der Bewegung teilzunehmen. Wo die Grenze anzusetzen ist, lässt sich wohl schwerlich anders als auf experimentellem Wege entscheiden.

Beobachtet man die Zähigkeit bei den Sandsortierungen, so findet man, dass sie am grössten bei der kleinsten Sandsortierung ist. So bildete die Körnergruppe  $2\ \mu$ — $0.6\ \mu$  einen Teig, der zäh wie Kitt war. Die Zähigkeit nimmt dann mit zunehmender Korngrösse ab, so dass bei der Gruppe  $0.05$ — $0.02$  mm die Zähigkeit wenig ausgesprochen war. Da die Zähigkeit ein Merkmal der Fließerde ist, so kann die obere Grenze für fließerdebildende Partikeln bei  $0.05$  mm angesetzt werden, d. h. die Partikeln müssen zum grössten Teil wenigstens aus feinerem Mo (Mehlsand) bestehn, damit die Bodenart Fließeseigenschaft besitzen soll.

Die grobkörnigste Fließerde, die in ATTERBERG's Bodenartensammlung vorkommt, ist eine »mjåla» von Sollefteå, die folgende Zusammensetzung hat:

Sand . . . . .	0.1	Prozent
Mo . . . . .	73.3	»
Schluff . . . . .	19.2	»
Ton . . . . .	7.2	»
Humus . . . . .	0.2	»

Wäre die Mogruppe noch weiter zerlegt, so würde sehr wahrscheinlich der grösste Teil der Untergruppen sich als dem Mehlsand zugehörig erweisen. Alle übrigen hier untersuchten Fliesserarten haben als überwiegenden Bestandteil Schluff gehabt.

Wo nun die untere Grenze anzusetzen ist, wie klein die Partikeln sein können, damit der Fliesserdytypus hervortreten soll, hat nicht bestimmt werden können, da keine Sortierung unterhalb der Gruppe  $2\ \mu$ — $0.6\ \mu$  vorgenommen worden ist. Aber bereits diese zeigte eine so grosse Zähigkeit, »wie Kitt«, dass eine noch feinere Sortierung vermutlich sich als allzu zäh erweisen würde, um ein Fliesen zu ermöglichen. Die Festigkeitskurven der Fliesserarten deuten auch darauf hin, dass wirklicher Ton fehlt, da das Ansteigen der Kurven nach Trockenheit hin bei den tonhaltigen Bodenarten durch den Ton verursacht wird. Ebenso haben diejenigen von den Fliesserarten, die bis zur  $0.6\ \mu$ -Grenze herunter geschlämmt worden sind, einen unbedeutenden Gehalt an Partikeln unterhalb dieser Grenze gezeigt, oft aber einen ziemlich hohen Prozentgehalt zwischen  $2\ \mu$  und  $0.6\ \mu$ . *Bei Bodenarten, die zum Fliesen neigen, werden somit die Partikeln zum grössten Teil zwischen den Grenzen  $0.05$  und  $0,0006\ \text{mm}$ , d. h. innerhalb des etwas erweiterten Gebiets der Schluffgruppe, liegen und wird wirklicher Ton fehlen.*

Aber wenn auch diese Bodenarten am meisten zum Fliesen neigen, können doch unter gewissen Bedingungen andere Bodenarten in diesen Zustand geraten. Die beiden »Fliesserd«-Proben von den Falklandsinseln her, die J. G. ANDERSSON<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Schwed. Südpolar-Exp., Bd. II, Lief. 2, S. 38.

hat analysieren lassen<sup>1</sup>, zeigten nämlich folgende mechanische Zusammensetzung:

	<i>a.</i>	<i>b.</i>
<i>Kies</i> . . . . .	1.3	—
<i>Sand</i> . . . . .	2.7	37.0
<i>Mo</i> . . . . .	22.5	14.8
<i>Schluff</i> . . . . .	20.2	9.3
<i>Ton</i> . . . . .	42,0	29.1
<i>Glühverlust</i> . . . . .	11.0	9.3

Der Analyse nach zu urteilen, ist *a* ein humoser Tonboden und *b* ein sandhaltiger Tonboden, und beide gehören nicht den eigentlichen Fließerdarten an.<sup>2</sup> Da sie demungeachtet zu grossartigen Solifluktionerscheinungen Anlass geben, muss die Ursache in äusseren Bedingungen liegen. Sehen wir daher zu, ob solche Umstände vorliegen, welche bewirken können, dass die Bodenarten auf einen Wassergehalt unter dem Umschlagspunkt austrocknen, von wo aus sie, wie ein vorhergehendes Experiment gezeigt hat, bedeutende Quantitäten Wasser unter vollständigem Zerfall aufnehmen können.

Ein sicher austrocknender Faktor ist eben die Frostbildung, die in diesen periglazialen Gebieten eine grosse Rolle spielen muss. Bekanntlich nimmt das Wasser beim Gefrieren an Volumen zu und wirkt daher zerteilend auf die Bodenpartikeln, ausserdem aber findet beim Gefrieren ein starker Zufluss von Wasser von unten her nach der Stelle hin statt, wo die Frostbildung vor sich geht, so dass der Wassergehalt in den gefrorenen Schichten beträchtlich den unter anderen Verhältnissen möglichen übersteigt, während die darunterliegenden Schichten in demselben Masse entwässert werden.

<sup>1</sup> Die Proben sind nach der älteren Methode geschlämmt worden, nach vorhergehender Behandlung mit Säure und Lauge.

<sup>2</sup> Die Möglichkeit liegt jedoch vor, dass der »Ton« zum grössten Teil aus Partikeln besteht, die bezüglich der Korngrösse sich dem Schluff nähern, zumal da die chemische Verwitterung, die eigentlich die feine Zerteilung der Partikeln zur Korngrösse des Tons bewirkt, in diesen Gegenden sehr langsam vor sich gehn muss und nur eine untergeordnete Rolle spielen kann.

Der Zufluss von Wasser von unten her hängt in erster Linie von der Leichtigkeit ab, mit welcher die Wasserbewegung sich vollziehen kann. In schweren Tonen ist diese sehr erschwert, und die gefrorenen Schichten werden daher weniger wasserreich, bei Bodenarten mit gutem Wasserleitungsvermögen wird dagegen Wasser aus grösserer Tiefe emporgezogen, und der gefrorene Boden nimmt mehr Wasser auf. In extremen Fällen kann die gefrorene Schicht ausschliesslich aus Eis bestehen (sog. Kammeis).

Zur Beleuchtung der Einwirkung des Frostes auf die Verteilung der Bodenfeuchtigkeit innerhalb der verschiedenen Schichten seien folgende Versuche angeführt. Eine Bodenprobe von einem gewissen Feuchtigkeitsgehalt wurde in eine Holzrinne eingestampft, die mit dem oberen Ende in einen gut isolierten Zinkkasten hineingesteckt wurde, in welchem die Luft mittelst einer den Kasten umgebenden Kältemischung abgekühlt gehalten wurde. Die Temperatur in dem Kasten war  $-5^{\circ}$ . Die kalte Luft in dem Zinkkasten kam mit der oberen Fläche der Erdsäule in Berührung, die auf analoge Weise wie in der Natur gefror. Nach eintägigem Frieren wurde die Feuchtigkeit in verschiedenen Niveaus der Erdsäule bestimmt. Es wurden, bei Versuch mit einer Bodenprobe, deren Anfangsfeuchtigkeit 31.6 Prozent betrug, folgende Wassergehalte in verschiedenen Niveaus nach eintägigem Frieren erhalten:

0— 3 cm (gefroren) . . . . .	46,0 Prozent
3— 6 » . . . . .	28,3 »
10—13 » . . . . .	28,9 »
20—23 » . . . . .	29,6 »

Dass Erdfliessen nicht allgemeiner beim Herausgeh'n des Frostes aus dem Boden auftritt, als es in Wirklichkeit der Fall ist, dürfte darauf beruhen, dass die Feuchtigkeit gewöhnlich in dem Masse verdunstet, wie der gefrorene Boden auftaut. Wird der Boden vor Wasserverlust während des Auftauens geschützt, wie es der Fall ist, wenn Wasser von

schmelzendem Schnee die Bodenoberfläche überrieselt, so sind die Bedingungen für das Erdfließen vorhanden.

Eine Möglichkeit für das Auftreten von Erdfließen liegt auch bei reichlichen Niederschlägen nach vorhergehender starker Trockenheit vor, wobei der Boden bis zu grösserer Tiefe bis unter den Umschlagspunkt ausgetrocknet ist. Gleichwie unter normalen Verhältnissen nur die oberste Bodenschicht, die am stärksten ausgetrocknet gewesen, bei Niederschlägen Wasser bis zum Eintritt einer lockeren Konsistenz aufnimmt, so können in extremen Fällen mächtigere Bodenschichten auf dieselbe Weise aufgeweicht werden.

Mit diesen Hinweisen soll das Solifluktionsproblem keineswegs gelöst sein. Hierzu bedarf es weiterer Studien der Verhältnisse in der Natur unter gleichzeitiger Anstellung von Laboratoriumsversuchen. Die Frage des Erdfließens hängt eng mit der Frage nach der Ursache davon zusammen, dass einige Stoffe in Wasser schwellen, andere nicht, welche Frage noch ihrer Lösung harret.

### **Vorschlag zu einer Klassifikation der humusfreien Bodenarten.**

Bei der Beschreibung der Festigkeitskurven der Bodenarten ergab es sich, dass die zu derselben Klasse in ATTERBERG'S System gehörigen Bodenarten im allgemeinen Kurven von demselben Typus zeigten, und dass somit dieser durch die mechanische Zusammensetzung bedingt ist. Man könnte daher umgekehrt die Festigkeitskurven der Bodenarten einer Klassifikation zugrunde legen, und im Nachstehenden seien kurz die Gründe dargelegt, die für eine solche Einteilung sprechen, wobei sich zugleich die Gelegenheit bietet, das oben Ausgeführte kurz zusammenzufassen.

Die nächstliegende Aufgabe der Agrogeologie ist es, ein rationelles Klassifikationssystem aufzustellen, was von grösster Wichtigkeit sowohl für die wissenschaftliche Untersuchung der Bodenarten (unter anderem als Ausgangspunkt für wei-

tere Forschungen auf dem Gebiete) als auch für die Landwirtschaft wäre, die in hohem Masse einer genaueren Charakteristik der verschiedenen Bodenarten bedarf, um zwischen diesen in der Praxis besser unterscheiden zu können, als es gegenwärtig möglich ist.

Den Nutzen hiervon eingehender darzulegen, dürfte nicht vonnöten sein.<sup>1</sup> Ich will nur ein Beispiel anführen. In Schweden werden jährlich sog. lokale Feldversuche in verschiedenen Teilen des Reiches angestellt. Diese bestehen teils aus Sortenversuchen, wobei verschiedene Pflanzensorten auf ihre Ertragsfähigkeit geprüft werden, teils aus Düngungsversuchen, um festzustellen, bei welcher Düngung der Boden die höchste Ernte liefert. In den Berichten über die Versuche wird der Versuchsboden sehr kurz beschrieben, man erfährt möglicherweise, dass der Boden ein »humoser Sandboden oder humoser Tonboden« war; diese Bezeichnungen umfassen aber Bodenarten von verschiedenen Eigenschaften und verschiedenem Düngungsbedürfnis, und wenn die Landwirte dann auf ihrem humosen Sand- bzw. Tonboden die Düngung verwenden, die dem Versuch gemäss den grössten Ertrag ergeben hat, geschieht es leider allzu häufig, dass ihnen stattdessen ein ebenso grosser Verlust entsteht. Bei einer genaueren Charakterisierung der Versuchsböden können viele solche Irrtümer vermieden werden. Man muss dahin kommen, dass der Boden individueller bewirtschaftet wird.

Auf welche Klassifizierungsgründe die Bodenarteinteilung sich stützen soll, darüber sind die Ansichten noch geteilt. Die meisten haben sich jedoch dafür ausgesprochen, dass die mechanische Zusammensetzung (Textur) der Bodenarten zugrunde gelegt werden soll. In der oben zitierten Schrift von BJÖRLYKKE führt der Verfasser eine Äusserung von HALL an, welcher sagt: »Die einzige Klassifikation, die angenommen werden kann, muss eine sein, die auf die physikalische Textur

<sup>1</sup> BJÖRLYKKE hat in einer interessanten Schrift, betitelt *Moderne jordbundsgranskning* (Jordbundsutvalgets smaaskrifter Nr. 5, Kristiania 1912), auf dieses Bedürfnis eindringlich hingewiesen.

der Bodenarten basiert ist, wie eine solche bereits in den allgemeinen Benennungen Ton, Lehm, Sand usw. zur Verwendung kommt.» Und in der Tat war dies der Einteilungsgrund, der allgemein angewandt wurde, so lange die Kenntnis der Bodenarten auf lediglich lokalen Studien derselben ruhte. Seitdem man aber in letzterer Zeit die Untersuchungen auf grössere Gebiete mit verschiedenen klimatischen Verhältnissen ausgedehnt hat, hat es sich gezeigt, dass Bodenarten von derselben mechanischen Zusammensetzung grosse Verschiedenheiten darbieten können, bedingt durch den besonderen Verlauf der Verwitterungsprozesse innerhalb der verschiedenen Klimagebiete. Man fand, dass das Klima den Bodenarten ein bestimmtes Gepräge verleihen konnte, und eine neue Bodeneinteilung wurde nach den klimatischen Zonen aufgestellt. Der erste, der den Einfluss des Klimas auf die bodenbildenden Prozesse nachwies, war HILGARD, von dem die erste Einteilung der Böden in humide und aride herrührt.

Das umgestaltende Vermögen des Klimas ist jedoch nicht so gross, dass nicht andere Faktoren auch gleichzeitig sich geltend machen können. So die Beschaffenheit des ursprünglichen Bodenmaterials. Ein ganz anderer Boden entsteht aus Sandstein als aus Kalkstein, desgleichen muss ein Boden, der durch Verwitterung von Granit entstanden ist, andere Eigenschaften besitzen als der z. B. aus Tonschiefer hervorgegangene. Die mechanische Zusammensetzung muss ferner gleichfalls berücksichtigt werden, denn ein Sandboden muss stets andere Eigenschaften besitzen als ein Tonboden, in welchem Klima sie auch vorkommen.

Ein vollständiges System für die Einteilung der Bodenarten muss alle diese Faktoren und vielleicht noch andere berücksichtigen, um ihre Natur im Einzelnen charakterisieren zu können. Als Beispiel für ein derartiges kombiniertes System sei das neulich von COFFEY<sup>1</sup> für die Klassifizierung der Böden der Vereinigten Staaten aufgestellte genannt. Co-

<sup>1</sup> GEORGE NELSON COFFEY, A study of the soils of the United States. U. S. Dep. of Agric., Bureau of Soils, Bull. 85, 1913.

FEY teilt die Böden zunächst in 5 *Abteilungen* (Divisions) mit dem Klima als Haupteinteilungsgrund ein, diese dann in *Unterabteilungen* (Subdivisions) je nach der Herkunft des Materials oder nach der Weise ihres Transports, ob durch Eis, Wasser oder Wind. Innerhalb der Unterabteilungen kann ferner das Material in Bezug auf physikalische, mineralogische und chemische Beschaffenheit variieren, was eine weitere Einteilung in *Serien* notwendig macht, welche Einteilung COFFEY hauptsächlich auf die Verschiedenheit der Böden ihrer Farbe nach gründet. Die Serien werden endlich in Klassen nach der mechanischen Zusammensetzung eingeteilt, also in Sand und Ton mit Zwischenklassen.

Wenngleich die genannte Einteilung nicht stets völlig logisch durchgeführt ist, sondern bisweilen eng mit einander verwandte Bodenarten weit auseinander stellt und umgekehrt, so ist sie doch von Interesse, da sie uns einen Hinweis auf den Weg giebt, den man einschlagen muss, um schliesslich zu einer praktisch anwendbaren Klassifikation zu gelangen. Der nachstehende Vorschlag zu einer Bodeneinteilung entspricht dem Teile in COFFEY's System, den er die Klasseneinteilung nennt, und der auf die mechanische Zusammensetzung der Böden gegründet ist, wie diese sich aus der mechanischen Analyse ergibt.

Aus der mechanischen Analyse allein ist man, wie gesagt, nicht imstande, vollständig die Eigenschaften der Böden abzulesen, was auch HILGARD<sup>1</sup> ausdrücklich betont hat: »Wir sind noch weit davon entfernt, in jedem Falle die Bearbeitungseigenschaften eines Bodens aus den physikalischen Koeffizienten der verschiedenen Korngruppen genau voraussagen zu können. Wir hätten dazu eine Formel zu konstruieren, nach welcher einer jeden Korngruppe ihr Wert zuzuerteilen wäre, wenn sie in verschiedenen Proportionen, variierend nach Form, Oberflächenbeschaffenheit und Material, sich an der Zusammensetzung beteiligt. Hierzu ist unsere gegen-

<sup>1</sup> HILGARD, Soils, London 1906, S. 97.

wärtige Kenntnis durchaus unzureichend, wenn nicht gar in Wirklichkeit das Problem ausserhalb der Grenzen einer mathematischen Berechnung liegt. Wir müssen zurzeit wenigstens uns mit empirischen Approximationen begnügen, die uns durch die stetig zunehmende Anzahl solcher Analysen, verglichen mit praktischer Erfahrung, geliefert werden.»

HILGARD betont auch die Erwünschtheit einer direkten Bestimmung der physikalischen Eigenschaften.<sup>1</sup> Bekanntlich hat ATTERBERG versucht, die mechanische Analyse durch eine solche direkte Bestimmung der physikalischen Eigenschaften Festigkeit und Plastizität und eine Charakterisierung nach diesen überflüssig zu machen. An eine solche Einteilung muss man andererseits die Forderung stellen, dass sie einigermaßen die mechanische Zusammensetzung der Bodenarten, auf der die Eigenschaften doch hauptsächlich beruhen, abzuspiegeln vermag, und die Eigenschaften, die mit der mechanischen Analyse engst zusammenhängen, lassen sich daher am zweckmässigsten einer solchen Einteilung zugrunde legen. FROSTERUS<sup>2</sup> hat zu demselben Zweck die Schrumpfung der Bodenarten bestimmt, wie aber oben bereits gezeigt, ist die Schrumpfung ein Ausdruck für der Hauptsache nach dieselbe Sache wie ATTERBERG's Plastizitätszahl, indem die erstere die Differenz des Wassergehaltes zwischen Normalkonsistenz und Umschlagspunkt und die letztere zwischen Fliessgrenze und Ausrollgrenze angiebt.

Ganz unabhängig von der mechanischen Analyse hat jedoch ATTERBERG sein System nicht aufgestellt. So z. B. werden zu den sehr schweren Tönen alle Bodenarten gerechnet, bei denen die Tongruppe im Maximum ist, ebenso lässt ATTERBERG, ob ein Boden zu den Motonen oder zu den Schlufftonen zu rechnen ist, davon abhängen, ob die Mo- oder die Schluffgruppe überwiegt. Man kann daher keine vollständige Übereinstimmung der Eigenschaften innerhalb jeder Klasse erwarten. Es ist auch vorgekommen, dass

<sup>1</sup> A. a. O., S. 101.

<sup>2</sup> La Pédologie, 1912, Nr. 4, S. 25.

eine Bodenart einen von dem der Klasse abweichenden Typus der Festigkeitskurve zeigen kann. Eine solche Abweichung braucht nicht so sehr darauf zu beruhen, dass die Partikeln bei der fraglichen Bodenart von anderer Form sind oder eine andere mineralogische Zusammensetzung besitzen, obwohl solche Faktoren natürlich auch auf die Eigenschaften einwirken, sondern die Ursache liegt, wie ATTERBERG, FROSTERUS u. a. betont haben, und wie auch hier nachgewiesen worden ist, gewöhnlich darin, dass die Tongruppe zu weit ist, dass sie Körner zu weit verschiedener Grössen und damit verschiedener Eigenschaften umfasst. Die Folge hiervon ist die, dass bei einem Boden, der der mechanischen Analyse gemäss einen hohen Prozentsatz an Ton aufweist, die Tonpartikeln nahe der Schluffgrenze liegen können, so dass er daher in seinen Eigenschaften den Schluffböden gleicht.

Bei weiter getriebener Zerteilung würden wahrscheinlich die mechanische Analyse und die physikalischen Eigenschaften in noch bessere Übereinstimmung mit einander kommen, wenigstens geschah dies in den Fällen, wo eine solche vorgenommen wurde. Aus praktischen Gründen lässt sich dies jedoch nicht durchführen; teils würde ein Schlämmen mit einer Absetzungszeit von 64 Stunden, wo Partikeln bis herab zu 0.0006 mm abgeschieden werden können, allzu lange Zeit in Anspruch nehmen, um für praktische Zwecke verwendbar zu sein, teils ist es schwer, bei der gegenwärtig gebräuchlichen Präparierungsmethode: Bürsten, diese feinen Partikeln von anhaftenden Tonpartikeln frei zu erhalten. Eines der Verdienste, das das ATTERBERG'sche System der Zerlegung in Korngruppen gegenüber den anderen gewöhnlich benutzten besitzt, ist dies, dass die Zerlegung bis auf eine kleinere Korngrösse, 0.002 mm, herabgeht, während gewöhnlich als unterste Grenze die Korngrösse 0.005 mm gewählt wird.

In seinen grossen Zügen fällt das nachstehend vorgeschlagene System einer Klasseneinteilung der Bodenarten, das ausschliesslich auf physikalische Eigenschaften gegründet ist, mit dem von ATTERBERG aufgestellten zusammen. Einige

Veränderungen sind indessen vorgenommen worden. So sind die humusreichen Bodenarten abgesondert worden, da sie nicht in das System passen. Die Natur der Humusstoffe ist, kann man sagen, der des Tones gerade entgegengesetzt, sie setzen die Festigkeit und die Plastizität herab. Eine humose Bodenart, die den physikalischen Bestimmungen nach als ein Lehm zu betrachten wäre, kann vielleicht bei Schlämmen eine Zusammensetzung zeigen, die zur Bezeichnung des Bodens als eines humosen schweren Tons berechtigen würde. Die humosen Bodenarten verlangen ihre besondere Behandlung.

Ausserdem habe ich meiner Einteilung andere physikalische Eigenschaften zugrunde gelegt, von denen es sich gezeigt hat, dass sie für die Böden noch charakteristischer sind, und die auch genauer bestimmt werden können. Die Festigkeitskurven wären ja am aufschlussreichsten gewesen, ihrer Verwendung stehen aber in der Praxis Schwierigkeiten im Wege; stattdessen ist die Festigkeit an den Punkten der Kurve gewählt worden, die am charakteristischsten sind, nämlich am Umschlagspunkt und auch bei Trockenheit. Die Festigkeit am Umschlagspunkt oder die Zähigkeit, wie ich sie genannt habe, empfiehlt es sich auch aus dem Gesichtspunkte mit zu berücksichtigen, weil sie den besten Ausdruck für den Grad der Bearbeitungsschwierigkeit abgibt. Ein wichtiges Merkmal bildet ausserdem die Lage des Umschlagspunktes.

Bei direkter Ausführung dieser Bestimmungen geht man so zuwege, dass aus der Bodenart zwei Prismen so nahe der Ausrollgrenze wie möglich geformt werden. Das eine wird zum Trocknen hingestellt und zur Bestimmung der Festigkeitszahl verwendet. Von dem anderen Prisma wird ein Stück abgeschnitten, das sofort gewogen wird, wie auch der übrige Teil des Prismas, der zur Zähigkeitsbestimmung verwendet werden soll. An dem abgeschnittenen Stück wird der Umschlagspunkt auf die oben angegebene Weise bestimmt.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Später habe ich mich zur Bestimmung des Umschlagspunktes eines etwas verbesserten Verfahrens bedient. Ein Teil des Teiges, aus dem die Prismen geformt werden, wird sorgfältig in eine Glasröhre (also bei dem-

Ist der Wassergehalt am Umschlagspunkt bekannt, so wird berechnet, wieviel der übrige Teil des Prismas wiegen muss, damit der Umschlagspunkt erreicht sein soll.<sup>1</sup> Durch Wägungen während des Trocknens des Prismas kann man sich davon überzeugen, wann der Umschlagspunkt erreicht ist, falls dies nicht deutlich aus dem Farbumschlag hervorgehn sollte. In jedem Falle ist der nötigen Kontrolle wegen der Wassergehalt zu bestimmen, bei welchem die Zähigkeitsbestimmung ausgeführt wird.

Handelt es sich darum, untereinander nahe verwandte Bodenarten zu klassifizieren, also bei der Untersuchung von Bodenarten aus einem beschränkten Gebiet, so dürfte es genügen, nur einige wenige Typen durch Schlämmung und Bestimmung der physikalischen Konstanten vollständiger zu untersuchen. Der Platz der übrigen lässt sich dann hinreichend genau allein durch Bestimmungen der Lagen des Umschlagspunktes und der Fließgrenze angeben.

Einige Änderungen an der Klasseneinteilung selbst sind gleichfalls vorgenommen worden. ATTERBERG rechnet zu den Sandböden alle Bodenarten, die eine Festigkeitszahl unter 7 haben, welche demnach die Sandböden von den Lehm Böden trennt; für ihn gehören somit zu jener Gruppe sowohl die eigentlichen Sandböden, die der allgemeinen Auffassung gemäss keine Festigkeit in trockenem Zustande besitzen, als auch tonhaltige Sandböden und Schluffböden, welche eine

selben Wassergehalt wie die Prismen), ohne dass Luftblasen auftreten, eingepackt und an den Endflächen längs der Glasröhre wohlabgestrichen. Der Erdzylinder wird aus der Röhre herausgedrückt, gewogen und zum langsamen Trocknen bis unter den Umschlagspunkt hinab hingestellt, worauf eine Volumbestimmung gemacht wird; darauf wird er bei 100° getrocknet und das Trockengewicht festgestellt. Hieraus wird der Umschlagspunkt auf zuvor angegebene Weise berechnet. Der Vorteil dieser Methode gegenüber der früher angewandten ist der, dass man nicht mehr als eine Volumbestimmung zu machen braucht, da das Volumen der Glasröhre oder das Volumen des feuchten Erdzylinders ein für allemal bestimmt wird.

<sup>1</sup> Das Gewicht  $P_0$  des Prismas am Umschlagspunkt wird nach folgender Formel berechnet:  $P_0 = \frac{(100 + F_0) \cdot P_b}{100 + F_b}$ , wo  $F_0$  = Wassergehalt bei Umschlagspunkt,  $F_b$  = Anfangsfeuchtigkeit und  $P_b$  = Anfangsgewicht des Prismas.

gewisse Festigkeit besitzen. ATTERBERG bemerkt jedoch, dass diese Einteilung nur als eine vorläufige zu betrachten ist.<sup>1</sup> »Eine scharfe Grenze«, sagt er, »dürfte wahrscheinlich durch Anwendung der Grenze erhalten werden können, die ich zwischen den Begriffen Mo und Schluff gezogen habe.«<sup>2</sup> Als eines der sondernden Merkmale für diese Korngruppen giebt ATTERBERG an, dass die Mopartikeln, wenn man eine Probe ausschüttet, je für sich herausrinnen, während in der Schluffprobe die Partikeln aneinander adhäreren und kleine Klumpen bilden, woraus ersichtlich ist, dass Schluff, nicht aber Mo, eine gewisse Festigkeit in trockenem Zustande besitzt. Direkte Festigkeitsbestimmungen haben dies bestätigt. Dieses Merkmal ist als zur Verwendung bei der Klassifikation geeignet angesehen worden.

Diejenigen Bodenarten, die in trockenem Zustande der Festigkeit entbehren, werden also zu einer Klasse *die reinen Sandböden* vereinigt und diejenigen, die eine unbedeutende Festigkeit besitzen, werden als *tonhaltige Sandböden* oder auch *Schluffböden* bezeichnet. Auch eine unbedeutende Beimischung von Ton in einem Sandboden besitzt das Vermögen, denselben fest zu machen, gleichwie auch der feuchten Masse wenigstens etwas von den plastischen Eigenschaften zu erteilen, so dass sie sich zäh und formbar anfühlt, ja, sogar ausrollbar, wenn auch natürlich schlecht ausrollbar ist, während reinem Sand alle Plastizität abgeht. Eine Beimischung eines geringen Prozentsatzes Ton verändert die Eigenschaften des Sandes im übrigen (macht ihn weniger durchlässig und erhöht seine Wasserkapazität,) so dass es schon von diesem Gesichtspunkt aus völlig gerechtfertigt ist, *tonhaltige Sandböden* als eine besondere Klasse aufzustellen. Ein besonderes physikalisches Unterscheidungsmerkmal zwischen den Klassen *tonhaltige Sandböden* und *Schluffböden* ist nicht aufgestellt worden und dürfte kaum erforderlich sein, da die Schluffböden schon infolge ihrer Feinkörnigkeit mit dem blossen Auge von den

<sup>1</sup> Kungl. Landbruksakademiens Tidskrift 1912, S. 449.

<sup>2</sup> Versuchsstationen, Bd. 69, 1908, S. 127 und 137.

grobkörnigeren tonhaltigen Sandböden unterschieden werden können.

Zu diesen beiden Klassen werden demnach diejenigen Böden gerechnet, die in trockenem Zustande einige Festigkeit besitzen, und die in feuchtem Zustande keine oder geringe Plastizität aufweisen. Oder genauer bestimmt, diejenigen, welche eine Festigkeitszahl über 0 und eine Zähigkeit unter 4 haben, welche letztere zweckmässigerweise als Grenze gegen die nächste Bodenklasse angesetzt werden kann.

Mit höherem Tongehalt nehmen die plastischen Eigenschaften zu, und die Zähigkeitszahl steigt über 4. Der Boden kann nun zu den *leichten Lehmen* gerechnet werden. Wie oben hervorgehoben wurde, hat ATTERBERG den Lehmen Plastizität (Plastizität = Ausrollbarkeit) abgesprochen, hierzu wahrscheinlich durch die allgemeine Auffassung von den Lehmen als nichtplastischen Bodenarten veranlasst. Ganz sicher aber ist die allgemeine Auffassung von dem, was unter Plastizität zu verstehen ist, eine andere als die ATTERBERG's insofern gewesen, als sie höhere Forderungen gestellt, verlangt hat, dass die Böden, um plastisch genannt werden zu können, gut formbar, in der Tonindustrie anwendbar, nicht bloss ausrollbar sein sollen. Die Folge ist die gewesen, dass die ATTERBERG'sche Definition der Lehme zu eng geworden ist, oder genauer gesagt, Böden umfasst, die zur vorhergehenden Klasse: tonhaltige Sandböden zu rechnen sind.

Zu dieser Auffassung gelangt man auch besonders bei der Arbeit im Felde, wenn es gilt, die Bodenarten innerhalb eines Gebiets mit Übergangsböden vom reinen Sande bis zum sehr schweren Ton zu klassifizieren. Versucht man hier die Böden gemäss ATTERBERG's System nach der Ausrollbarkeit einzuteilen, so findet man, dass nur innerhalb eines relativ sehr beschränkten Gebiets die Böden den Lehmen zugewiesen werden können, was in keinem Verhältnis zu der grossen Verbreitung der Lehmgruppe in der Natur steht.

Verfasser hat die Gruppe Lehme eingeteilt in *leichte Lehme*, die eine Zähigkeit bis hinauf zu 10 haben, und *schwere Lehme*

mit einer Zähigkeit zwischen 10 und 15. Innerhalb jeder Abteilung kommen Böden mit zwei verschiedenen Kurventypen vor, der eine Typus mit dem Umschlagspunkt bei höherem Wassergehalt sowie mit niedrigerer Festigkeit bei Trockenheit. Diesen Kurventypus weisen, wie oben nachgewiesen wurde, die schluffreichen Böden auf, während der andere, der kürzere Kurventypus, mit rascherem Anstieg, für die moreichen Böden charakteristisch ist. Aus den untersuchten Bodenarten scheint hervorzugehn, dass die Prozentzahl 16 für den Umschlagspunkt als Grenze zwischen den beiden Klassen angesetzt werden könnte.

Die Lehme werden somit in folgende Klassen eingeteilt:

*Leichte Molehme:*

Zähigkeit 4—10; Umschlagspunkt unter 16 %;

*Leichte Schlufflehme:*

Zähigkeit 4—10; Umschlagspunkt über 16 %;

*Schwere Molehme:*

Zähigkeit 10—15; Umschlagspunkt unter 16 %;

*Schwere Schlufflehme:*

Zähigkeit 10—15; Umschlagspunkt über 16 %.

Nun ist zu beachten, dass den Klassen der Schlufflehme angehörige Böden seltener in der Natur angetroffen werden, wo sie gleich den Schluffböden als Fliesslehme auftreten. Sie werden vielleicht am besten, wie oben erwähnt, an der schaukelnden Bewegung erkannt, in die der Teig sich durch wiederholtes Drücken versetzen lässt.

Bei einer Zähigkeit über 15 besitzen die Böden einen so hohen Grad von Plastizität, dass sie die Bezeichnung Tone verdienen. Die Gruppe ist in zwei Klassen eingeteilt: *sehr schwere Tone* und *extraschwere Tone*. Die erstere Klasse umfasst Böden mit einer Zähigkeit zwischen 15 und 25 und die letztere diejenigen mit noch höheren Zähigkeitsgraden.

Möglicherweise kann es inkonsequent erscheinen, die Böden der ersten Klasse innerhalb der Tongruppe sehr schwere zu nennen; nach Analogie der Einteilung der Lehme

möchte man hier eine Einteilung der Tone in leichte Tone, schwere Tone usw. erwarten. Dass eine solche Einteilung nicht hat durchgeführt werden können, beruht darauf, dass solchenfalls zur Klasse der leichten Tone Böden gerechnet werden würden, die in Wirklichkeit sehr schwere Böden sind und in der Praxis so genannt werden. Der Einteilungsgrund ist in erster Linie der Zähigkeitsgrad, so dass Böden mit einer Zähigkeit zwischen 4 und 15 Lehme und solche mit höherer Zähigkeit Tone genannt werden.

Wünschenswert wäre es, dass eine Klasseneinteilung der Böden sich auf einfache und leicht ausführbare Bestimmungsmethoden, womöglich solche, die auf dem Felde zur Anwendung kommen können, gründeten. Die hier vorgeschlagene Methode zur Bestimmung des Zähigkeitsgrades ist ja nicht auf dem Felde ausführbar, sondern man muss sich darauf beschränken, an einzelnen Bodenproben Bestimmungen im Laboratorium auszuführen. Eine geeignete Feldmethode zur Bestimmung des Zähigkeitsgrades wäre daher höchst erwünscht.

Ein Verfahren, das der Verfasser bei Feldarbeiten in diesem Sommer angewandt hat, möge hier beschrieben werden. Ein kleinerer Erdklumpen wird in eine Porzellanschale genommen und, wenn der Boden trocken ist, mit einigen Tropfen Wasser aus einer mitgebrachten Flasche angefeuchtet; darauf wird die Masse mit einem Spatel bearbeitet, bis der Teig homogen geworden ist. Sodann wird ein Stück von dem Teig zwischen den Fingern gerollt und geknetet, bis er so trocken wird, dass er im Begriffe steht, seine Plastizität zu verlieren, also an den Umschlagpunkt gelangt ist. Die Härte des Erdklumpens in diesem Moment, die mittelst des Gefühls geschätzt wird, giebt ein Mass für die Zähigkeit ab. Von den extra-schweren Tonen erhält man einen Erdklumpen, der sehr hart, fast steinhart wird, während die leichten Lehme sich weich anfühlen. Obwohl die Methode vollständig subjektiv ist, kann man doch bei einiger Übung ziemlich sicher entscheiden, zu welcher Zähigkeitsklasse eine bestimmte Bodenart zu rechnen ist. Um von Zeit zu Zeit sein Gefühlsgedächtnis

aufzufrischen, falls man sich bei einer Gelegenheit unsicher fühlen sollte, hat man Proben von Bodenarten verschiedener im Laboratorium festgestellter Zähigkeitsgrade bei sich, und die fragliche Bodenart wird mit diesen verglichen. Ich hoffe noch in Zukunft Gelegenheit zu erhalten, näher hierüber zu berichten.

Die nachstehende Tabelle zeigt, wie die hier untersuchten Böden sich in Klassen gruppieren, wenn die Zähigkeit und die Lage des Umschlagspunktes als klassifizierende Eigenschaften angewandt werden. Ausser den Zahlen hierfür werden auch die Festigkeitszahl sowie die Grösse des Plastizitätsgebiets (Differenz zwischen Fliessgrenze und Umschlagspunkt) und die »Plastizitätszahl« (Differenz zwischen Fliessgrenze und Ausrollgrenze) angegeben. Betreffs der mechanischen Zusammensetzung verweisen wir auf die oben mitgeteilten Analysenzahlen.

**Klasseneinteilung der humusfreien und humusarmen Bodenarten.**

**Kl. 1. Reine Sandböden.**

Keine Festigkeit; keine Plastizität.

**Kl. II. Tonhaltige Sandböden.**

**Kl. III. Schluffböden.**

Festigkeitszahl > 0; Zähigkeit < 4.

Festigkeitszahl > 0; Zähigkeit < 4.

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
258	2.4	0.3	19.0	0	0
301	26	1.0	17.0	3	0
109	35	2.0	16.0	2	0
107	16	2.5	16.4	7	0
361	26	2.5	15.0	6	0

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
90	1.4	2.1	18.2	0	0
328	5.4	2.5	22.0	0	0
117	6.5	2.5	17.4	4	0
363	11	2.5	18.3	8	0
111	16	3.5	20.8	3	0
Übergangsform zu Kl. II:					
185	34	3.5	18.4	7	0

**Kl. IV. Leichte Molehme.****Zähigkeit 4–10; Umschlagspunkt unter 16.**

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
95	48	6.0	16.0	12	7
307	59	7.0	11.5	10	6
Übergangsformen zu Kl. V:					
274	18	4.5	15.2	11	8
124	31	8.0	15.0	17	14
168	31	8.5	14.3	15	9

**Kl. V. Leichte Schlufflehme.****Zähigkeit 4–10; Umschlagspunkt über 16.**

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
89	13	5.5	22.5	7	3
231	23	6.0	21.0	10	5
275	34	9.0	21.2	14	9

**Kl. VI. Schwere Molehme.****Zähigkeit 10–15; Umschlagspunkt unter 16.**

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
163	39	11	13.6	12	9

**Kl. VII. Schwere Schlufflehme.****Zähigkeit 10–15; Umschlagspunkt über 16.**

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
161	22	15	18.0	17	10

**Kl. VIII. Sehr schwere Tone.****Zähigkeit 15–25.**

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
166	55	17	14.9	19	14
Übergangsform zu Kl. VII:					
85	49	22	17.6	24	16

**Kl. IX. Extraschwere Tone.****Zähigkeit über 25.**

Nr.	Festigkeitszahl.	Zähigkeit.	Umschlagspunkt.	Plastizität umger.	Plastizitätszahl.
309	94	27	11.5	25	15
162	93	28	14.6	36	20
164	75	30	12.4	41	27
121	94	35	12.1	29	17

Die Böden innerhalb jeder Klasse zeigen einen gleichartigen Typus der Kurven und dazu eine ähnliche mechanische Zusammensetzung, was für die Berechtigung dieser Klasseneinteilung spricht. Natürlich müssen sich Übergangsformen

finden, da ja die Naturgegenstände im allgemeinen und die Bodenarten insbesondere so variabel; sind dass aber unter diesen wenigen Bodenproben so verhältnismässig viele Übergangsformen auftreten, beruht darauf, dass besonders die Bodenarten zur Untersuchung ausgewählt wurden, die sich nicht leicht in ATTERBERG's System einpassen liessen.

Als Übergangsformen von der Mo- zur Schluffserie sind die Bodenarten aufgestellt worden, bei denen der Umschlagspunkt niedrig liegt (in Übereinstimmung mit dem Verhältnis bei der Moserie), die aber in Übereinstimmung mit den Böden der Schluffserie eine verhältnismässig niedrige Festigkeitszahl haben. Dies deutet darauf, dass die hierhergehörigen Übergangsformen unsortierte Bodenarten sind, eine Mischung der Korngruppen Mo und Schluff enthalten (der Umschlagspunkt liegt niedrig), sowie dass sie verhältnismässig tonarm sind (die Festigkeitszahl ist relativ niedrig). Prüft man die Zahlen für die mechanische Zusammensetzung dieser Böden, so findet man dies auch bestätigt.

Ebenso können Übergangsformen von der Schluffserie zur Moserie in den Fällen vorkommen, wo der Gehalt an wirklichem Ton hoch genug ist, um der Bodenart grosse Festigkeit zu verleihen.

Die gute Übereinstimmung zwischen dieser Klasseneinteilung nach physikalischen Kennzeichen und einer Einteilung nach der mechanischen Zusammensetzung spricht andererseits dafür, dass die Grenzen für die verschiedenen Kornsortimente glücklich gewählt sind.

### Nachtrag.

Als diese Abhandlung bereits fertig in Korrekturabzügen vorlag, kamen mir folgende Arbeiten, die die Solifluktionsercheinung berühren, in die Hände:

BERTIL HÖGBOM, Über die geologische Bedeutung des Frostes (Bull. of the Geol. Inst. of Upsala, Vol. XII, S. 257—390),

worin ausführlich verschiedene Formen der Fließerde beschrieben werden, und wo die Solifluktion als auf Regulation beruhend erklärt wird.

JOHN FRÖDIN, Geografiska studier i St. Lule älfvs källområde [S. G. U. Årsbok 7 (1913): Nr. 4], wo die Regulations-  
theorie an einer speziellen Art von Fließerde durch kürzere  
Serien von Temperaturbeobachtungen in verschiedenen Tiefen  
näher geprüft wird. FRÖDIN kommt zu der Auffassung, dass  
die Regulationstheorie nicht angewandt werden kann.

Ausserdem habe ich in Int. Mitteilungen f. Bodenkunde,  
Bd. IV, Heft 4 u. 5, 1914, einen vorläufigen Bericht unter  
dem Titel: Die Konsistenzkurven der Mineralböden von SI-  
MON JOHANSSON, vorläufiger Bericht von ALBERT ATTERBERG,  
angetroffen, worin meine Untersuchung, leider aber nicht  
völlig korrekt, referiert ist.

## Berichtigungen.

Seite 36,	Z.	2	von unten	lies <i>grösser</i>	statt <i>kleiner</i> .
› 46,	›	3	› oben	› <i>Hochplastische, sehr schwere Tone.</i>	› <i>Sehr schwere Tone.</i>
› 52,	›	7	›	› <i>verschiedend von Mineralstoffe sind.</i>	› <i>verschiedene Mineral- stoffe darstellen.</i>
› 56,	›	8 u. 14	›	› und	
		5	› unten	› lies O, O <sub>1</sub>	› 6, 6 <sub>1</sub> .
› 61,	›	4	› oben	› Aβ	› Aα.
› 79,	›	17	›	› 1/5	› 1/3.

# FESTIGKEITS KURVEN EINIGER SCHWEDISCHEN BODENARTEN

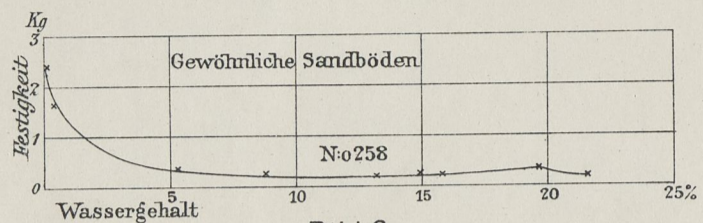


Bild 2.

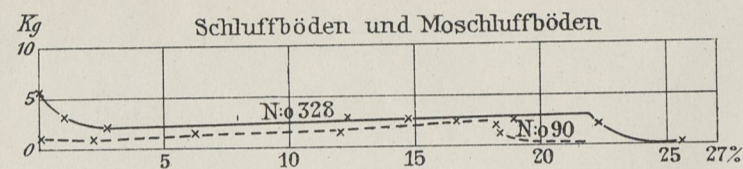


Bild 3.

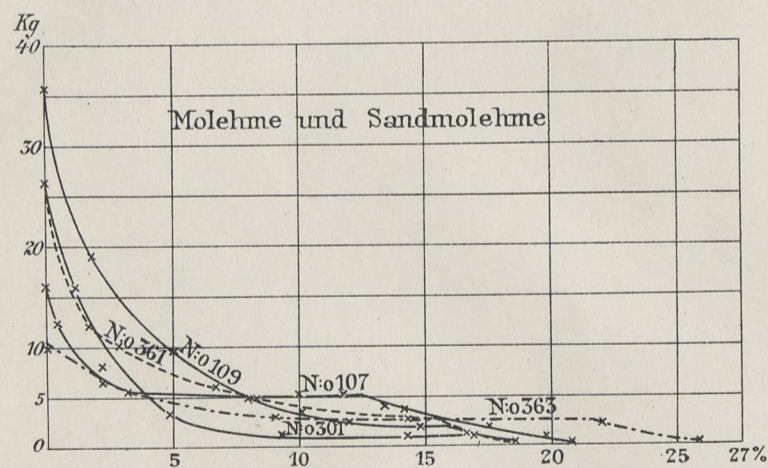


Bild 4.

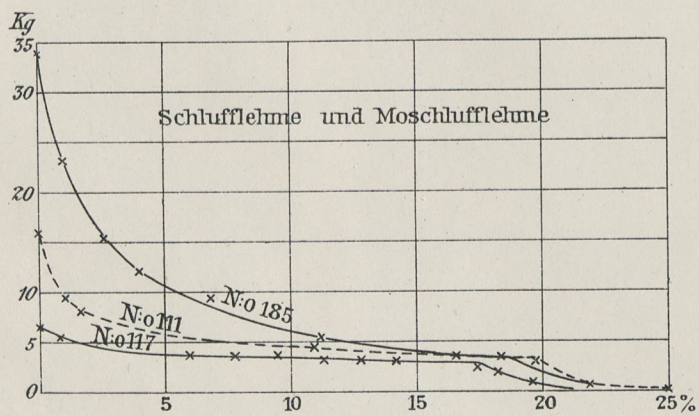


Bild 5.

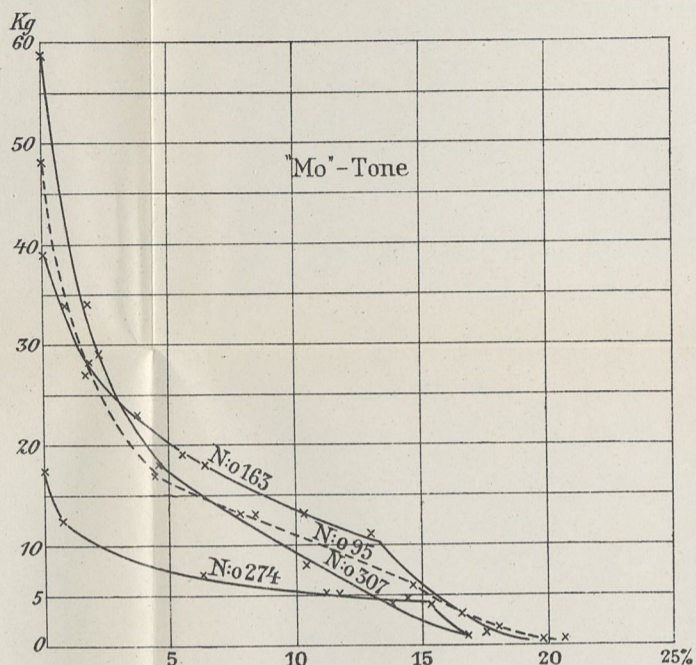


Bild 6.

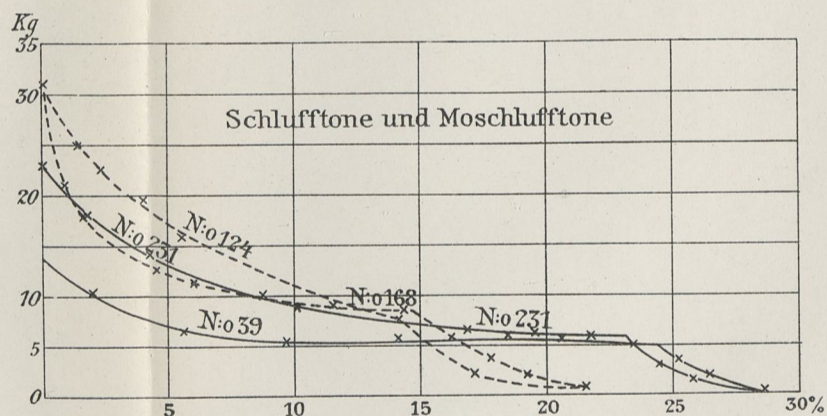


Bild 7.

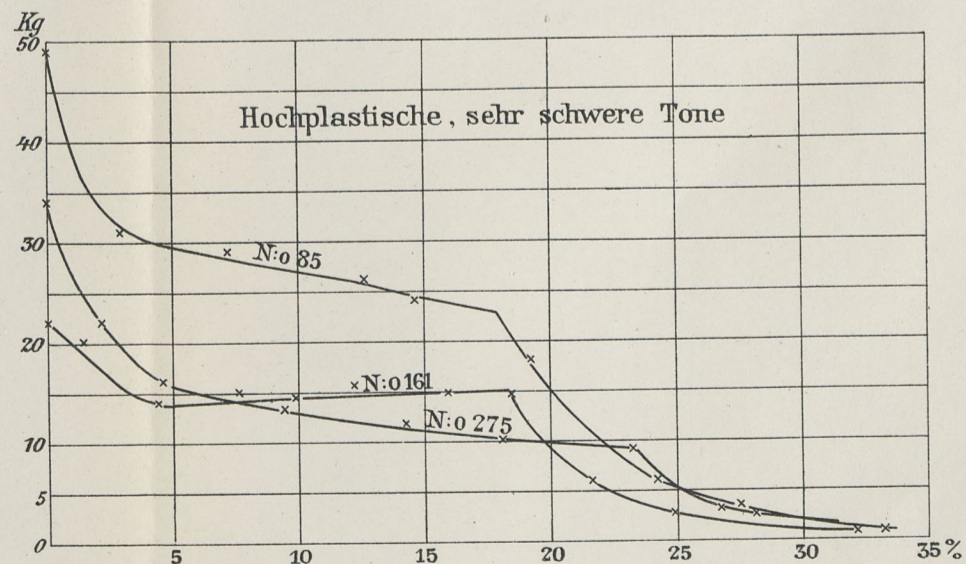


Bild 8.

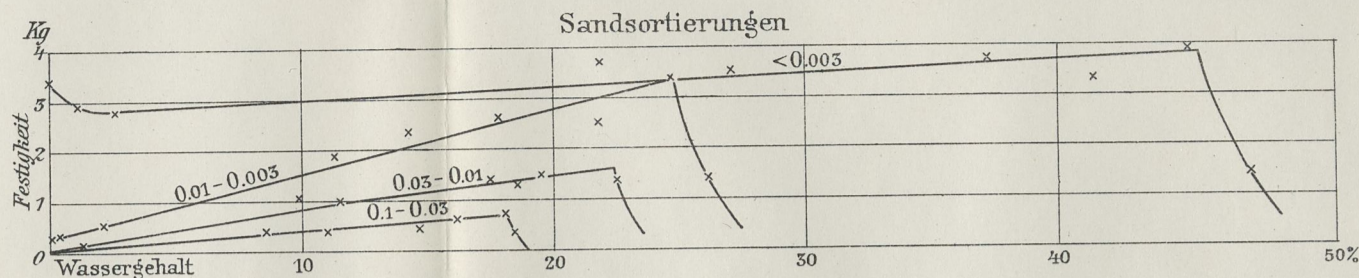


Bild 1.

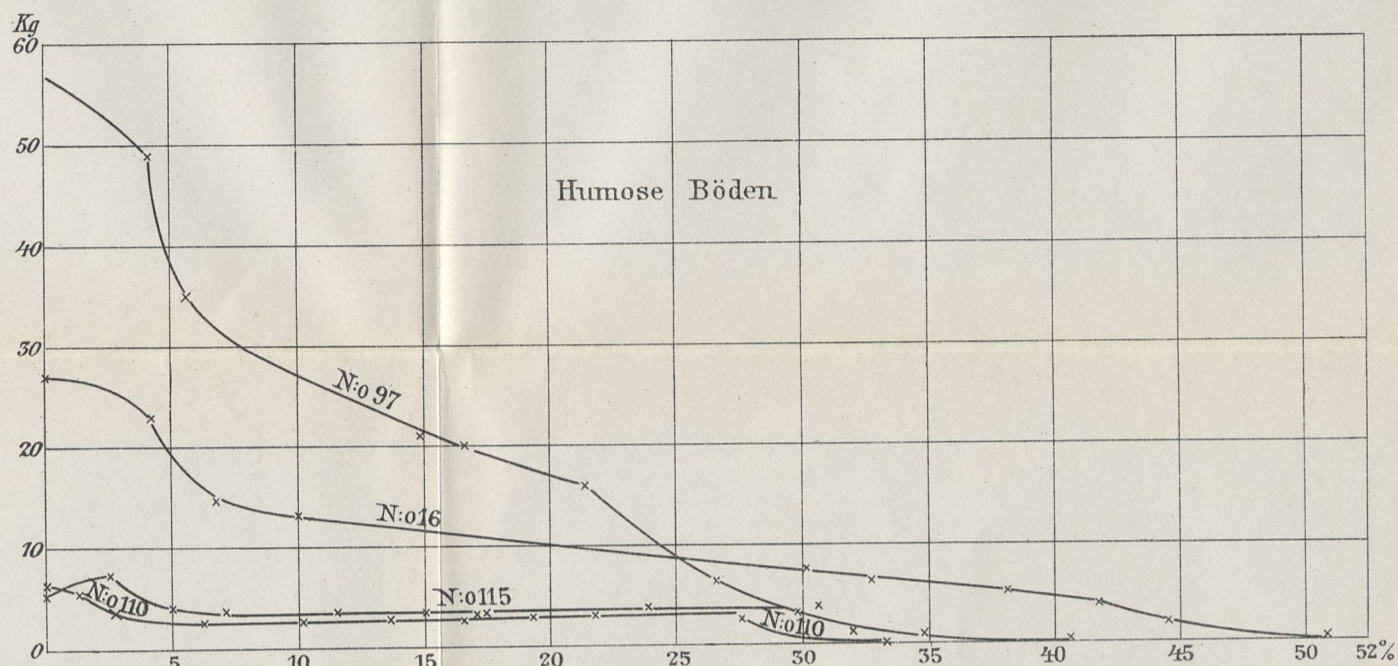


Bild 10.

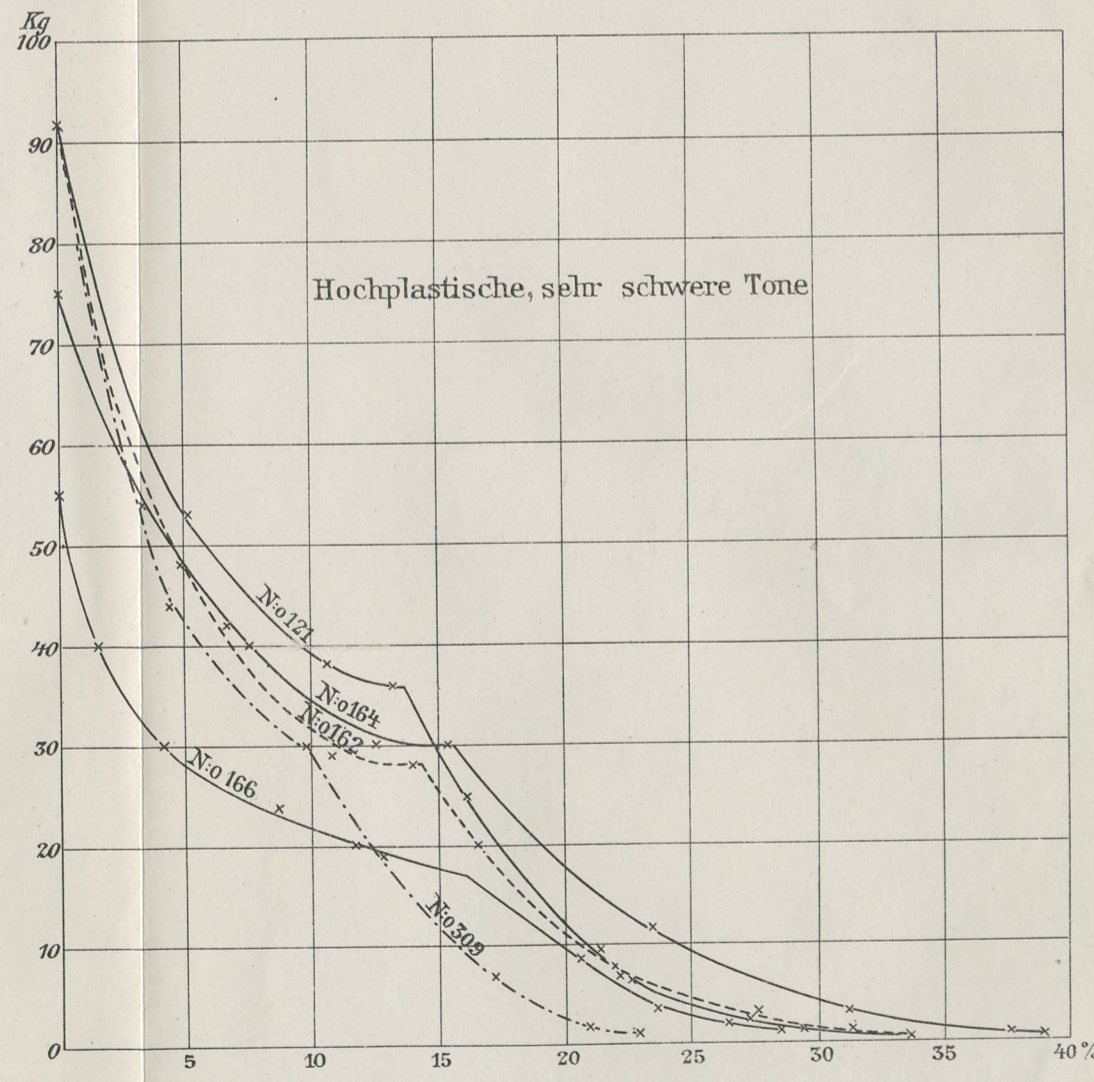


Bild 9.

