

Die Aräometer-Methode zur Bestimmung der Korn- verteilung von Böden

und anderen Materialien

Von

Dr. techn. **Arthur Casagrande**

Assistant-Professor of Civil Engineering
Harvard University, Cambridge, Mass.

Mit 20 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1934

ISBN-13: 978-3-642-89391-9 e-ISBN-13: 978-3-642-91247-4
DOI: 10.1007/978-3-642-91247-4

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.

Vorwort

der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik.

Die vorliegende Arbeit ist im wesentlichen die Übersetzung eines Berichtes, den Dr. A. Casagrande bereits im Juni 1931 dem United States Bureau of Public Roads vorgelegt hat. Der Bericht enthielt die ausführliche Auswertung von Untersuchungen über die Anwendung des Aräometers (dort auch Hydrometer genannt) für die Schlämmanalyse von Böden. Diese sehr gründlichen Untersuchungen führte Casagrande in den Jahren 1927—1930 im Dienste des Bureau of Public Roads aus.

Die Vorteile der Aräometeranalyse im Vergleich mit anderen Methoden der Schlämmanalyse sind:

1. Einfachheit des Versuchsvorganges und der Auswertung der Beobachtungsergebnisse, wobei keine besondere Erfahrung erforderlich ist,
2. die geringen Anschaffungskosten der sehr einfachen Versuchsgерäte, und
3. die große Ersparnis an Arbeitszeit im Vergleich mit allen anderen Methoden.

Infolge davon kam die Aräometeranalyse rasch zu weit verbreiteter Anwendung in den Vereinigten Staaten und beginnt sich auch in den Erdbaulaboratorien Europas schnell einzubürgern.

Es ist hauptsächlich das Verdienst des Verfassers, durch seine gründlichen Untersuchungen gezeigt zu haben, wie man die vielen groben Fehler, die sich bei der Aräometeranalyse einschleichen können, durch Befolgen gewisser, einfacher Regeln oder Anbringen von Korrekturen auf ein gewünscht zulässiges Maß verringern kann. Da auch Wissenschaftler zunächst gegen die Anwendung der Aräometeranalyse aufgetreten sind, ist es zu begrüßen, daß in der Veröffentlichung der Inhalt der ursprünglichen Abhandlungen in seinen Hauptzügen ausführlich übernommen wurde, so daß Zweifler die Möglichkeit haben, die Forschungen nachzuprüfen, aus denen A. Casagrande folgert, daß die Aräometer-Analyse an Genauigkeit anderen Schlämmethoden nicht nachsteht, sondern außerdem eine sehr bedeutende Arbeitersparnis ermöglicht.

Die kurze zusammenfassende Versuchsbeschreibung am Ende und die beigelegten Nomogramme machen die Abhandlung zu einem wertvollen und sofort brauchbaren Hilfsmittel für Baugrundlaboratorien.

Berlin-Charlottenburg, im Juli 1934.

Dr.-Ing. W. Loos.

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Einführung	5
a) Allgemeine Betrachtungen	5
b) Bemerkungen über die verschiedenen Verfahren der Schlämmanalyse	6
c) Das Stockessche Gesetz	9
d) Größe des Auftriebes eines in eine Bodensuspension getauchten Körpers	12
II. Theorie der Aräometer-Methode und der wichtigsten Fehlerquellen	12
a) Die Bestimmung der Kornverteilungskurve aus Dichtemessungen der Suspension	14
b) Sedimentablagerung auf der Aräometerbirne	21
c) Einfluß des Durchmessers des Schlämmzylinders auf die Berechnung der Korngröße	22
d) Temperaturkorrektur	23
III. Nomogramme zur schnellen Auswertung der Aräometerlesungen	26
a) Bestimmung der Korngröße	26
b) Temperaturkorrektur	29
IV. Einfluß von Fehlerquellen auf die Genauigkeit der Versuchsergebnisse	30
a) Vorbehandlung der Probe	30
b) Konzentration der Suspension	32
c) Notwendige Genauigkeit der spezifischen Gewichtsbestimmung	32
d) Notwendige Genauigkeit der Temperaturlesungen	33
e) Einfluß der Störung durch Einführen und Herausnehmen von Aräometer und Thermometer. Häufigkeit der Lesungen	33
f) Meniskuskorrektur; Genauigkeit der Ablesungen und der Eichung des Aräometers	34
g) Einfluß einer ungenauen Bestimmung des Volumsmittelpunktes der Aräometerbirne	34
h) Einfluß von Luft im Wasser und von suspendierten oder an Bodenkörnern haftenden Luftblasen	35
i) Einfluß von Temperaturänderungen und ungleichmäßiger Erwärmung	35
j) Verdunstung	36
k) Einfluß der Temperatur des Aräometers und der Feuchtigkeit auf den Schaft	36
V. Versuchsvorgang	36
a) Einrichtung für die Aräometeranalyse von Böden	37
b) Analyse feinkörniger Böden	38
c) Kombinierte Sieb- und Aräometeranalyse gemischtkörniger Böden	43
d) Anwendung auf Forschungen in andern Gebieten.	47
1. Zement. S. 47. — 2. Diatomeenerde S. 49. — 3. Präzisions-Aräometer (Einrichtung zur Erzielung großer Genauigkeit.) S. 51.	
VI. Zusammenfassung und kurze Anweisung für die Aräometer-Analyse von Böden	52
Literaturnachweis	55

I. Einführung.

a) Allgemeine Betrachtungen.

Die direkte Trennung eines Bodens oder anderer körniger Materialien in Fraktionen von verschiedener Korngröße, oder eine indirekte Bestimmung der Korngrößenverteilung wird mechanische Analyse genannt. Bei grobkörnigen Materialien wird sie durch Sieben und bei feinkörnigen meist durch eine Schlämmanalyse ausgeführt. Zur Schlämmanalyse gehören alle Methoden, die sich auf das Verhalten eines in einer Flüssigkeit schwebenden körnigen Materiales stützen.

Das Ergebnis einer mechanischen Analyse kann entweder zahlenmäßig, in Gewichtsprozenten der verschiedenen Teile, oder graphisch, durch eine Kornverteilungskurve, dargestellt werden. Wenn genügend Punkte dieser Kurve bekannt sind, ist die graphische der ziffernmäßigen Darstellung überlegen.

Kornverteilungskurven können auf arithmetischem oder semi-logarithmischem Papier aufgetragen werden. Der arithmetische Maßstab hat den großen Nachteil, daß die Ordinaten der feineren Teile zu nahe zusammenfallen. Durch Auftragen der Korngrößen in logarithmischem Maßstab werden sowohl die größten als auch die feinsten Körner in derselben Kurve in gleich übersichtlicher Weise dargestellt.

Da wichtige Bodeneigenschaften durch die Verteilung der feineren und feinsten Teile bedingt sind, ist es sehr vorteilhaft, die semi-logarithmische Auftragung zu wählen. Das übliche Verfahren besteht darin, die Korngröße auf der horizontalen Achse und auf der vertikalen das Gewicht des Materiales, welches kleiner ist als die betreffende Korngröße, in Prozenten der Gesamtmenge, aufzutragen.

Beispiele der semi-logarithmischen Auftragung von Kornverteilungskurven sind in Abb. 13—16 dargestellt.

Wenn man die Kornverteilung in Zahlen ausdrückt, ist es üblich drei Gruppen zu gebrauchen, die Sand, Schluff und Ton genannt werden¹. Leider sind die Grenzen zwischen diesen Gruppen nicht einheitlich festgelegt. Die größte Verwirrung entsteht jedoch auf diesem Gebiet aus

¹ Bezieht sich auf die USA. Sand $> 0,05$ mm, Schluff $0,05—0,005$ mm, Ton $< 0,005$ mm.

der doppelten Bedeutung der Ausdrücke „Schluff“ und „Ton“. Der Verfasser meint, daß diese Bezeichnungen lediglich zur Bezeichnung von Böden verwendet werden sollten, aber nicht für Korngrößen.

Ton ist eine Bodenart, die bei bestimmtem Wassergehalt plastisch ist. In getrocknetem Zustand bildet sie feste Brocken. Nach der Kornverteilung mag sie vielleicht 30 % Körner kleiner als 0,005 mm enthalten. Demgegenüber besitzt ein Gesteinsmehl oder ein künstlich zerkleinerter Quarz, der ganz aus Teilchen kleiner als 0,002 mm besteht, keine Plastizität und nur sehr geringe Kohäsion in getrocknetem Zustand. Nach seinen Eigenschaften sollte das Material als ein typischer Schluff bezeichnet werden, nach der Korngrößeneinteilung dagegen als ein „reiner Ton“.

Die kennzeichnenden Eigenschaften eines Tones, wie Plastizität und hohe Kohäsion, sind nicht nur vom Gehalt an Teilchen kleiner als 0,005 oder 0,002 mm abhängig, sondern insbesondere vom Gehalt an schuppenförmigen Teilchen und solchen von wirklich kolloidaler Kleinheit.

Nur für Sand besteht kein Widerspruch zwischen den beiden Bedeutungen, die sich aus der Definition eines im trockenen Zustand kohäsionslosen Bodens und der Definition auf Grund der Korngröße ergeben.

Der Verfasser schlägt vor, daß man an Stelle der Bezeichnungen „Schluff“ und „Ton“ nur die gemessenen Korngrößen angibt, und daß man nach Möglichkeit die graphische Darstellung für die Kornverteilung verwenden soll, weil sie eine viel bessere Vergleichsmöglichkeit zwischen verschiedenen Böden bietet, als die Angabe von drei oder vier Fraktionen.

b) Bemerkungen über die verschiedenen Verfahren der Schlämmanalyse.

Die Korngröße mineralischer Bestandteile zwischen 0,2 und 0,0002 mm Durchmesser kann durch die Fallgeschwindigkeit der Körner in einer Flüssigkeit bestimmt werden. Die Anwendung dieses Prinzips führte zu einer großen Anzahl von Methoden der Schlämmanalyse, oder Absitzverfahren, zur Bestimmung der Kornverteilung feinkörniger Böden.

Theorie und praktische Durchführung der meisten Versuchsverfahren sind am vollständigsten von Gessner [5]¹ und z. T. auch von Keen [24] behandelt.

Die Aräometeranalyse gehört in die Gruppe der Verfahren „einmaliger Sedimentation“, bei denen alle Messungen während desselben Absitzvorganges gemacht werden, die dann mittels theoretischer oder empirischer Beziehungen ausgewertet und in einer Kornverteilungskurve aufgetragen werden.

¹ In [] stehende Zahlen verweisen auf den Literaturnachweis auf S. 55.

Die Verfahren einmaliger Sedimentation kann man angenähert in folgende drei Gruppen teilen:

a) Verfahren, bei denen die Abnahme der Dichte der Suspension als Funktion der Zeit gemessen wird.

b) Verfahren, bei denen die Gewichtszunahme des auf einer Scheibe, welche in die Suspension getaucht wird, abgelagerten Materiales als Funktion der Zeit gemessen wird.

c) Verfahren, welche die beiden obengenannten Verfahren kombinieren.

Die Verfahren der einmaligen Sedimentation haben den entschiedenen Vorteil, daß ein Versuch jede gewünschte Anzahl von Punkten zur Auftragung der Kornverteilungskurve liefert.

Dem schwedischen Gelehrten S. Oden gebührt das Verdienst, den ersten Apparat zur Schlämmanalyse von Böden mittels einer einmaligen Sedimentation erdacht zu haben. Sein Apparat ist so konstruiert, daß das Gewicht des auf einer konstanten Tiefe unter der Oberfläche der Suspension abgelagerten Bodens, gemessen wird. S. Oden hat auch die grundlegende Theorie abgeleitet, die später für andere Verfahren einmaliger Sedimentation umgearbeitet wurde; [1] und [2].

Später ersann Prof. Wiegner ein Verfahren, bei dem die Dichte einer Bodensuspension in einer konstanten Tiefe unter der Oberfläche durch eine Manometeröhre gemessen wird; [3]. Dieser Apparat wurde durch Gessner verbessert, der auch eine graphische Lösung für die Auswertung der Zeitablesungen angab; [4] und [5].

Das Wiegnersche Verfahren wurde später durch viele Gelehrte abgeändert, um seine Genauigkeit zu vergrößern und es für andere Zwecke verwendbar zu machen. Bemerkenswert für den Bodenphysiker sind die Methoden von Crowther [23], Gilboy [6] und Stiny [7]. Einige andere Abänderungen werden von Gessner [5] und Hahn [8] beschrieben.

Ein einfaches und verlässliches Verfahren der einmaligen Sedimentation ist die sog. Pipettmethode, die im Jahre 1922 unabhängig von Forschern in England, Deutschland und den Vereinigten Staaten vorgeschlagen wurde. Sie beruht auf der Entnahme von kleinen Proben der Suspension, mittels einer Pipette, aus bestimmter Tiefe und zu verschie-

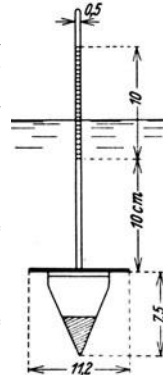


Abb. 1.
Goldschmidt's
Pelometer.

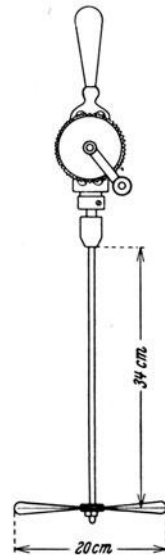


Abb. 2.
Goldschmidt's
Rührapparat.

denen Zeiten nach Beginn des Versuches, die so gewählt sind, daß nur Bodenteilchen unterhalb gewisser gegebener Grenzen darin enthalten sind. Jeder solchen Entnahme entspricht ein Punkt auf der Kornverteilungskurve. Die Bestimmung der Korngröße erfolgt entweder nach dem Stokesschen Gesetz oder durch direkte mikroskopische Messung. Nähere Beschreibungen sind in [4] und [24] enthalten.

Die Pipettemethode hat besonders für wissenschaftliche Arbeiten rasche Verbreitung gefunden und wird gerne beim Vergleich verschiedener Methoden der Schlämmanalyse als „Standard“ benutzt.

Die jüngste Entwicklung der Schlämmanalyse durch einmalige Sedimentation stellen die Verfahren dar, die ein Aräometer zur Bestimmung der Dichteänderung der Bodensuspension mit der Zeit verwenden. Das erste praktische Verfahren, welches dieses Prinzip verwendet, wurde durch Professor V. M. Goldschmidt und J. Grenness entwickelt; [9] und [10]. Sie erkannten anscheinend bei ihren Voruntersuchungen, daß die Bodenteilchen, die sich auf dem Körper eines gewöhnlichen Aräometers absetzen, einen großen Fehler verursachen. Da eine Reinigung der Aräometerbirne während

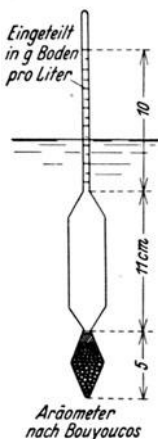


Abb. 3.
Aräometer nach
Bouyoucos.

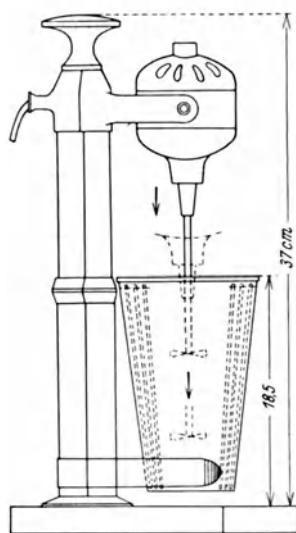


Abb. 4.
Rührapparat nach Bouyoucos.

des Versuches nicht ratsam schien, verwendete man das andere Extrem als Abhilfe: Über der Aräometerbirne wurde eine flache, runde Scheibe angebracht, auf der sich Bodenkörner ablagern konnten (s. Abb. 1). Diese Methode ist daher eine Kombination von S. Odens Verfahren und der eigentlichen Aräometermethode. Die Theorie dieses Instrumentes, „Pelometer“ genannt, ist so kompliziert, daß sie für die Berechnung der Korngröße nicht geeignet erscheint. Es werden deshalb halbempirische Kurven zur Auswertung der Pelometer Ablesungen verwendet.

Im Gegensatz zu den meisten anderen Verfahren gibt Grenness eine Konzentration der Bodensuspension von nur 2 g trockenen Bodens pro Liter an. Diese sehr schwache Lösung wird durch Grenness als ein wichtiger Faktor zur Verhütung der Koagulation betrachtet. Vor Be-

ginn des Versuchs wird die Suspension durch einen auf einem Handbohrer befestigten Propeller gründlich umgerührt (Abb. 2).

Unabhängig von dieser norwegischen Methode entdeckte in U. S. A. Prof. Bouyoucos, daß das Aräometer für die Schlämmanalyse von Böden verwendbar wäre. Prof. Bouyoucos veröffentlichte sein Verfahren in verschiedenen Zeitschriften [11], [12], [13] und [14]. Er verwendet ein besonderes Aräometer, das den Gewichtsgehalt eines Bodens mit dem spezifischen Gewicht 2,65 pro Liter Suspension angibt (Abb. 3). Das von Bouyoucos vorgeschlagene Verfahren zur Auswertung der Aräometerablesungen ist halbempirisch. Es stützt sich z. T. auf das Gesetz von Stokes und z. T. auf Ergebnisse, die mit anderen Verfahren der Schlämmanalyse erzielt wurden. Bouyoucos benutzt zur raschen und gründlichen Dispersion einen elektrischen „drink mixer“ (Abb. 4), dessen Gefäß mit Rippen versehen ist, um die zerstreuernde Wirkung zu erhöhen.

Gegen die Aräometermethode wurden wegen der zahlreichen Fehler, die die Versuchsergebnisse stark beeinflussen, viele Bedenken geäußert. Andererseits erkannte man, daß die Einfachheit dieses Verfahrens und die Schnelligkeit, mit der man Ergebnisse erhalten kann, es für Ingenieurzwecke besonders brauchbar gestalten. Es hat sich deshalb das U. S. Bureau of Public Roads die Aufgabe gestellt, die Möglichkeit der Beseitigung der Fehler zu untersuchen, und den Verfasser beauftragt die Fehlereinflüsse auch auf theoretischem und experimentellem Wege zu ergründen. Bei dieser Arbeit haben Prof. Dr. Glennon Gilboy¹, Dr. Leo Casagrande, Dr. L. Jürgenson¹ und Studenten¹ dem Verfasser geholfen, wofür ihnen an dieser Stelle bestens gedankt sei.

e) Das Stockessche Gesetz.

Bei allen Schlämmanalysen stützt sich die Berechnung der Korngröße entweder auf mikroskopische Beobachtungen oder auf das Gesetz von Stokes für die Sinkgeschwindigkeit von Kugeln in einer Flüssigkeit; [15].

Die Sinkgeschwindigkeit von glatten, gedrungenen, mineralischen Körnern ist praktisch gleich der nach Stokes' Formel berechneten Werte. Dies wurde u. a. nachgewiesen durch A. H. M. Andreason [16]. Versuche, die der Verfasser mit rundkörnigen, gedrungenen Körnern ausführte, stimmten ebenfalls gut mit dem Stockesschen Gesetz überein. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abb. 5 wiedergegeben.

Für scharfkantige Körner sehr unregelmäßiger Gestalt ist die Sinkgeschwindigkeit etwas kleiner und für schuppenförmige Teilchen ist sie bedeutend kleiner als die aus der Formel von Stokes errechneten Werte.

Atterberg beobachtete, daß flache Schluffteilchen, die mit einer

¹ Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass.

Geschwindigkeit absinken, die Kügelchen von 0,02—0,002 mm Durchmesser entsprechen, unter dem Mikroskop Durchmesser von 0,05 bis 0,005 mm zeigten. Terzaghi hat sogar größere Unterschiede gemessen [17].

Die aus der Stokesschen Formel berechneten Korngrößen sind daher nicht die wirklichen, sondern die „äquivalenten“ Korndurchmesser, d. h. die Durchmesser von Kugeln vom selben spezifischen Gewicht und derselben Fallgeschwindigkeit; [17].

Vergleichende Studien zwischen der mikroskopischen Korngrößenbestimmung und dem Ergebnis der Aräometeranalyse veranschaulichen

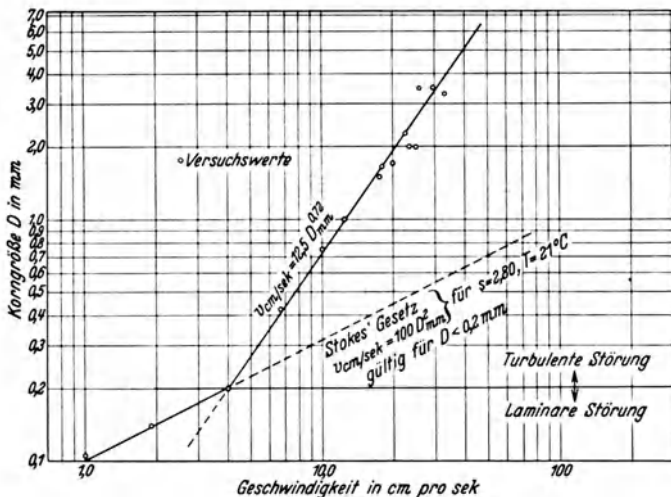


Abb. 5. Beziehung zwischen Durchmesser gedrungener Bogenkörner und Fallgeschwindigkeit im Wasser.

die Bedeutung der äquivalenten Korngröße. In Abb. 15 und 16 sind die Kornverteilungskurven von Quarzpulver und Glimmerpulver, die auf mikroskopischem Wege und durch die Aräometeranalyse bestimmt wurden, gegenübergestellt.

Das Quarzpulver (gemahlener Quarz) bestand aus sehr unregelmäßigen, scharfen Quarzkörnern. Die durch das Mikroskop bestimmten Korndurchmesser sind etwas größer als die mit Hilfe des Aräometers ermittelten Werte. Der Unterschied ist für die kleineren Teilchen größer, was wohl auf den beträchtlichen Gehalt an nadelförmigen Teilchen in der feineren Fraktion zurückzuführen ist.

Die wirkliche Korngröße eines schuppenförmigen Glimmerteilchens ist $3\frac{1}{2}$ —4mal größer als der äquivalente Korndurchmesser (Abb. 16). Da dieses Glimmerpulver durch ein Tyler-Standard-Nr.-200-Sieb gesiebt wurde, sollte man erwarten, daß die größten Körner mit der Länge der

Diagonale eines Quadrates von 0,074 mm Seitenlänge übereinstimmen. Der Durchmesser der größten Körner, mikroskopisch gemessen, beträgt 0,105 mm, was eine ausgezeichnete Kontrolle bedeutet.

Die Verteilungskurve der äquivalenten Korndurchmesser für sehr gleichförmige Böden, die mit Hilfe eines Aräometers bestimmt wurde, erfordert im Bereich der größten Korndurchmesser eine Korrektion, die in Abb. 15 und 16 durch eine gestrichelte Linie dargestellt ist. Diese Korrektion wird an anderer Stelle dieser Arbeit erläutert.

Auf Grund der vorangehenden Erläuterung wird es begreiflich, daß zwei Böden mit ähnlichen Kornverteilungskurven, je nach der Form der Körner, grundverschiedene physikalische Eigenschaften zeigen können. Diese Tatsache muß man sich vor Augen halten, wenn man die Ergebnisse einer Schlämmanalyse als Grundlage für vergleichende Studien der Eigenschaften von Böden benutzen will.

In seiner ursprünglichen Form wird Stokes' Gesetz durch die folgende Gleichung dargestellt.

$$v = \frac{2}{9} \cdot \frac{s - \delta}{n} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad (1)$$

worin

v = Sinkgeschwindigkeit des Kornes in cm je Sekunde,

D = Korndurchmesser in cm,

n = Viskosität der Flüssigkeit in Grammsekunden je cm²,

s = spezifisches Gewicht der Körner,

δ = spezifisches Gewicht der Flüssigkeit.

Für unseren Zweck ist es dienlicher, Gl. (1) nach D aufzulösen und D in mm statt in cm anzugeben.

Wenn man die Dimensionen der anderen Größen unverändert läßt, erscheint Stokes' Gesetz in folgender Form:

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot n \cdot v}{s - \delta}} \quad (2)$$

Stokes' Gesetz ist nur für Korngrößen unter einem bestimmten kritischen Durchmesser gültig. Nach Versuchen des Verfassers, die in Abb. 5 graphisch dargestellt sind, ist dieser kritische Durchmesser im Mittel gleich 0,2 mm für gedrungene mineralische Körner. Der kritische Durchmesser ist nicht konstant, sondern eine Funktion des spezifischen Gewichtes und der Gestalt der Körner, sowie der Wassertemperatur. Für schuppenförmige Teilchen ist der kritische Durchmesser größer als für gedrungene Körner und die Grenze ist nicht so deutlich erkennbar.

Das Vorhandensein zweier verschiedener Beziehungen, welche die Sinkgeschwindigkeit über und unter einem bestimmten kritischen Korndurchmesser beherrschen, beruht auf der Tatsache, daß die Störung, die in der stehenden Flüssigkeit durch die Bewegung von Körnern verursacht

wird, unterhalb der kritischen Korngröße rein laminar und darüber z. T. turbulent ist.

Außer diesem oberen kritischen Korndurchmesser gibt es auch eine untere Grenze der Korngröße, etwa bei 0,0002 mm, unter der das Gesetz von Stokes seine Gültigkeit verliert. Die Ursache dafür bildet die Brownsche Bewegung solcher Teilchen kolloidaler Größe; s. [17].

d) Größe des Auftriebes eines in eine Bodensuspension getauchten Körpers.

Um zu beweisen, daß für eine Suspension, in der sich die einzelnen Körner mit verschiedenen Geschwindigkeiten absetzen, der Auftrieb eines eingetauchten Körpers derselbe ist als wenn er in eine Flüssigkeit von derselben Dichteverteilung eingetaucht wäre, stellen wir folgende Betrachtung an.

Ein Bodenkorn nimmt beim Fall im Wasser in weniger als einer Sekunde eine gleichförmige Sinkgeschwindigkeit an. Sobald seine Geschwindigkeit konstant geworden ist, muß das Wasser einen Reibungswiderstand auf das Korn ausüben, der gleich seinem Gewicht ist. Infolgedessen muß die Gegenwart des gleichmäßig fallenden Kornes einen örtlichen Druckzuwachs in der Flüssigkeit verursachen. Dieser zusätzliche Druck wirkt auf die Flüssigkeit unterhalb des Kornes.

Wenn eine große Anzahl von Bodenkörnern, in einer Flüssigkeit verteilt, mit verschiedenen Geschwindigkeiten fällt, wird die Flüssigkeit an jeder Stelle einen hydrostatischen Druck ausüben, der mit dem Gewicht der darüberliegenden Suspension übereinstimmt. Deshalb muß auch der hydrostatische Auftrieb eines in eine Suspension getauchten Körpers gleich dem Gewicht der auf gleicher Höhe verdrängten Suspension sein. Ein in eine Suspension getauchtes Aräometer mißt die mittlere Dichte der Suspension längs der Höhe seiner Birne.

II. Theorie der Aräometermethode und der wichtigsten Fehlerquellen.

Die folgenden Bezeichnungen sollen gebraucht werden:

A = Querschnitt des Schlammzylinders.

a = Querschnittsfläche der Aräometerbirne in der Tiefe H .

$c = r - r' = \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$ Korrektion für den Meniskus am Schaft.

$C = c \cdot 10^3 = \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$

γ_t = spezifisches Gewicht des Wassers bei der Temperatur t .

γ_0 = spezifisches Gewicht des Wassers bei der Temperatur t_0 .

δ_t = spezifisches Gewicht einer anderen Flüssigkeit als Wasser bei der Temperatur t .

- D, D_1 und D_2 = Korngrößen entsprechend den Sinkgeschwindigkeiten v, v_1 und v_2 .
- ε = Temperaturkoeffizient der kubischen Ausdehnung von Glas (= 0,000025 pro ° C; Durchschnittswert).
- h = Länge der Aräometerbirne.
- H = Tiefe unter der Oberfläche der Suspension eines beliebigen Querschnittes der Aräometer zu einer Zeit T .
- H_1 und H_2 = Tiefe vom oberen und unteren Ende der Aräometerbirne unter der Oberfläche der Suspension zu einer Zeit T .
- H_c = Tiefe des Volumenmittelpunktes der Aräometerbirne unter der Oberfläche der Suspension; am zweckmäßigsten durch Eintauchen in ein Meßgefäß zu bestimmen; für symmetrische Birne $= \frac{H_1 + H_2}{2}$.
- H_R = Tiefe, die für die Korngrößenbestimmung maßgebend ist = wirksame Tiefe.
- L = Voller hydrostatischer Auftrieb der auf die Aräometerbirne wirksam ist.
- dL = Hydrostatischer Auftrieb der auf eine horizontale Scheibe der Aräometerbirne von der Dicke dH wirkt.
- m = Temperaturkorrektion.
- n = Viskosität des Wassers.
- q = $\sigma - \delta_t$ = Zuwachs im spezif. Gewicht der Flüssigkeit durch das suspendierte Material, in der Tiefe H und in der Zeit T .
- $q\%$ = $\frac{100 \cdot q}{\sigma_0}$
- r = Dichte-Lesung des Aräometers in der Höhe der Oberfläche der Suspension.
- R = $(r - 1) \cdot 10^3$ = vereinfachte Lesung für Suspensionen in Wasser.
- r' und R' = Aräometerlesungen in der Höhe des oberen Randes des vollausgebildeten Meniskus.
- s = spezifisches Gewicht des suspendierten Materials.
- σ = Spezifisches Gewicht der Suspension.
- σ_0 = Spezifisches Gewicht der Suspension zu Beginn des Versuches.
- σ_m = Mittleres spezifisches Gewicht der Suspension zwischen den Tiefen H_1 und H_2 .
- t = Temperatur der Suspension.
- t_0 = Temperatur bei der das Aräometer geeicht wurde; Normaltemperatur.
- T = verflossene Zeit, vom Beginn des Versuches an gerechnet.
- v = $\frac{H}{T}$ = Sinkgeschwindigkeit eines Kornes, daß um die Höhe H in der Zeit T fällt.

$$v_1 = \frac{H_1}{T}, \quad v_2 = \frac{H_2}{T}.$$

V = Gesamtvolumen der Suspension.

V_1 = Volumen der Aräometerbirne bei der Temperatur t_0 .

W = Trockengewicht aller Körner kleiner als D .

W_0 = Gesamtgewicht des zum Versuch verwandten Materiales.

$$W\% = 100 \frac{W}{W_0}.$$

W_m = Gewicht des Materiales, das der Dichte σ_m entspricht.

$$W_m\% = 100 \frac{W_m}{W_0}.$$

a) Die Bestimmung der Kornverteilungskurve aus Dichtemessungen der Suspension:

Voraussetzungen:

1. Gültigkeit des Stokesschen Gesetzes.
2. Gleichförmigkeit der Suspension bei Beginn des Versuches.
3. Der Querschnitt des Schlämmzylinders ist groß verglichen mit dem der Aräometerbirne¹.

Die Voraussetzung einer gleichmäßig verteilten Suspension zu Beginn des Versuches schließt in sich, daß alle Körner einer gegebenen Größe D in der Suspension gleichmäßig verteilt sind. Körner dieser Abmessung werden mit einer Geschwindigkeit v sinken, die durch Stokes' Gesetz bestimmt wird. Nach Verlauf einer bestimmten Zeit T werden alle Körner dieser Abmessung einen Weg $H = v \cdot T$ zurückgelegt haben.

Nun betrachten wir einen Horizontalschnitt durch die Suspension in einer Tiefe H unter der Oberfläche. Nach Verlauf der Zeit T werden alle Körner größer als D unter diesen Querschnitt gefallen sein. In dieser Ebene besteht die Suspension aus Körnern der Größe $\leq D$. Da sich alle Körner derselben Abmessung mit derselben Geschwindigkeit abwärts bewegen, wird die Verteilung der Körner von der Größe D in der betrachteten Ebene gleichförmig und dieselbe wie zu Beginn des Versuches sein. Da man ähnliche Betrachtungen für jede Korngröße kleiner als D anstellen kann, folgt, daß die Verteilung dieser kleineren Körner in der Tiefe H ebenfalls gleichmäßig und dieselbe wie zu Beginn des Versuches sein wird. Folglich ist das spezifische Gewicht der Suspension σ in der Tiefe H und der Zeit T ein Maß der Konzentration aller Körner $\leq D$ zu Beginn des Versuches.

Das spezifische Gewicht σ kann wie folgt ausgewertet werden: Nennen wir W das Aggregatgewicht aller Körner kleiner als D in der

¹ Die dritte Voraussetzung ist bei dem gewöhnlichen Versuchsverfahren nicht erfüllt. Der Einfluß eines engen Schlämmzylinders und die Korrektur dieses Fehlers werden in einem folgenden Abschnitt behandelt.

Probe und V das Gesamtvolumen der Suspension, dann ist das Gewicht der festen Substanz je Volumeneinheit der Suspension in der Tiefe H und zur Zeit T , gleich $\frac{W}{V}$.

Wenn s das spezifische Gewicht der festen Substanz bedeutet, verdrängen die Körner in einer Volumeneinheit der Suspension ein Flüssigkeitsvolumen gleich $\frac{W}{s \cdot V}$. Wenn t die Temperatur der Suspension ist und δ_t das spezifische Gewicht der Flüssigkeit bei dieser Temperatur, so ist das Gewicht der Flüssigkeit in einer Volumeneinheit der Suspension gleich $\delta_t \cdot \left(1 - \frac{W}{s \cdot V}\right)$. Es ist daher

$$\sigma = \frac{W}{V} + \delta_t \cdot \left(1 - \frac{W}{s \cdot V}\right) = \delta_t + \frac{W}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s} \quad (7)$$

Um den hydrostatischen Auftrieb L des Aräometers zu berechnen, teilen wir es in horizontale Scheiben sehr kleiner Dicke dH . Das Volumen dV der durch eine solche Differentialscheibe verdrängten Suspension ist

$$dV = a \cdot dH$$

worin a = Querschnitt des Aräometers in der Tiefe H .

Nach Verlauf der Zeit T ist die Dichte der Suspension in der Tiefe H durch Gl. (7) gegeben. Daher ist der hydrostatische Auftrieb dL eines Scheibendifferentials

$$dL = a \cdot dH \cdot \left(\delta_t + \frac{W}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s}\right) = a \cdot \delta_t \cdot dH + a \cdot dH \cdot \frac{W}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s}$$

Das Gesamtgewicht der verdrängten Suspension oder der hydrostatische Auftrieb L , der auf das Aräometer wirkt, ist daher

$$L = \int_{H_1}^{H_2} \left(a \cdot \delta_t + a \cdot \frac{W}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s}\right) \cdot dH$$

$$L = \delta_t \cdot \int_{H_1}^{H_2} a \cdot dH + \frac{1}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s} \cdot \int_{H_1}^{H_2} a \cdot W \cdot dH \quad (8)$$

Das erste Glied, welches L_w genannt werden soll, stellt den Auftrieb des Aräometers in der reinen Flüssigkeit dar und ist deshalb unabhängig vom suspendierten Boden. Das zweite Glied L_s genannt, ist eine Funktion der Korngrößenverteilung des Bodens und ebenso der verflossenen Zeit T ; weil sich die Beziehung zwischen W und H mit der Zeit ändert.

Der hydrostatische Auftrieb kann graphisch bestimmt werden, indem man in verschiedener Höhe die Fläche a des Querschnittes des Hydrometerkörpers mit der Dichte auf derselben Höhe multipliziert, wie das in Abb. 6a, b und c gezeigt wird.

Die schraffierte Fläche in Abb. 6c, e oder g stellt den gesamten hydrostatischen Auftrieb nach Gl. (8) dar.

Für die folgenden Betrachtungen empfiehlt es sich, die komplizierte Form eines gewöhnlichen Aräometers durch einen geraden Zylinder

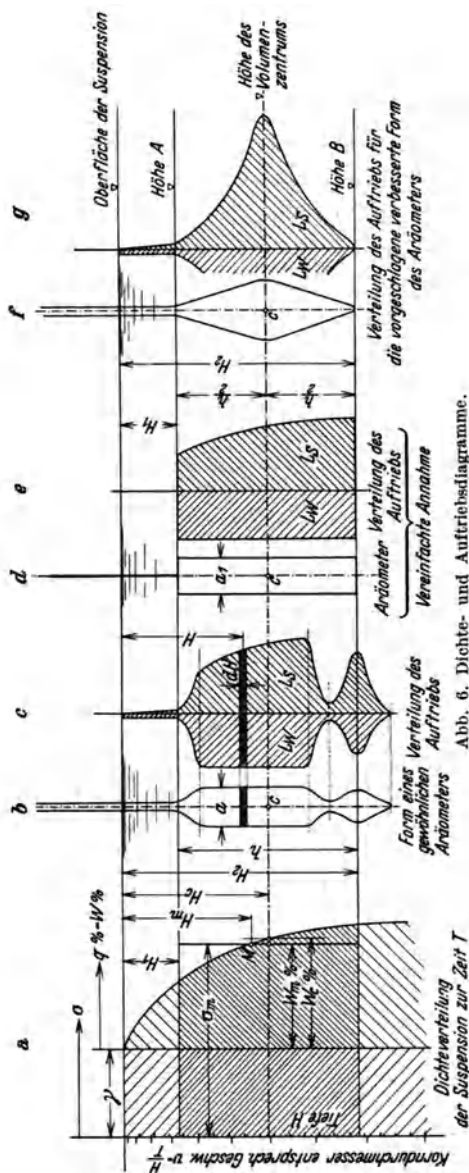
nach Abb. 6 d zu ersetzen. Der Volumenzentrum dieses vereinfachten Körpers wird auf gleicher Höhe wie der Mittelpunkt des Aräometers, Abb. 6 b, angenommen¹.

Die Länge der vereinfachten Birne wird so angenommen, daß das obere Ende auf Höhe A und das untere auf Höhe B liegt, wie es in Abb. 6 d dargestellt ist. Weiterhin wird angenommen, daß das Volumen der vereinfachten Birne gleich dem verdrängten Volumen der wirklichen Aräometerbirne V_1 ist. Dann wird die schraffierte Fläche in Abb. 6 e, die den Auftrieb des vereinfachten Aräometers darstellt, praktisch dieselbe sein, wie für das wirkliche Aräometer.

Das erste Glied, L_w , in Gl. (8) beträgt $V_1 \cdot \delta_t$. Das zweite Glied, L_s , in Gl. (8) kann wie folgt geschrieben werden:

$$L_s = \frac{1}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s} \cdot W_m \cdot V_1$$

¹ Man fand, daß für die von Bouyoucos gebrauchten Aräometer, von der in Abb. 6 b dargestellten Form, der Volumenzentrum der Birne mit genügender Genauigkeit auf dem halben Abstand zwischen Höhe A, wo der Schaft beginnt, und Höhe B beim weitesten Querschnitt der unteren Erweiterung, liegt. Siehe Abb. 6b. Für symmetrische Aräometer, von der Art wie sie der Verfasser verwendet, liegt der Mittelpunkt in der Hälfte zwischen den beiden Enden der Birne. Siehe Abb. 6.



Die Menge W_m stellt das Mittel der Fläche W zwischen den Höhen H_1 und H_2 , wie in Abb. 6a gezeigt, dar. Es ist beachtenswert, daß das spezifische Gewicht σ_m der Suspension, das dem Wert W_m entspricht, in einer Höhe H_m auftritt, die kleiner oder größer als $H_c = \frac{H_1 + H_2}{2}$ sein kann, je nach der Form der Dichteverteilungskurve. Die Tiefe H_m bestimmt die Korngröße, die dem prozentualen Wert $W_m \% = 100 \cdot \frac{W_m}{W_0}$ auf der Kornverteilungskurve entspricht.

Der Gesamtauftrieb L ist gleich dem aus der Aräometerlesung abgeleiteten spezifischen Gewicht σ_m multipliziert mit dem Volumen V_1 .

Mit diesen Änderungen nimmt Gl. (8) die folgende Form an:

$$L = \sigma_m \cdot V_1 = \delta_t \cdot V_1 + \frac{V_1}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s} \cdot W_m \quad (8a)$$

oder

$$\sigma_m = \delta_t + \frac{W_m}{V} \cdot \frac{s - \delta_t}{s} \quad (8b)$$

und

$$W_m = (\sigma_m - \delta_t) \cdot \frac{s}{s - \delta_t} \cdot V \quad (9)^1$$

Die zu W_m gehörige Korngröße könnte nach Stokes' Formel berechnet werden

$$D = \sqrt{\frac{1800 \cdot n}{s - \delta_t} \cdot \frac{H_m}{T}}, \quad (10)$$

wenn die Tiefe H_m bekannt wäre.

Für ungleichförmige Böden ist die Dichteverteilung eine sehr flache Kurve und folglich ist H_m nahezu gleich H_c . Für sehr gleichförmige Böden und besonders für Böden mit scharfen Knicken in ihren Kornverteilungskurven kann ein beträchtlicher Unterschied bestehen.

Als Beispiel sind in Abb. 7 die wirkliche Kornverteilungskurve eines außerordentlich gleichförmigen Bodens und die entsprechende Verteilungskurve, wie sie sich aus einem Aräometerversuch ergeben würde, aufgetragen.

Um für diesen Fall die Abweichung infolge der Verwendung von H_c statt H_m zu bestimmen, ist es nötig, die Dichteverteilung für verschiedene verflossene Zeiten festzustellen. Mittels der Formel von Stokes kann die Beziehung zwischen H und D für jeden verflossenen Zeitraum bestimmt werden. Zum Beispiel

für $T = 30$ Minuten, und Durchschnittswerte für die Konstanten, erhält man $H = 160\,000 D^2$,

worin H in cm und D in mm vorkommen. Diese Beziehung wird be-

¹ Diese Gleichung enthält noch keine Temperaturkorrektion.

nützt, um den vertikalen Maßstab für H und D auf der rechten Seite von Abb. 7 aufzutragen.

Indem man gleiche Werte von D auf dem horizontalen logarith-

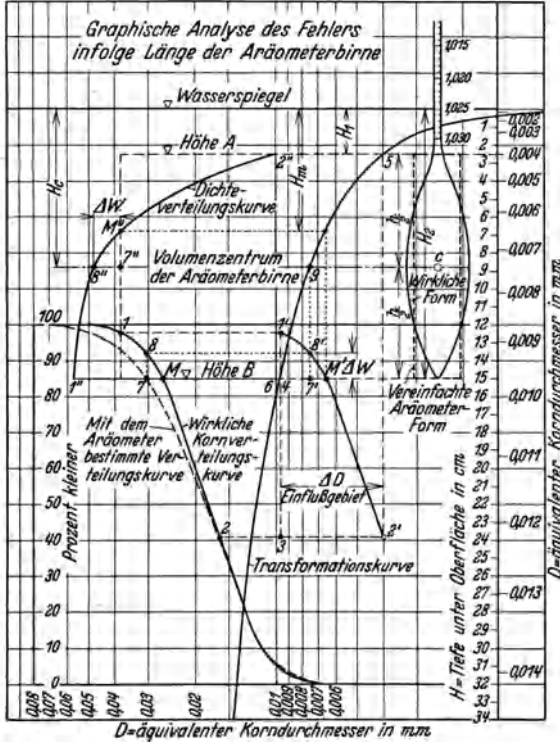


Abb. 7. Graphische Bestimmung des Fehlers infolge Länge der Aräometer-Birne.

isationskurve wird aus den Gleichungen für den horizontalen und vertikalen Maßstab abgeleitet:

$$x = \log D$$

$$y = H = f_1(T) \cdot D^2 = f_1(T) \cdot 10^{2x}$$

und deshalb

$$\log H = f_2(T) + 2x \quad (11)$$

Die Form dieser Kurve ist von der Zeit unabhängig, da das Differential

$$\frac{\partial x}{\partial H} = \frac{1}{2H} \quad (12)$$

die veränderliche T nicht enthält. Mit anderen Worten, für verschiedene Werte der verfloßenen Zeit wird die Kurve dieselbe Form haben, aber ihre Lage wird in horizontaler Richtung verschoben sein.

hischen Maßstab und dem vertikalen D -Maßstab verschnidet, erhält man eine „Transformationskurve“, mit deren Hilfe die Kornverteilungskurve des Bodens in die Dichteverteilungskurve der Suspension, 30 Min. nach Versuchsbeginn, übertragen werden kann. Dazu braucht man bloß die Ordinaten $W\%$ der Kornverteilungskurve, die ein Maß für die Dichte der Suspension bilden, siehe Gl. (8 b), mittels der Transformationskurve auf den entsprechenden Abszissen der vertikalen D -Skala aufzutragen.

Die allgemeine Gl. (11) für die Transfor-

Wenn man eine Kornverteilungskurve in Dichteverteilungskurven umwandeln will, ist es praktischer die Transformationskurve in einer konstanten Lage fest zu halten und den in Betracht kommenden Teil der Kornverteilungskurve horizontal zu verschieben.

Das in Abb. 7 ausgewertete Beispiel geht von folgenden Annahmen aus:

Wirkliche Kornverteilungskurve, wie in Abb. 7 angegeben, mit einem Gleichförmigkeitskoeffizienten ¹ $U = 1,75$.

Abmessungen des Aräometers gemäß Abb. 7, in der seine Stellung für einen Zeitpunkt bald nach Versuchsbeginn eingezeichnet ist. Zur Vereinfachung wurde in der Rechnung die Birne durch einen volumsgleichen Zylinder derselben Länge ersetzt.

Die Punkte (4) und (5), wo die obere Höhe „A“ und die untere „B“ die Transformationskurve (Abb. 7) schneiden, bestimmen den Einflußbereich ΔD , der in dieser Stellung für den Auftrieb maßgebend ist. Dieser Bereich gibt nur das Verhältnis zwischen der größten und kleinsten Korngröße für eine gegebene Aräometerlage an. Der für die eingezeichnete Stellung maßgebende Abschnitt 1—2 der Kornverteilungskurve muß einen Horizontalabstand $= \Delta D$ besitzen; der Bedingung genügen, daß Punkt M einem prozentuellen Wert W entspricht, der mit der am Aräometer abgelesenen Dichte übereinstimmt; und muß so gewählt werden, daß nach der Transformation in die Dichteverteilungskurve 1''—2'' der Punkt M'' auch auf dem flächengleichen Rechteck zu liegen kommt. Diese Aufgabe kann durch Probieren leicht gelöst werden.

Die gewöhnliche Aufgabe besteht darin aus der Aräometerlesung und seiner Höhenlage die Ordinate W% und die Abszisse D der Kornverteilungskurve zu bestimmen. Die Ordinate W kann aus dem spez. Gewicht σ mit Hilfe der Gl. (9) berechnet werden. Der Korndurchmesser müßte mit Hilfe der Stokesschen Formel und der unbekannten Tiefe H_m berechnet werden. Statt H_m wird die bekannte Tiefe H_c des Volumenzentrums der Birne eingesetzt und damit Punkt 8'' auf der Dichteverteilungskurve durch Punkt 7'' ersetzt. Nach Rücktransformation erhält man Punkt 7 auf der gestrichelten Kornverteilungskurve. Der Abstand 7''—8'' = 7—8 = ΔW gibt die Abweichung des errechneten Korndurchmessers vom wirklichen Korndurchmesser an. Dieses Verfahren wurde für verschiedene Abschnitte der Kornverteilungskurve durchgeführt und mit solchen Lagen des Aräometers, die mit der Menge des Bodens in der Suspension zur Zeit des Versuches übereinstimmen. Um die Zeichnung nicht zu unübersichtlich zu machen, wurde nur die Bestimmung von Punkt 7 gezeigt.

Ein Vergleich der wirklichen Kornverteilungskurve mit der aus dem Aräometerversuch bestimmten Kurve zeigt, daß für obiges Beispiel die

¹ Nach Allen Hazen.

größte Abweichung 7% beträgt. Bei Berücksichtigung der wirklichen Form der Aräometerbirne würde dieser Wert auf etwa 4% reduziert werden. Die Abweichung ist am größten in der groben Fraktion und in scharfen Krümmungen der Verteilungskurve. Die Abweichung nimmt in der feineren Fraktion wegen des zunehmenden Eintauchens des Aräometers ab. Das kann man auch rechnerisch aus der folgenden Betrachtung schließen:

Stokes' Gesetz kann in der Form $v = K \cdot D^2$ geschrieben werden, worin K eine Konstante ist, die aus Gl. (1) bestimmt wird.

Wenn man $v_1 = \frac{H_1}{T}$ und $v_2 = \frac{H_2}{T}$ einführt und die zwei Beziehungen dividiert, so erhält man

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$$

und den Einflußbereich

$$\Delta D = \log D_2 - \log D_1 = \frac{1}{2} \log \frac{H_2}{H_1}$$

Der Wert ΔD ist nur von dem Verhältnis H_2 zu H_1 abhängig, oder mit anderen Worten, von der Tiefenlage des Aräometers. Da die Abweichung der berechneten Verteilungskurve ungefähr proportional mit ΔD wächst, läßt sich der Fehler dadurch verringern, daß man die Konzentration der Suspension beschränkt, wodurch der Aräometerschaft schon zu Beginn des Versuches ein gewisses Maß einsinkt.

Da normale Böden bedeutend flachere Verteilungskurven besitzen, als die in Abb. 7 eingezeichnete Kurve, ist für sie die maximale Abweichung nur ein Bruchteil des oben angegebenen Wertes.

Aus den vorangehenden theoretischen Betrachtungen können wir die folgenden Schlüsse ziehen:

1. Ein Aräometer mißt die mittlere Dichte der Suspension entlang der Höhe seiner Birne.

2. Für praktische Zwecke ist es genügend genau, wenn man der Berechnung des Korndurchmessers den Höhenunterschied von der Oberfläche der Suspension bis zum Volumenzentrum der Birne zugrunde legt. Für enge Schlämmsylinder muß jedoch diese Höhe noch eine Korrektion erfahren, wie im folgenden Abschnitt c) gezeigt wird.

3. Je gleichmäßiger der Boden und je größer die Dichte der Suspension zu Beginn des Versuches, desto größer ist die Abweichung der wirklichen Kornverteilungskurve von der durch den Aräometerversuch ermittelten Kurve. Für außerordentlich gleichmäßige künstliche Pulver kann diese Abweichung innerhalb der groben Fraktion so groß werden, daß eine Korrektion erforderlich wird. Beispiele dieser Art zeigen Abb. 15 und 16. Für gewöhnliche gleichförmige Böden bleibt die größte

Abweichung unter 2%, und bei ungleichförmigen Böden ($U \geq 10$) verswindet sie für praktische Zwecke.

4. Das obere Ende der Aräometerbirne soll bei Beginn des Versuches mindest 2 cm eintauchen.

b) Sedimentablagerung auf der Aräometerbirne.

Wenn man ein Aräometer eine Zeitlang in einer Suspension läßt, wird sich Material auf der oberen konischen Fläche der Birne ablageren

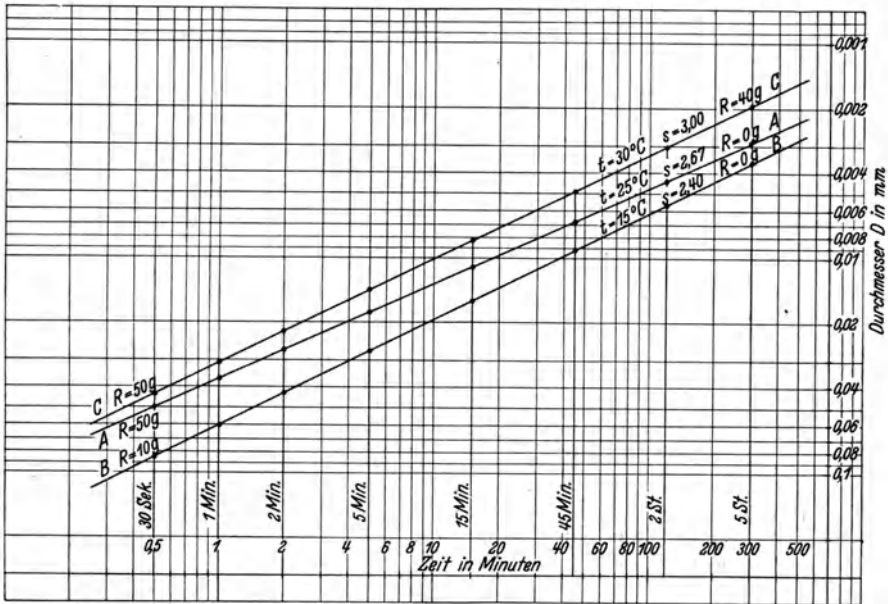


Abb. 8. Graphische Begründung, warum keine eindeutige Beziehung zwischen Korngröße und verflossener Zeit besteht.

A Boden mit durchschnittlicher Kornverteilung, $t = 25^\circ\text{C}$, $s = 2,67$.

B Boden mit hohem Prozentsatz an feinem Sand und grobem Schluff, $t = 30^\circ\text{C}$, $s = 2,4$.

C Boden mit hohem Prozentsatz an Ton und sehr wenig Sand und Schluff, $t = 30^\circ\text{C}$, $s = 3,0$.

und bedeutende Fehler der Ablesungen verursachen. Das Gewicht der Ablagerung ist nicht nur eine Funktion der verflossenen Zeit und der Konzentration der Suspension, sondern hängt auch in hohem Maß von den Eigenschaften des suspendierten Materiales ab.

Der einzige Weg diesen Fehler zu vermeiden ist, das Aräometer nach jeder Ablesung herauszunehmen und durch Abspülen zu reinigen. Daß ein solcher Vorgang vom Standpunkt der Genauigkeit der Versuchsergebnisse keine nachteiligen Folgen hat, wird im Abschn. IV e gezeigt.

c) Einfluß des Durchmessers des Schlämmzylinders auf die Berechnung der Korngröße.

Bei der vorausgehenden theoretischen Ableitung wurde ein Absitzgefäß von unendlich großem Durchmesser angenommen. Für einen praktischen Versuchsvorgang verwendet man am besten einen 1000 cm³-Meßzylinder, dessen Querschnittsfläche nur etwa sechsmal so groß ist wie die Querschnittsfläche der Aräometerbirne. Ein solch enger Schlammzylinder beeinflusst den Versuch in zweierlei Weise.

1. Die Bodenteilchen, die aus der Suspension über der Aräometerbirne fallen, werden auf ihrem Weg zwischen Birne und Gefäßwandung in einen engeren Querschnitt gedrängt. Dies verursacht eine höhere Konzentration und folglich auch einen größeren Auftrieb des Aräometers. Wenn das Instrument während der ganzen Versuchszeit in der Suspension gelassen wird, entstehen dadurch sehr bedeutende Abweichungen in den Dichtele-
 sungen.

Auch hier ist wieder die einzige Abhilfe, das Aräometer nach jeder Ablesung herauszunehmen.

2. Wenn man das Aräometer nur für die kurze Zeit der Ablesung eingetaucht läßt und es dann wieder herausnimmt, muß die Tiefe H_c zur

Berechnung der Korngröße eine Korrektur erfahren, die mit Hilfe von Abb. 9 im Folgenden erklärt wird.

Wird das Aräometer eingeführt, so verursacht es eine relative Bewegung jenes Teiles der Suspension, in welcher die Birne schwimmt. Dieser Teil nimmt die Höhe h_0 in Abb. 9a ein, und dehnt sich durch Einführung des Aräometers auf den Wert h (Abb. 9b) aus. Die Suspension in der Höhe des Volumsmittelpunktes C, die für die Aräometerlesung maßgebend ist, befand sich während des Sedimentationsprozesses auf der geringeren Höhe $H_R < H_C$. Es ist klar, daß sich die Errechnung der Korngröße auf die reduzierte Tiefe H_R und nicht auf H_C gründen muß. Die Beziehung zwischen H_C und H_R kann leicht abgeleitet werden.

Mit

A = Fläche des Schlammzylinders

V_1 = Volumen der Aräometerbirne

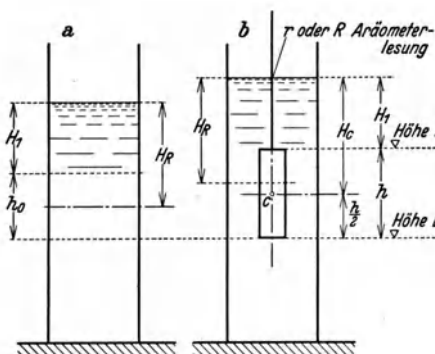


Abb. 9. Beziehung zwischen wirkbarer Tiefe und Durchmesser des Schlammzylinders.

V_1 = Volumen der Aräometerbirne.

A = Querschnittsfläche des Schlammzylinders.

Reduzierte Tiefe $H_R = H_1 + \frac{1}{2} \left(h - \frac{V_1}{A} \right)$.

und den anderen in Abb. 9 angegebenen Bezeichnungen, bestehen die folgenden Beziehungen:

$$h_0 \cdot A = h \cdot A - V_1$$

$$h_0 = h - \frac{V_1}{A}.$$

Die reduzierte Tiefe ist daher

$$H_R = H_1 + \frac{h_0}{2} = H_1 + \frac{1}{2} \cdot \left(h - \frac{V_1}{A} \right) \quad (13)$$

die Korrektion

$$H_C - H_R = \frac{V_1}{2A}. \quad (14)$$

Für die vom Verfasser gebrauchten Instrumente liegt der Wert der Korrektion $H_C - H_R$ zwischen 1,1 und 1,6 cm.

Es wurden Versuche durchgeführt um festzustellen, ob die wirkliche Dichte der Suspension bei der reduzierten Tiefe H_R mit der Aräometerlesung übereinstimmt. Die Bestimmungen wurden zu verschiedenen Zeiten nach Versuchsbeginn gemacht. Nach jeder Ablesung wurde das Aräometer sofort herausgenommen und eine Pipette in die Suspension eingeführt. Eine Probe von 20 cm³ wurde in der reduzierten Tiefe H_R entnommen, die nach Gl. (13) errechnet wurde.

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung dieser Versuche, die an einer Tonprobe vom spezifischen Gewicht $s = 2,79$ ausgeführt wurden. Das verwandte Aräometer ist auf Dichte bei 15,6° C geeicht. Gewicht der Probe war $W_0 = 39,4$ g.

Temp. ° C	Aräometer-Bestimmung ¹					Pipette-Bestimmung		
	Verflossene Zeit	Aräometer- Lesung R	$R + m$	$\frac{W}{s-1} \cdot \frac{1}{(R+m)}$ $\frac{g}{g}$	$W\%$	Gewicht des Bodens suspendiert in 20 cm ³ g	Gewicht des Bodens auf 1000 cm ³ W in g	$W\%$
20,5	45 Min	17,5	18,3	28,5	72,3	0,58	29,0	73,5
20,5	5 Std.	11,3	12,1	18,9	48,0	0,38	19,0	48,2
20,5	24 Std.	8,8	9,6	15,0	38,0	0,29	14,5	36,8
20,5	48 Std.	2,5	3,3	5,2	13,2	0,11	5,5	14,0

Die aus den Aräometerlesungen errechneten Mengen W stimmen innerhalb der Versuchsgenauigkeit mit den direkt durch die Pipettmethode bestimmten Werten überein.

d) Temperaturkorrektion.

Die Temperatur der Suspension beeinflusst den Aräometerversuch in zwei verschiedenen Beziehungen. Erstens bestimmt sie die Viskosität

¹ Die Auswertung der beobachteten Daten ist im folgenden Abschnitt behandelt.

der Flüssigkeit, wodurch die Sinkgeschwindigkeit der Teilchen und damit die errechneten Korndurchmesser beeinflußt werden, zweitens ändert die Temperatur auch die Dichte der Suspension und das Volumen der Aräometerbirne und beeinflußt daher die aus den Aräometerlesungen errechneten Prozentwerte.

Der Temperatureinfluß auf die Viskosität kann bei der Berechnung der Korngröße in der Stokesschen Formel leicht berücksichtigt werden.

Um eine Formel für die Korrektur des zweiten Einflusses abzuleiten, berechnen wir die Aräometerlesungen „ r “ für die folgenden Fälle, wobei angenommen wird, daß das Instrument für Dichte bei t_0/t_0 geeicht ist ¹:

a) Temperatur der Suspension und des Aräometers t_0 und Dichteablesung r_0 . Dann ist r_0 die relative Dichte, das heißt das Einheitsgewicht der Suspension dividiert durch das Einheitsgewicht von Wasser mit der Temperatur t_0 . Bezeichnet man mit γ_0 das spezifische Gewicht von Wasser mit der Temperatur t_0 , dann ist das spezifische Gewicht der Suspension

$$\sigma = r_0 \cdot \gamma_0$$

b) Temperatur der Suspension t , des Aräometers t_0 und Dichteablesung r_k . Das spezifische Gewicht der Suspension ist wie oben

$$\sigma = r_k \cdot \gamma_0 \quad (15)$$

c) Temperatur der Suspension und des Aräometers t und Dichteablesung r . Im Vergleich zu Fall b ist das Volumen des Aräometers um $[1 + \varepsilon \cdot (t - t_0)]$ größer geworden, worin ε der kubische Ausdehnungskoeffizient für Glas bedeutet.

Als Folge dieser Volumenänderung ändert sich auch der Auftrieb des Aräometers und damit die Dichtelesung im gleichen Verhältnis, so daß die folgende Beziehung besteht,

$$\frac{r_k}{r} = \frac{1}{1 + \varepsilon(t - t_0)}.$$

Es stellt demnach

$$r_k = \frac{r}{1 + \varepsilon(t - t_0)}$$

die korrigierte Dichte dar. Wenn man berücksichtigt, daß der Wert ε ungefähr von der Größe $25 \cdot 10^{-6}$ ist, erkennt man, daß im Nenner das Glied $\varepsilon \cdot (t - t_0)$ gegenüber der Einheit so klein ist, daß man von der Beziehung

$$\frac{1}{1 + \Delta} \doteq 1 - \Delta$$

Gebrauch machen darf, wodurch man den Ausdruck

$$r_k = r - r \cdot \varepsilon \cdot (t - t_0)$$

¹ In Wasser mit der Temperatur t_0 mißt das Aräometer die relative Dichte Eins.

erhält. Bevor man diesen Wert in Gl. (15) einführt, empfiehlt es sich das Produkt $r_k \cdot \gamma_0$ durch eine Summe zu ersetzen. Es ist

$$r_k \cdot \gamma_0 = [1 + (r_k - 1)] \cdot [1 + (\gamma_0 - 1)] = 1 + r_k - 1 + \gamma_0 - 1 + (r_k - 1) \cdot (\gamma_0 - 1)$$

Das letzte Glied in dieser Gleichung ist gegenüber den andern Gliedern so klein, daß es ohne weiteres vernachlässigt werden kann. Es läßt sich daher Gl. (15) wie folgt schreiben

$$\sigma = r_k + \gamma_0 - 1 = r - r \cdot \varepsilon \cdot (t - t_0) + \gamma_0 - 1.$$

Wenn man diesen Wert für σ in Gl. (9) einführt, erhält man

$$W = \frac{V \cdot s}{s - \delta_t} [r - 1 + \gamma_0 - \delta_t - r \cdot \varepsilon \cdot (t - t_0)]. \quad (16)$$

Für Suspensionen in Wasser darf man ferner die folgenden Vereinfachungen einführen

$$\frac{s}{s - \gamma_t} \doteq \frac{s}{s - 1}$$

und

$$r \cdot \varepsilon \cdot (t - t_0) \doteq \varepsilon \cdot (t - t_0),$$

und man erhält somit

$$W = \frac{V \cdot s}{s - 1} \cdot [r - 1 + \gamma_0 - \gamma_t - \varepsilon \cdot (t - t_0)]. \quad (17)$$

Mit den Abkürzungen

$$\left. \begin{aligned} R &= (r - 1) \cdot 10^3 \\ m &= [\gamma_0 - \gamma_t - \varepsilon \cdot (t - t_0)] \cdot 10^3 \end{aligned} \right\} \quad (17a)$$

und dem üblichen Fall $V = 1000 \text{ cm}^3$, gelangt man zu jenen Gleichungen, die für die Auswertung einer Schlämmanalyse von Böden mittels Aräometer am geeignetsten erscheinen:

$$W = \frac{s}{s - 1} (R + m) \quad (18)$$

oder

$$W \% = \frac{100}{W_0} \cdot \frac{s}{s - 1} (R + m). \quad (18a)$$

Bei einem Dichtearäometer¹ können die Werte R direkt als Dezimalen, von 10^{-3} ausgedrückt, abgelesen werden. Z. B. eine Dichte $r = 1,0252$ wird in Form von $R = 25,2$ abgelesen.

Die Größe m ist eine Temperaturkorrektion und ist eine Funktion der Temperaturen t und t_0 .

¹ Während für Dichtearäometer die Errechnung von W sehr einfach ist, erfordert es umständlichere Rechnungen, um den genauen Wert für ein Aräometer zu bestimmen, welches in Gramm Boden eines gegebenen spezifischen Gewichtes nach der Methode von Professor Bouyoucos geeicht ist. In diesem Fall ist es nicht nur nötig die Temperaturkorrektion, sondern auch eine Korrektion für den Unterschied der spezifischen Gewichte in Rechnung zu stellen.

III. Nomogramme zur schnellen Auswertung der Aräometerlesungen.

Die Bestimmung der Korngröße und Prozentwerte erfordert die Lösung der Gl. (2) und (16) oder (18) für jede Aräometerlesung. Der Zeitaufwand für diese Arbeit kann durch die Anwendung graphischer Lösungen auf einen Bruchteil verringert werden. Der Verfasser hat eine Reihe von Lösungen entworfen, und hat schließlich die in Abb. 11 u. 12 dargestellten Nomogramme für am besten geeignet gefunden.

a) Bestimmung der Korngröße.

Abb. 11 bietet eine allgemeine nomographische Lösung des Stokes'schen Gesetzes für Fallhöhen zwischen 5 und 30 cm. Für jede Kombination bekannter Werte kann die restliche unbekannte Größe innerhalb einiger Sekunden und mit der Genauigkeit eines Rechenschiebers bestimmt werden. Dieses Nomogramm kann auch zur Auswertung der Beobachtungen von anderen Methoden der Schlämmanalyse verwendet werden, wo das Stokessche Gesetz zur Anwendung kommt; insbesondere für die Pipettemethode.

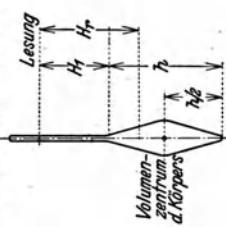
Als Beispiel berechne man den größten äquivalenten Korndurchmesser in einer Suspension in 10 cm Tiefe unter der Oberfläche, zehn Minuten nach Beginn des Versuches. Man nehme das spezifische Gewicht des Bodens mit $s = 2,75$ und eine mittlere Temperatur der Suspension seit Versuchsbeginn mit $t = 25^\circ \text{C}$ an.

Eine gerade Linie durch die zusammengehörigen Punkte auf der s - und t -Skala schneidet die A -Skala in einem Punkt mit der Ablesung 9,4. Diesen Punkt merkt man sich, während das Lineal so über die H - und T -Skala gelegt wird, daß es die gegebenen Werte für Tiefe und Zeit deckt. Diese Lage der Linie bestimmt die Geschwindigkeit $v = 0,017 \text{ cm je sec}$. Da uns die Geschwindigkeit nicht interessiert, lesen wir den Wert nicht ab, sondern drehen das Lineal um diesen Punkt bis es die vorher bestimmte Lesung 9,4 auf der A -Skala schneidet. In dieser Lage schneidet die Gerade die D -Skala im Punkt 0,0125 mm, welcher Wert den gewünschten Korndurchmesser darstellt.

Abb. 10. Beispiel für den Entwurf der R -, r -Skala in Abb. 11.



Um dieses Nomogramm im Zusammenhang mit dem Aräometerversuch zu gebrauchen, ist es nötig die tatsächlichen Aräometerlesungen R oder r mit den entsprechenden reduzierten Tiefen H_R auf derselben

Entwurf der R_r -Skala

Die den Aräometer-Lesungen (R_r) entsprechenden reduzierten Höhen (H_r) sind aus folgender Gleichung zu errechnen:

$$H_r = H_b + \frac{1}{2} (h - \text{Querschnittsfläche des Zylinders})$$

konstant

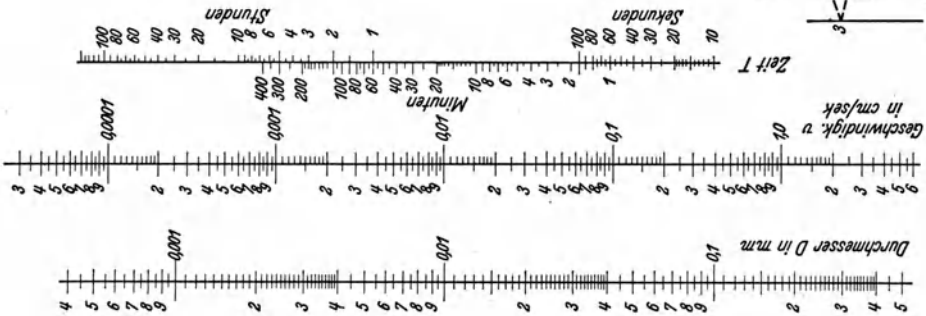
Die den Höhen H_r entsprechenden Lesungen R_r sind auf der rechten Seite der H_r -Skala aufzutragen und zu unterteilen (siehe Beispiel in Abb. 10)

Stokes' Gesetz:

$$D = \sqrt{\frac{A \cdot v}{s}}$$

$$A = \frac{1800 \cdot \eta}{s \cdot t}$$

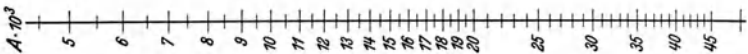
$$v = \frac{H}{t}$$



Nomographische Lösung von Stokes' Gesetz

η = Viskosität der Flüssigkeit in g cm⁻²
 s = Spez. Gewicht der Körner
 ρ_s = Spez. Gewicht der Flüssigkeit
 v = Geschwindigkeit in cm/sek
 D = Korndurchmesser in mm
 t = Temperatur in °C*
 H = Höhe in cm
 T = Zeit in sek

Nur für Wasser:
 für andere Flüssigkeiten müssen die A-Werte berechnet werden.



Spez. Gewicht s der Teilchen

* Durchschnitt vom Versuchsbeginn bis zur Zeit der Lesung

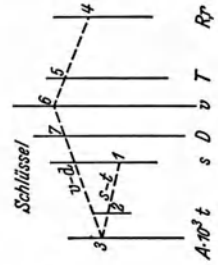


Abb. 11. Nomographische Tafel für die Berechnung der äquivalenten Korndurchmesser aus den Ergebnissen der Aräometer-Analyse.

Skala übereinstimmend aufzutragen (s. Abb. 9 u. 10). Da Aräometer verschiedene Abmessungen haben, muß man für jedes Aräometer die R -, r -Skala gesondert aufzeichnen. Zu diesem Zweck ist die rechte Seite der H -Skala in Abb. 11 zur Auftragung der entsprechenden R -, r -Werte frei gelassen. Die Beziehung zwischen der Tiefe H_R in cm und der Aräometerablesung R oder r wird durch Gl. (13) festgelegt.

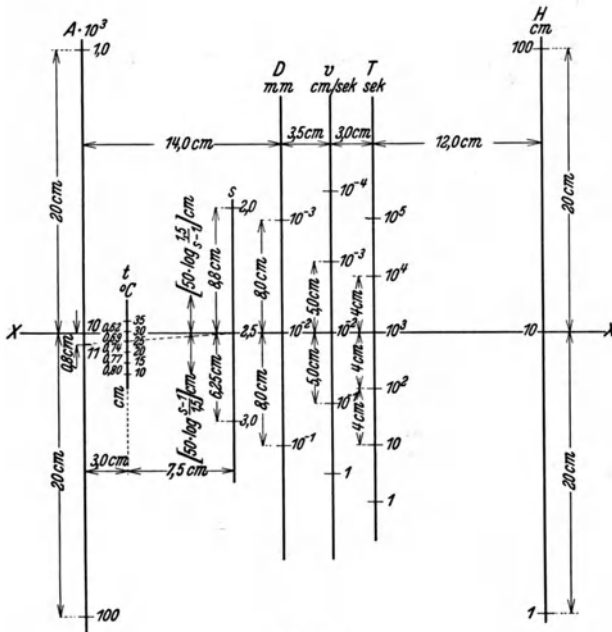


Abb. 11 a.

Um diese Gleichung auszuwerten, wird die Größe H_1 in cm für eine Reihe von R -, r -Werten gemessen. Die Größe h wird in cm, das Volumen V_1 des Körpers in cm^3 durch Eintauchen in einen Meßzylinder und der Querschnitt A des Schlammzylinders in cm^2 gemessen. Die errechneten H_R -Werte werden auf der rechten Seite der H_R -Skala aufgetragen, mit den entsprechenden R -, r -Lesungen bezeichnet und genügend unterteilt. Abb. 10 zeigt ein Beispiel für die Auftragung einer solchen Skala.

Da die R -, r -Skala für jedes Aräometer verschieden ist, werden in größeren Laboratoriumsbetrieben stets eine Reihe von Nomogrammen der Abb. 11 gebraucht. Anweisungen für die Anfertigung solcher Nomogramme sind in Abb. 11 a gegeben¹. Man beginnt bei der Auftragung

¹ Die Verlagsbuchhandlung Julius Springer, Berlin W 9, liefert diese Tafel in brauchbarer Größe gegen Voreinsendung von RM 0,80.

mit der horizontalen Achse $X-X$, auf der die angeführten Größen für A , s , D , v , T und H liegen. Die entsprechenden Skalen werden mittels logarithmischer Aufteilung gefunden. Jener Punkt, der einem Wert von 25°C auf der Temperaturskala entspricht, liegt auf der Verbindungslinie des Wertes $s = 2,50$ und dem Wert 11,0 auf der A -Skala. Weitere Angaben für die Auftragung der Temperatur-Skala sind in Abb. 11a angegeben. Eine kurze Anweisung für die Bestimmung der dem gegebenen Aräometer entsprechenden R -, r -Skala findet man auf der rechten Seite der Abb. 11, und ein Beispiel einer solchen Skala in Abb. 10.

b) Temperaturkorrektion.

Die durch Gl.(17a) angegebene Temperaturkorrektion m wurde für Normaltemperaturen von $60^{\circ}\text{F} = 15,6^{\circ}\text{C}$ und $68^{\circ}\text{F} = 20^{\circ}\text{C}$ berechnet. Der kubi-

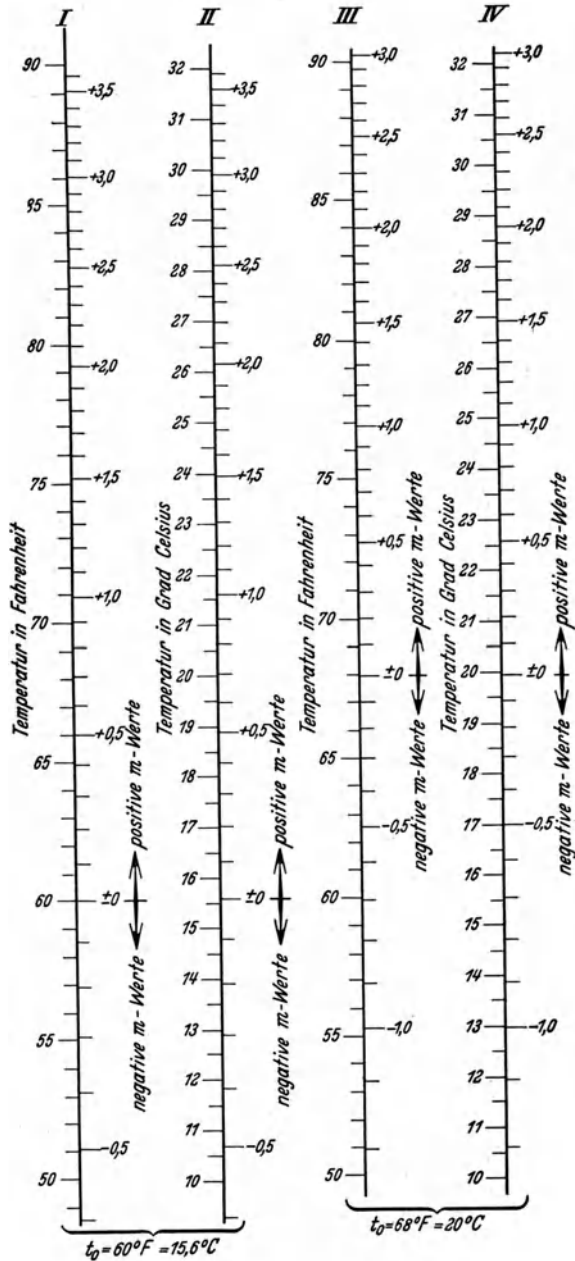


Abb. 12.
Temperaturkorrektion für Dichte-Aräometer mit der Normaltemperatur t_0

sche Ausdehnungskoeffizient des Glases wurde mit $\varepsilon = 25 \cdot 10^{-6}$ je Grad Celsius angenommen.

Die Korrekturen sind in Abb. 12 in Form von leicht lesbaren Skalen dargestellt. Der Bequemlichkeit halber sind zwei Skalenpaare gezeichnet, eines für Temperaturen in Celsiusgraden, das andere in Fahrenheit.

Beim Auswerten der Aräometerablesungen eines wirklichen Versuches ist es nicht unbedingt nötig, die Korrektur m oder die verbesserten Lesungen ($R + m$) in besonderen Rubriken einzutragen. Da die Größe $\frac{s-1}{s} \cdot \frac{100}{W_0}$ Gl. (18a) für alle Ablesungen desselben Versuches konstant ist, können die Prozentwerte ($W\%$) wie folgt berechnet werden: Lese Korrektur m von Skala in Abb. 12 ab, füge m zu R und multipliziere mit $\frac{s}{s-1} \cdot \frac{100}{W_0}$.

IV. Einfluß von Fehlerquellen auf die Genauigkeit der Versuchsergebnisse.

Jene Faktoren, die nicht nur den Versuchsvorgang, sondern auch die rechnerische Auswertung beeinflussen, wurden im Abschnitt II behandelt. Eine Reihe anderer Faktoren, welche die Genauigkeit der Versuche beeinflussen, sollen in diesem Abschnitt besprochen werden.

Es ergibt sich dabei die Frage, wie groß die zulässigen Abweichungen für den Einfluß einer einzelnen Fehlerquelle sein dürfen. Auf Grund langjähriger Erfahrungen hat der Verfasser diese Grenze für gewöhnliche Bodenuntersuchungen wie folgt festgesetzt:

Differenz zwischen berechneten und wirklichen

$$W\%-Werten = \pm 1 \cdot 0$$

Differenz zwischen berechneten und wirklichen

$$D-Werten = \pm \frac{2}{100} D.$$

a) Vorbehandlung der Probe.

Genaue Resultate jeder Schlämmanalyse hängen vor allem von einer sorgfältigen Vorbehandlung der Bodenprobe ab. Es ist nicht nur nötig, Kornanhäufungen zu zerteilen, sondern auch Flockenbildung während des Absitzvorgangs zu verhindern.

Die Dispersion von Böden mit schwacher Kohäsion kann von Hand aus geschehen. Plastische Böden erfordern jedoch wirksamere Dispersionsmethoden. Der abgeänderte „Drink-mixer“ (Abb. 4), wie er von Prof. Bouyoucos vorgeschlagen wird [11] hat sich gut bewährt. Die zerteilende Wirkung solcher mechanischer Methoden kann durch che-

chemische Behandlung vergrößert werden. Die Hauptaufgabe der chemischen Behandlung ist jedoch Flockenbildung während des Versuches zu verhindern. Die komplizierte Zusammensetzung von Böden macht es praktisch fast unmöglich Flockenbildung vollkommen zu vermeiden. Auch wenn die Probe zu Beginn des Versuchs vollständig zerteilt war und wenn die chemische Behandlung mit besonderer Sorgfalt ausgeführt wurde, tritt noch oft teilweise Koagulation ein, die mit gewöhnlichen Mitteln nicht festgestellt werden kann.

Das Maß dieser teilweisen Koagulation wird hauptsächlich durch die Eigenschaften des Bodens und die Behandlungsmethode bestimmt. Andere wichtige Faktoren sind die Konzentration der Suspension und die verflossene Zeit.

Vergleichende Studien über die Wirkung verschiedener Behandlung auf das Ergebnis einer Schlämmanalyse wurden unter anderm durch Wiegner [20], Olmstead, Alexander und Middleton [21] und [22] gemacht. Aus diesen und anderen Untersuchungen wurden die folgenden Schlüsse gezogen:

1. Für die meisten Böden ist es nicht möglich die Fraktionen mit Körnern kleiner als 0,005 mm genau zu bestimmen. Das Ergebnis hängt hauptsächlich von der Vorbehandlung der Probe ab.

2. Für allgemeine Gebrauchszwecke ist es unmöglich ein spezielles Studium eines jeden Bodens zu fordern, um die wirksamste Vorbehandlung festzustellen. Man muß sich auf eine einheitliche Methode festlegen, die so zu wählen ist, daß sie die Vorteile einer gründlichen Dispersionswirkung mit wenig Zeit- und Arbeitsaufwand verbindet.

3. Wenn man die Ergebnisse verschiedener Verfahren der Schlämmanalyse vergleicht, muß man besonders auf die Behandlung der Probe und die Konzentration der Suspension achten. Wenn Behandlung und Konzentration verschieden sind, darf man eine genaue Übereinstimmung nur für die gröberen Fraktionen erwarten.

Eines der wirksamsten chemischen Dispersionsmittel für Böden ist Wasserglaslösung, das vom U.S. Bureau of Public Roads seit Jahren für Schlämmanalysen erfolgreich verwendet wird. Auch der Verfasser hat mit diesen Mitteln sehr gute Erfolge erzielt und gefunden, daß in gewissen Fällen, z. B. bei kalkhaltigen Böden, in denen keine andere chemische Behandlung die Koagulation verhindern konnte, der Zusatz von Wasserglaslösung eine stabile Zerteilung ermöglichte.

Das Wesen der Wirkung der Wasserglaslösung ist eine noch umstrittene Frage. Es handelt sich wahrscheinlich um eine Art Schutzkolloidwirkung, bei der die vom Alkalisilikat in Lösung gehaltene kolloidale Kieselsäure die Hauptrolle spielen dürfte. Untersuchungen darüber wären sehr erwünscht, wie auch in bezug auf die Wirkung der verschiedenen im Handel erhältlichen Arten von Wasserglas.

Für gewöhnliche Aräometeranalysen genügt eine Menge von $\frac{1}{2}$ oder 1 cm^3 Wasserglaslösung von ca. 40° Be . Wenn größere Mengen verwendet werden, ist eine Korrektur nötig wegen der Änderung des spezifischen Gewichts der Suspension. Diese Korrektur ist eine konstante und negative Größe, die schnell durch Ablesen des Aräometers in reinem Wasser und nach Beimischung der gewünschten Menge der Lösung und nochmaligem Eintauchen und Ablesen des Aräometers bestimmt werden kann. Der Unterschied dieser Ablesungen gibt die Korrektur an, die mit der Meniskuskorrektur (siehe Abschnitt „f“ dieses Kapitels!) zweckmäßig in eine Größe vereinigt werden kann.

Bei Untersuchung von Böden für Ingenieurzwecke scheint die Behandlung mit Wasserglas und eine mechanische Dispersion von Hand oder durch einen elektrischen Mischapparat für die meisten Fälle zu genügen. Sollten Schwierigkeiten auftreten, dann müßte man ausführlichere Methoden, wie sie in (20) und (21) beschrieben sind, versuchen.

b) Konzentration der Suspension.

Das Stokessche Gesetz ist für eine Kugel, die sich allein in einer großen Flüssigkeitsmenge bewegt, abgeleitet. In zu stark konzentrierten Suspensionen sind die Teilchen einander so nahe, daß sie sich gegenseitig beeinflussen und Stokes' Gesetz ungültig machen. Versuche mit verschiedenen Konzentrationen ergaben, daß in Suspensionen, die bis zu 50 g Boden pro Liter enthalten, kein Einfluß der Konzentration beobachtet werden konnte. Für sandige Böden, aus denen ein großer Teil der Körner, in den ersten Minuten ausfällt, würde eine Konzentration bis zu 100 g pro Liter zulässig sein; s. Weatherby [19].

c) Notwendige Genauigkeit der spezifischen Gewichtsbestimmung.

Der Einfluß eines Fehlers im spezifischen Gewicht des suspendierten Materials auf den errechneten Durchmesser kann aus Gl. (2) abgeleitet werden.

Ein zulässiger Unterschied von $\pm 2\%$ im Korndurchmesser wirkt auf das spezifische Gewicht wie folgt zurück:

$$\begin{aligned} s' &= (1 \pm 0,04) \cdot s \mp 0,04. \\ \text{Für } s &= 2,70 \\ s' &= 2,70 \pm 0,07 = 2,77 \text{ oder } 2,63. \end{aligned}$$

Der Einfluß des spezifischen Gewichts auf die Prozentwerte $W\%$ kann mit Hilfe der Gl. (18a) analysiert werden. Ein zulässiger Unterschied von 1% wird durch folgenden Fehler im spezifischen Gewicht verursacht:

$$\frac{100}{W_0} \cdot \frac{s'}{s'-1} \cdot R - \frac{100}{W_0} \cdot \frac{s}{s-1} \cdot R = \pm 1.$$

Die maximale Abweichung in s für $R = W_0$ bei Annahme von $s = 2,70$

$$100 \frac{s'}{s'-1} - 159 = \pm 1$$

und daher

$$s' = 2,67 \text{ oder } 2,72.$$

Wir schließen aus dieser Ableitung, daß es genügt, das spezifische Gewicht des Bodens mit einer Genauigkeit von $\pm 0,02$ zu kennen.

Es ist vorteilhaft, daß das Ergebnis der Schlämmanalyse eines Bodens von seinem spezifischen Gewicht nicht zu sehr beeinflusst wird, weil die meisten Böden aus Mineralen von verschiedenem spezifischen Gewicht zusammengesetzt sind, von denen für gewöhnlichen Gebrauch nur der Mittelwert bestimmt wird.

d) Notwendige Genauigkeit der Temperaturlesungen.

Fehler in den Temperaturlesungen beeinflussen sowohl die errechneten Korngrößen wie auch die Prozentwerte.

Aus Abb. 12 läßt sich ersehen, daß ein Fehler von 2°C einen Fehler von 2% in der sich ergebenden Korngröße verursacht.

Aus Gl. (18a) und Abb. 12 kann man entnehmen, daß die erforderliche Genauigkeit der Temperaturlesung zwischen $\frac{1}{2}$ und 2°C liegt.

Wir folgern daraus, daß eine Genauigkeit in den Temperaturlesungen von $\pm 0,5^\circ \text{C}$ erforderlich ist.

e) Einfluß der Störung beim Einführen und Herausnehmen von Aräometer und Thermometer. Häufigkeit der Lesungen.

Die aufrührende Wirkung beim langsamen Einführen und Herausnehmen des Aräometers ist so gering, daß man sie auch nach mehrmaliger Wiederholung nicht messen kann.

Versuche mit einer Tonsuspension zeigten, daß die Ablesung sich infolge fünfmal wiederholten sorgfältigen Einführens und Herausnehmens des Aräometers nicht wahrnehmbar änderte. Die Kornverteilung dieser Suspension war von einer solchen Feinheit, daß sich innerhalb von einigen Minuten die Aräometerlesung nicht meßbar änderte. Auch besaß diese Suspension zur Zeit der Versuche ein verhältnismäßig starkes Gefälle in der Dichteverteilung.

Beobachtungen mit einer durchsichtigen Suspension von Teilchen mit gleichem spezifischen Gewicht wie Wasser, zeigten deutlich, daß bei einer sorgfältigen Einführung der Instrumente keine Wirbelbildung erfolgt, und daß nach der Entnahme sich die Teilchen wieder ungefähr in derselben Höhenlage und relativen Stellung befinden.

Es empfiehlt sich, die Einführung und Entnahme der Instrumente mit stetiger Hand so langsam durchzuführen, daß für jeden Vorgang

etwa zehn Sekunden gebraucht werden. Auch ist es ratsam, zu häufige Lesungen zu unterlassen. Zum Auftragen der Korngrößenkurve sind im allgemeinen etwa acht Punkte ausreichend. Die Zeitpunkte für die Ablesungen sollten so gewählt werden, daß die entsprechenden Punkte bei logarithmischer Auftragung der Kornverteilungskurve etwa gleichweit voneinander liegen. Eine Reihe von Zeitabschnitten, die dieser Forderung genügen, kann aus Abb. 8 entnommen werden.

f) Meniskuskorrektur; Genauigkeit der Ablesungen und der Eichung des Aräometers.

Aräometer werden auf die Höhe des Spiegels der Flüssigkeit geeicht. Bodensuspensionen sind nicht durchsichtig genug, um eine genaue Lesung an der Oberfläche zu ermöglichen. Deshalb muß die Ablesung am oberen Rand des Meniskus vorgenommen und der Höhenunterschied der Lesung zugezählt werden. Dieser Unterschied ist eine Konstante des Aräometers. Sie sollte in reinem Wasser bestimmt werden, indem man das Auge knapp unter den Flüssigkeitsspiegel hält und es dann langsam hebt bis die Oberfläche zu einer geraden Linie wird. Dort, wo diese Linie die Aräometerskala schneidet, liegt die richtige Aräometerlesung (18). Sodann wird eine Lesung dort gemacht, wo der voll ausgebildete Meniskus den Schaft berührt. Der Unterschied zwischen diesen zwei Lesungen ist die Konstante C , oder c , die zweckmäßig auf dem für dieses Aräometer bestimmte Nomogramm (Abb. 11) vermerkt werden sollte.

Ein fettiger Schaft behindert teilweise oder gänzlich die Ausbildung des Meniskus. Deshalb sollte das Aräometer ab und zu mit Seife oder Alkohol gewaschen und danach sofort mit einem weichen Leinentuch (18) getrocknet werden. Das Aräometer soll langsam in die Suspension eingetaucht werden, bis etwas unter den Punkt wo es frei schwimmt, um die rasche Ausbildung des Meniskus zu erleichtern.

Die Eichung der durch Firmen für wissenschaftliche Instrumente hergestellten Aräometer ist in der Regel sehr genau. Trotzdem scheint es ratsam, die Eichung der Aräometer, die man für Schlämmanalysen bestellt, zu prüfen.

Aräometer verschiedener Firmen, die der Verfasser verwendet, zeigen eine maximale Abweichung von $\pm 0,0002$ in der Dichteablesung von der wirklichen Dichte. Das ist dieselbe Größenordnung wie die Genauigkeit der Aräometerablesung. Der entsprechende Fehler in den Prozentwerten liegt zwischen $\pm 0,5$ und $\pm 1,0\%$, abhängig von der Menge W_0 .

g) Einfluß einer ungenauen Bestimmung des Volumsmittelpunktes der Aräometerbirne.

Die reduzierte Tiefe H_R , auf die sich die Berechnung der Korngröße gründet, wird mittels Gl. (13) berechnet. Jede Ungenauigkeit in der

Bestimmung des Volumsmittelpunktes des Aräometers wird einen gleichen Unterschied in der reduzierten Tiefe verursachen. Aus der graphischen Lösung des Gesetzes von Stokes in Abb. 11 kann abgeleitet werden, daß ein Unterschied von $\pm 0,5$ cm in der reduzierten Tiefe eine Abweichung des Korndurchmessers von 1—3% verursacht. Dieser Unterschied ist am größten zu Beginn des Versuchs und verringert sich mit abnehmenden Aräometerlesungen. Daraus folgern wir, daß der Volumsmittelpunkt mit einer Genauigkeit von mindestens $\pm 0,5$ cm bestimmt werden sollte.

h) Einfluß von Luft im Wasser und von suspendierten oder an Bodenkörnern haftenden Luftblasen.

Das heftige Schütteln der Suspension vor dem Versuch bringt einen engen Kontakt der Luft mit dem Wasser und den Bodenkörnern mit sich.

Der Einfluß von Luft, die im Wasser gelöst ist, auf das spezifische Gewicht des Wassers, ist unbedeutend. Nach den „Physikalisch-Chemischen Tabellen“ von Landolt-Börnstein sinkt das spezifische Gewicht des Wassers bei 20° C durch aufgelöste Luft um $4 \cdot 10^{-7}$.

Luftblasen heften sich leicht an nicht vollkommen durchfeuchtete Bodenkörner. Luft kann auch in Kornanhäufungen, welche nicht ganz zerteilt wurden, enthalten sein. Eine vollkommene mechanische Zerkleinerung des Bodens schließt diesen Fehler fast ganz aus.

i) Einfluß von Temperaturänderungen und ungleichmäßiger Erwärmung.

Temperaturänderungen während des Versuchs äußern sich in kleinen Änderungen der Fallgeschwindigkeit der einzelnen Körner. Wenn die Temperaturänderung während des ganzen Versuchs ungefähr gleichmäßig stattfindet, kann man die Korngrößenbestimmung auf das arithmetische Mittel der Temperatur zu Beginn des Versuchs und zur Zeit der Aräometerablesung gründen. Für ungleichmäßige Temperaturänderungen hat man das Mittel während dieser Periode zu schätzen. Das Temperaturmittel müßte innerhalb $\pm 2^\circ$ C richtig sein, wenn keine größere Abweichung als 2% im Korndurchmesser entstehen soll. Diese Forderung wird in der Regel erfüllt sein, so lange der größte Temperaturunterschied nicht mehr als 8° C ist. Für größere Unterschiede, die z. B. in Feld-Laboratorien vorkommen können, ist es ratsam, den Schlammzylinder in einen mit Wasser gefüllten Behälter (Wasserbad) zu stellen.

Ungleichmäßige Erwärmung (Sonnenschein, Nähe eines Ofens) hat störende Wirkung infolge auftretender Konvektionströmungen. Wo die Gefahr ungleichmäßiger Erwärmung nicht vermieden werden kann, sollte man den Schlammzylinder auch zweckmäßig in ein Wasserbad stellen.

j) Verdunstung.

Wenn von zwei gleichartigen Bodensuspensionen eine der Verdunstung ausgesetzt ist und die andre nicht, wird die Dichte zu jeder Zeit in derselben Höhenlage in beiden Fällen gleich groß sein. Das Aräometer wird jedoch in jener der Verdunstung ausgesetzten Suspension tiefer einsinken und deshalb eine größere Dichte angeben. Dieser Fehler kann leicht vermieden werden, indem man das verdunstete Wasser ersetzt. Man muß dabei achten, daß dieses Wasser dieselbe Temperatur hat wie die Suspension.

Solange die Verdunstungshöhe kleiner als 0,5 cm ist, wird ein Nachfüllen nicht nötig sein. Im allgemeinen ist es möglich unter diesem Wert zu bleiben, indem man in den Pausen zwischen den Lesungen den Schlammzylinder abdeckt.

k) Einfluß der Temperatur des Aräometers und der Feuchtigkeit auf den Schaft.

Die Gewohnheit, das Aräometer abzuspülen und dann an der Luft trocknen zu lassen, hat den ernstlichen Nachteil, daß das verdunstende Wasser das Aräometer abkühlt. Wenn die Temperatur des Aräometers und der Suspension sehr verschieden sind, ergibt sich daraus ein merkbarer Fehler.

Ein, durch Waschen nach erfolgter Ablesung, feuchter Schaft des Aräometers ist schwerer als ein trockener Schaft und verursacht dadurch eine merkbare Verringerung der Aräometerlesung.

Beide Wirkungen werden vermieden, wenn man das Aräometer mit einem trockenen und reinen Tuch abreibt.

Ein nasser Schaft kann auch verursacht sein durch zu tiefes Eintauchen in die Suspension beim Einführen des Instruments. Bei Anwendung einiger Sorgfalt kann dies jedoch vermieden werden.

V. Versuchsvorgang.

Bei der Anwendung des Aräometers für die Schlämmanalyse von Böden hat sich vielfach eine Methode eingebürgert, nach der die Ablesungen nach konstanten Zeitabschnitten zur Berechnung der Schluff- und Tonfraktionen, oder anderer gewünschter Korngrößen, verwendet werden. Um die Größe des durch eine solche Näherungsmethode verursachten Fehlers zu zeigen, sind in der folgenden Tabelle die Beziehungen zwischen Zeit und Korngröße für drei verschiedene Fälle angegeben. Der Vergleich ist für ein Aräometer durchgeführt, das in Gramm Boden je Liter bei 67° F, nach Prof. Bouyoucos, geeicht ist. Fall „A“: Mittlerer Boden, $s = 2,67$, $T = 25^\circ \text{C}$.

Aräometerlesung schwankte zwischen 50 und 0.

Fall „B“: Boden, der viel groben Schluff und fast keinen Ton enthält.
 $s = 2,4$, $T = 15^{\circ}\text{C}$.

Aräometerlesung lag zwischen 10 und 0.

Fall „C“: Boden, der viel Ton und fast keinen groben Schluff enthält.

$s = 3,0$, $T = 30^{\circ}\text{C}$.

Aräometerlesung lag zwischen 50 und 40.

Aus der graphischen Darstellung in Abb. 8 kann man feststellen, zu welcher Zeit die Lesungen stattfinden müßten, um beispielsweise für jeden dieser drei Böden die Fraktionen kleiner als 0,05 mm und 0,005 mm zu erhalten. Die sich ergebenden Zeiten sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Verflossene Zeit	Korndurchmesser in mm		
	A	B	C
30 Sek.	0,050	0,085	0,043
1 Min.	0,037	0,061	0,031
2 „	0,027	0,043	0,022
5 „	0,018	0,027	0,014
15 „	0,011	0,016	0,0082
45 „	0,0068	0,0092	0,0059
2 Std.	0,0044	0,0057	0,0030
5 „	0,0029	0,0036	0,0019

Diese beiden Tafeln und Abb. 8 beweisen, daß es nicht möglich ist, die Schluff- und Tonfraktionen lediglich durch Ablesen des Aräometers nach bestimmten Zeiten zu ermitteln. Die in Abb. 8 enthaltenen Beziehungen gelten überdies nur für das verwendete Aräometer. Für ein Aräometer mit anderen Dimensionen können diese Beziehungen wieder ganz verschieden sein.

Fraktion kleiner als	Lesung sollte stattfinden nach		
	A	B	C
0,05 mm	30 Sek.	88 Sek.	22 Sek.
0,005 „	90 Min.	155 Min.	44 Min.

Aus diesen Überlegungen muß man schließen, daß es auch nicht als Näherungsmethode zulässig ist, jedem Zeitabschnitt eine bestimmte Korngröße eindeutig zuzuordnen. Da eine genaue Auswertung der beobachteten Größen mit Hilfe der Nomogramme sehr wenig Zeit erfordert, ist die Anwendung solcher grober Näherungsmethoden nicht gerechtfertigt.

a) Einrichtung für die Aräometeranalyse von Böden.

Ein Dichtearäometer, bei $20^{\circ}/20^{\circ}\text{C}$ geeicht, mit einer Genauigkeit von $\pm 0,0002$ und einem Bereich von 0,995—1,030; seine Dimensionen sollen ungefähr mit den in Abb. 18a angegebenen übereinstimmen.

Zur Abkürzung der Versuchszeit bei sehr feinkörnigen Böden und zur Erreichung einer wünschenswerten Genauigkeit der Ablesungen bei sehr schwachen Suspensionen, empfiehlt sich auch die Anschaffung eines Aräometers vom Typus Abb. 18b, mit dem der Verfasser sehr gute Erfahrungen gemacht hat.

Ein Thermometer mit einer Mindestgenauigkeit von $0,5^{\circ}\text{C}$.

Ein Glaszylinder mit ca. 6 cm inneren Durchmesser und etwa 45 cm

Höhe, mit einer Marke bei genau 1000 cm^3 . Wenn mehrere Böden zugleich untersucht werden sollen, benötigt man die entsprechende Anzahl von Schlammzylindern.

Eine Stoppuhr; Porzellanschalen; ein Spachtel; eine zweckmäßig mit einem Gummiballon betriebene Spritzflasche; Wasserglaslösung in geeigneter Konzentration.

Destilliertes Wasser. (Gewöhnliches abgestandenes Wasser kann verwandt werden, falls frei von Kalk und anderen Elektrolyten.)

Ein elektrischer „Drink-mixer“ oder irgendein anderer wirksamer Rührapparat.

Ein Trockenofen mit thermostatischer Regelung.

Ein Wasserbad mit konstanter Temperatur, falls starke Temperaturschwankungen es erforderlich machen.

Eine Waage mit einer Wägekapaazität von 500 g oder mehr und einer Genauigkeit von 0,05 g.

Für jedes Aräometer eine nomographische Tafel der Abb. 11, mit der dem Instrument entsprechenden R -, r -Skala eingezeichnet.

Eine graphische Lösung der Gl. (17a) für die Temperaturkorrektion m , nach der Art wie sie in Abb. 12 für zwei verschiedene Normaltemperaturen angegeben ist.

b) Analyse feinkörniger Böden.

Die Kornverteilungskurve feinkörniger Böden, die weniger als etwa 10% Teilchen größer als 0,2 mm enthalten, kann direkt durch eine Aräometeranalyse bestimmt werden.

Das genaue Trockengewicht der Probe in der Suspension kann vor oder nach dem Versuch bestimmt werden. Vom Standpunkt der Ersparnis an Arbeit und Zeit ist es empfehlenswert, die Probe vor dem Versuch zu trocknen und zu wiegen. Andererseits sind Böden, die einen beträchtlichen Prozentsatz kolloidalen Tones enthalten, plastische Böden, aus dem getrockneten Zustand heraus schwieriger zu zerteilen, als mit dem natürlichen Wassergehalt. Solche Bodenproben sollten, wenn möglich, im ungestörten Zustand entnommen und ohne die Probe erst zu trocknen, untersucht werden. Um ungefähr das gewünschte Trockengewicht W_0 des Bodens in der Suspension zu haben, ist es nötig, den Wassergehalt der Probe angenähert zu kennen. Wenn W' das Gewicht einer feuchten Probe ist und W'_0 ihr Trockengewicht, kann die notwendige Menge W aus der folgenden Formel berechnet werden:

$$W = \frac{W'}{W'_0} \cdot W_0.$$

Für Tone, die sehr wenig oder keinen Sand enthalten, sollte das Trockengewicht des Bodens in der Suspension etwa 30–40 g betragen:

Bei sandigen Böden wird ein großer Teil der Probe innerhalb der ersten Minuten absinken und deshalb soll das Trockengewicht je nach dem Sandgehalt des Bodens von 50—100 g betragen.

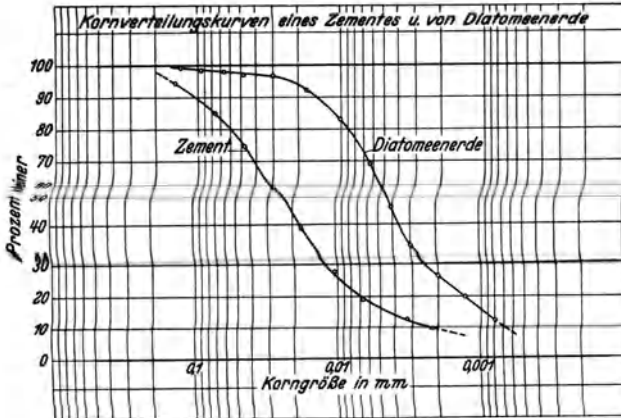


Abb. 13. Kornverteilungskurven von Zement und Diatomeenerde.

Abb. 13. Kornverteilungskurven von Zement und Diatomeenerde.

Das zur Dispersion der Probe verwandte Wasser sollte schon den Zusatz des gewählten chemischen Behandlungsmittels enthalten. Deshalb empfiehlt es sich, im Schlammzylinder eine Lösung dieses Zusatzes

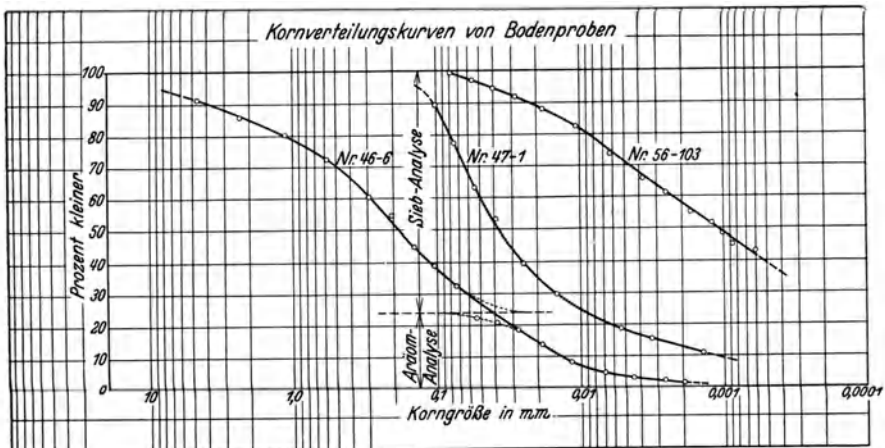


Abb. 14. Kornverteilungskurven von 3 Bodenproben.

(gewöhnlich 5—20 cm³ Natrium-Silikat von 3° Be) und etwa 800 cm³ Wasser vorzubereiten. Ein Teil dieser Lösung wird zur Dispersion des Bodens benützt.

Die für den Versuch bestimmte Probe wird zuerst in einer Schale mit etwa 50—100 cm³ dieser Lösung gut durchgemischt. Alle Kornanhäufungen sollten gut zerkleinert werden und die ganze Mischung

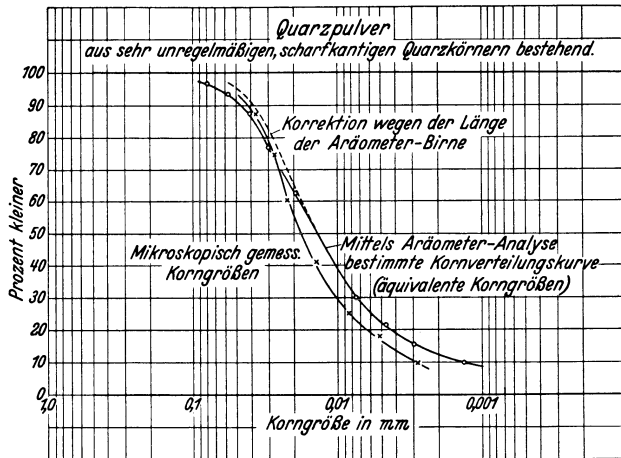


Abb. 15. Kornverteilungskurven von Quarzpulver.

eine gleichmäßige, sehr weiche Paste bilden. Für Böden mit sehr wenig Kohäsion in trockenem Zustand, ist diese mechanische Behandlung ausreichend. Böden, die kolloidalen Ton enthalten, müssen durch kräftigere

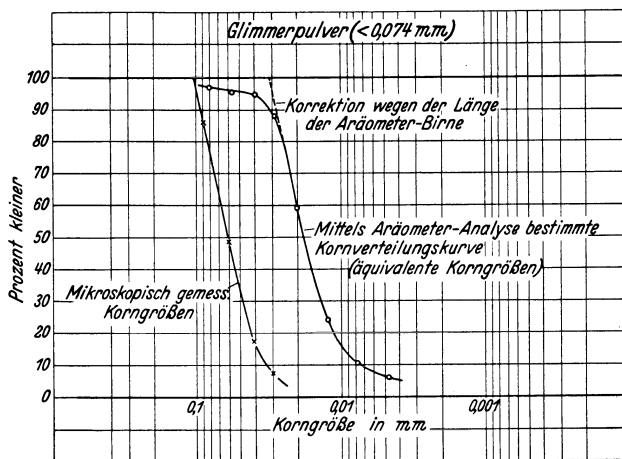


Abb. 16. Kornverteilungskurven von Glimmerpulver.

Mittel zerstreut werden, wie z. B. mit dem „Drink-mixer“ in Abb. 4 und 20. Die Bodenpaste wird in das Mischgefäß gespült und das gelöste Behandlungsmittel wird zum Auffüllen gebraucht. Die geeignete Füll-

höhe wird am besten versuchsweise festgestellt, so daß die Suspension nicht herausspritzt, wenn die Maschine läuft.

Je kleiner die Plastizität des Bodens, desto kürzer ist die zur Zerstreuung des Bodens im Apparat erforderliche Zeit. Genügend gründliche Durchmischung kann für schwach-plastische Böden in fünf Minuten, für schwere Tone in 10—20 Minuten erreicht werden. Die Suspension wird dann mit dem Rest des gelösten Behandlungsmittels in den Schlammzylinder geschüttet und mit Sorgfalt auch alles Sediment vom Boden der Schale mit Hilfe einer Spritzflasche herausgespült.

Nun wird destilliertes Wasser zugesetzt, um den Spiegel der Suspension im Schlammzylinder bis auf 1000 cm³ zu bringen. Dann wird die Suspension heftig eine Minute lang geschüttelt, wobei man mit der linken Handfläche die Öffnung des Zylinders abschließt und ihn wiederholt von unten nach oben dreht. Wenn die Suspension nach dem Übergießen aus dem Becher in den Zylinder einige Zeit gestanden hat, wird mehr als eine Minute heftigen Schüttelns nötig sein, um den ganzen Niederschlag auf dem Boden des Zylinders in gleichmäßige Suspension zu verwandeln. In manchen Fällen muß man die Ablagerung vor dem Schütteln mit einem langen Glasstab aufrühren. Sobald der Zylinder auf den Tisch gestellt ist, wird eine Stoppuhr in Gang gesetzt und das Aräometer langsam in die Flüssigkeit eingetaucht, und zwar etwas über die Stelle, bei der die Lesung erwartet wird; dann läßt man es los, so daß es frei schwimmen kann. Einführen und Herausnehmen des Aräometers soll sorgfältig geschehen, wobei man für jede Handlung etwa 5—10 Sekunden aufwenden soll.

Aräometerablesungen werden nach Verlauf von einer halben Minute, einer und zwei Minuten gemacht. Dann wird das Aräometer vorsichtig herausgenommen, abgespült und mit einem Leinenlappen abgetrocknet¹. Das Instrument wird wieder rechtzeitig eingeführt, um eine Lesung nach fünf Minuten zu erhalten. Nach dieser Ablesung wird es sofort wieder herausgenommen, abgespült und abgerieben. Nach der Fünfminutenlesung wird das Aräometer erst wieder eingesetzt für Lesungen nach Verlauf von 15, 45 Minuten, zwei und fünf Stunden und dann ein- oder zweimal täglich. Je nach der Art des Bodens und dem Zweck der Analyse kann der Versuch bis zu beliebiger Zeit weitergeführt werden.

Die vorgeschlagenen Aräometerlesungen nach 0,5, 1,0, 2, 5, 15, 45, 120 und 300 Minuten sind so gewählt, daß sie mit einer kleinsten Anzahl von Punkten das ganze Gebiet von 0,07 mm bis 0,002 mm Korndurchmesser umfaßt. Aus Abb. 14 und 15 sieht man, daß die Durchmesser, die mit diesen Zeitlesungen übereinstimmen, ziemlich gleich abgestuft

¹ Zwischen den Lesungen kann man auch das Instrument in einem Standglas mit reinem Wasser frei schwimmen lassen.

sind, außer den drei ersten Punkten, die näher zusammenliegen als die anderen.

Es ist ratsam, aber nicht nötig, an diesen Zeitabständen festzuhalten. Die Temperatur der Suspension sollte einmal während der ersten 15 Minuten des Versuchs, und dann nach jeder folgenden Aräometerlesung gemessen werden.

Wenn das Trockengewicht der Probe nicht vor Versuchsbeginn bestimmt wurde, muß man die gesamte Suspension nach Beendigung des Versuches nochmals aufrühren und in eine große Eindampfschale übertragen, um sie über einem Wasserbad zu verdampfen und anschließend in einem Trockenofen bei 105° C während mindestens fünf Stunden zu trocknen. Dann wird das Gewicht der Schale plus trockener Probe und das der leeren Schale bis auf 0,1 g genau bestimmt.

Temperatur ° C	Zeit	Verflossene Zeit min : sec	$R =$ $R' + C$	$\frac{D}{\text{Aus Abb. 11}}$ mm	$\frac{R + m}{\text{Aus Abb. 12}}$	W%
—	11 : 25	0	—	—	—	—
—	—	0 : 15	21,0	0,103	22,4	89,6
—	—	0 : 30	18,0	0,075	19,4	77,6
—	—	1 : 00	14,5	0,054	15,9	63,6
23,7	—	2 : 00	12,0	0,038	13,4	53,6
23,7	—	5 : 00	8,5	0,025	9,9	39,6
23,6	—	15 : 00	6,1	0,0144	7,5	30,0
—	—	45 : 00	4,6	0,0086	6,0	24,0
23,4	—	120 : 00	3,2	0,0053	4,6	18,4
23,4	16 : 55	330 : 00	2,5	0,0032	3,9	15,6
23,3	9 : 15	22 Stdn.	1,4	0,0014	2,8	11,2

Um die Menge Wasser, die verdampft werden muß, zu verringern, kann man der Suspension etwas Salzsäure zufügen und mit einem Glasstab umrühren. Nach einigen Stunden wird die suspendierte Masse koaguliert und am Boden abgesetzt sein. Die durchsichtige Flüssigkeit wird bis auf eine kleine Menge, welche zum Aufrühren des abgesetzten Bodens dient, abgesaugt. Der Zylinder ist stets gründlich auszuspülen, um jeden Materialverlust zu vermeiden.

Ein typisches Beispiel für die Auswertung der beobachteten Daten ist in der obenstehenden Tabelle gegeben, die auch alle anderen Angaben betreffend der Aräometeranalyse dieses Bodens enthält.

Aräometeranalyse des Bodens Nr. 47—1.

Instrument: Dichtearäometer Nr. 5937; Meniskuskorrektion $C = 1,0$; geeicht bei 15,6° C.

Trockengewicht der Probe 40,0 g, bestimmt vor dem Versuch.

Probe fünf Minuten lang im elektrischen „Drink-mixer“ zerstreut.

Chemische Behandlung: $\frac{1}{2}\text{cm}^3$ von 42° Bé Wasserglaslösung.

Spezifisches Gewicht des Bodens $s = 2,67$.

$$W\% = \frac{100 \cdot s}{s-1} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot (R + m) = 4,0 \cdot (R + m).$$

Die ersten vier Rubriken enthalten die beobachteten Werte; die fünfte enthält die Korngrößen, die durch die graphische Lösung des Stokesschen Gesetzes aus Abb. 11 bestimmt wurden. In der sechsten Spalte sind die Aräometerlesungen, nachdem sie der Temperaturkorrektur mit Hilfe von Abb. 12 unterzogen wurden, eingesetzt, und in der letzten Spalte sind die Prozentwerte nach Gl. (18a) ausgerechnet, indem die korrigierten Lesungen $(R + m)$ mit der Konstanten $\frac{100 \cdot s}{s-1} \cdot \frac{1}{W_0} = 4,0$ multipliziert wurden. Es ist eigentlich nicht nötig die Werte $(R + m)$ in einer besonderen Spalte niederzuschreiben. Die Korrektur m kann R zugefügt und sofort mit 4,0 multipliziert werden, so daß die Größen $W\%$ durch eine einfache Multiplikation aus den Beobachtungswerten erhalten werden.

Manche Bodenphysiker ziehen es vor, die Aräometerlesung R' zu notieren und die Meniskuskorrektur C der Temperaturkorrektur m zuzuzählen.

Das Versuchsergebnis sollte immer auf semi-logarithmischem Papier, wie in Abb. 14 dargestellt, aufgetragen werden.

c) Kombinierte Sieb- und Aräometeranalyse gemischtkörniger Böden.

Böden, die eine nennenswerte Menge Material unter 200 und über 65 Maschen¹ enthalten, erfordern die Anwendung der Siebenanalyse für die groben Fraktionen und der Schlämmanalyse für die feinen Fraktionen. Diese „kombinierte mechanische Analyse“, wie sie bei gemeinsamer Verwendung von Sieb und Aräometer genannt wird, kann auf verschiedene Weise vorgenommen werden.

Die Menge des für den Versuch benötigten Bodens hängt von seinem Gehalt an feinem Material ab. Die Probe sollte nicht weniger als 20 g und nicht mehr als 50 g Material enthalten, das durch 100 Maschen¹ geht. Die erforderliche Menge Boden kann nach einiger Erfahrung ohne Schwierigkeit geschätzt werden. Sonst wird vorgeschlagen 100 g getrockneten Boden durch ein 100-Maschensieb zu waschen und das

¹ Anzahl der Siebmaschen je Zoll (USA. normalisierter Siebsatz); es entsprechen 0,074, 0,147 und 0,208 mm Korndurchmesser 65, 100 bzw. 200 maschigen Sieben.

Trockengewicht des Siebrückstandes zu bestimmen. Daraus ist die zur kombinierten mechanischen Analyse erforderliche Bodenmenge leicht zu errechnen.

Wenn nicht mehr als 50 % des Bodens auf dem 100-Maschensieb zurückbleiben, ist es unnötig, die grobe und feine Fraktion vor dem Versuch zu trennen.

Die Dispersion und die Aräometeranalyse der Probe werden in derselben Weise durchgeführt, wie im vorhergehenden Abschnitt für die feinkörnigen Böden beschrieben wurde. Wenn das Gesamtrockgewicht der Probe nicht vor dem Versuch bestimmt wurde, muß man die Probe nach dem Versuch eindampfen und trocknen. Der Boden im Schlammzylinder oder die trockene Probe wird durch ein 100- oder 150 Maschensieb gespült und der zurückbleibende Sand wird getrocknet und einer Siebanalyse unterzogen. Die prozentualen Werte werden unter Berücksichtigung des Gesamtgewichts der ursprünglichen Probe errechnet.

Böden, die viel grobes Material enthalten, sollten vor Ausführung der Aräometeranalyse durch Waschen in grobe und feine Teile getrennt werden, was ohne oder mit Hilfe eines Siebes geschehen kann.

Trennung durch Waschen ohne Gebrauch eines Siebes.

Die richtige Menge des Dispersionsmittels (z. B. Wasserglas) wird in 900 cm³ Wasser aufgelöst. Diese Lösung wird zur Dispersion des Bodens und für den ganzen Waschvorgang verwendet.

Zuerst wird der Boden in einer großen Schale unter Verwendung von etwa 100 cm³ der Lösung zerteilt. Wenn die Probe vollkommen zerkleinert und gründlich gemischt ist, wird die über dem abgesetzten Boden stehende Suspension mit einem großen Löffel in den Schlammzylinder gefüllt. Während dieses Vorganges soll die Schale leicht bewegt werden um ein Ausfällen der feinen Körner zu vermeiden. Der Löffel darf dabei nicht die Ablagerung am Boden der Schale berühren, und man muß daher einen Teil der Suspension im Gefäß lassen. Um Materialverlust zu vermeiden ist es ratsam den Zylinder in ein Gefäß mit flachen Boden zu stellen und während dem Abschöpfen die Schale neben dem oberen Rand des Zylinders zu halten. Eine weitere Erleichterung ergibt sich durch das Einsetzen eines großen Trichters in den Schlammzylinder.

Nach dem Abschöpfen des größten Teils der Suspension wird wieder etwa 100 cm³ der Lösung zugefügt, die zurückgebliebene Probe nochmals gründlich gemischt, die Suspension wieder mit dem Löffel abgeschöpft und der ganze Vorgang so oft wiederholt bis die Suspension etwas durchscheinend wird.

Die Menge Wasser zum Waschen des Bodens ist auf 900 cm³ beschränkt, weil die Suspension für die Aräometeranalyse ein Volumen

von 1000 cm³ haben soll. Deshalb ist Sparsamkeit mit dem Waschwasser, welches für den wiederholten Waschvorgang gebraucht wird, erforderlich.

Der grobe Rückstand wird getrocknet und einer Siebanalyse unterzogen. Die Suspension, welche die feinen Teile enthält, wird, falls nicht schon geschehen, in den Schlämmsylinder gefüllt, ihr Volumen auf 1000 cm³ gebracht und die Aräometeranalyse begonnen.

Trennung mit Hilfe eines Siebes.

Wie zuvor wird das Waschwasser vorbereitet, indem man das Dispersionsmittel in etwa 900 cm³ Wasser löst. Etwas von dieser Lösung wird zum Zerkleinern und gründlichen Mischen des Bodens in einer Eindampfschale verwendet.

Alle Steine sollten mit den Fingern entfernt und in eine besondere Schale gelegt werden. Dies ist nötig, um eine Beschädigung der feinen Maschen des Siebes zu vermeiden.

Ein 200-Maschensieb¹, etwa 15 cm im Durchmesser, wird in ein niedriges zylindrisches Gefäß gestellt, welches ca. 20 cm Durchmesser und 5 cm Höhe hat. Die von Steinen befreite Probe wird in das Sieb gebracht und die feinen Teile mit dem Waschwasser und einer kleinen weichen Bürste durchgewaschen. Falls die begrenzte Menge Waschwasser für eine gründliche Waschung nicht genügt, kann ein Teil der Suspension nochmals dazu benützt werden.

Mit der Suspension wird eine Aräometeranalyse und mit den getrockneten groben Teilen eine Siebanalyse vorgenommen.

Da die Ergebnisse beider Versuche in der graphischen Darstellung vereinigt werden, ist es nicht von Bedeutung, wenn beim Waschen die Probe nicht genau bei einer gewünschten Korngröße getrennt wird.

Das Gesamttrockengewicht wird entweder vor oder nach dem Versuch durch Zusammenzählen der Gewichte beider Fraktionen ermittelt.

Ein Beispiel für die kombinierte mechanische Analyse eines gemischtkörnigen Bodens ist in den folgenden Tabellen dargestellt.

Kombinierte Sieb- und Aräometeranalyse von Boden

Nr. 46—6.

Trennung durch Waschen ohne Sieb.

Dispersionsmittel: $\frac{1}{2}$ cm³ Natrium-Silikat 42° Be auf 900 cm³ Wasser.

Gesamte Probe, trocken, vor dem Versuch . . .	$W_0 = 160,0$ g
grobe Fraktion, trocken	121,7 g
Fraktion in Suspension, errechnet	38,3 g

¹ Siehe Fußnote S. 43.

Siebanalyse der groben Teile von Boden Nr. 46—6.

Sieb Nr.	Größe in mm <i>D</i>	Durch- gefallene Fraktion g	Durch- gefallene Fraktion + 38,3	Prozent kleiner als <i>D</i>
Total		121,7	160,0	100,0
4	4,70	108,0	146,3	91,4
8	2,36	99,5	137,8	86,0
14	1,17	90,0	128,3	80,2
28	0,59	77,9	116,2	72,6
48	0,295	58,6	96,9	60,6
65	0,208	49,0	87,3	54,6
100	0,147	34,0	72,3	45,2
150	0,104	24,1	62,4	39,0
200	0,074	13,8	52,1	32,6
Anteil in Suspension			38,3	23,9

Aräometeranalyse der feinen Fraktion von Boden Nr. 46—6.

Spezifisches Gewicht der feinen Teile $s = 2,87^1$.

Instrument: Dichtearäometer Nr. 29, geeicht bei $20^\circ/20^\circ \text{ C}$.

Meniskus-Korrektion $C = 0,8$.

$$W\% = \frac{100 \cdot s}{s - 1} \cdot \frac{1}{W_0} \cdot (R + m) = 0,96 (R + m)$$

Temp. in $^\circ \text{C}$	Zeit	Ver- flossene Zeit in Minuten <i>t</i>	Aräo- meter- Lesung <i>R'</i>	$R =$ $R' + C$	Korn- größe in mm <i>D</i>	$R + m$	$W\%$
—	2. Juli 1929						
—	9 : 27	0	—	—	—	—	—
—	—	0 : 30	21,6	22,4	0,053	23,6	22,7
—	—	1 : 00	19,8	20,6	0,038	21,8	20,9
25,9	—	2 : 00	17,6	18,4	0,027	19,6	18,8
—	—	5 : 00	12,6	13,4	0,0184	14,6	14,0
25,9	—	15 : 00	7,0	7,8	0,0115	9,0	8,6
25,9	—	45 : 00	3,3	4,1	0,0068	5,3	5,1
26,1	11 : 27	120	1,4	2,2	0,0043	3,5	3,4
26,3	14 : 27	300	+0,3	1,1	0,0027	2,4	2,3
26,5	19 : 27	600	—0,2	0,6	0,0019	2,0	1,9

Um in der obenstehenden Tabelle deutlich die drei Schritte zu zeigen, die zur Berechnung von $W\%$ führen, sind die Ablesungen R' und die errechneten Größen ($R = R' + C$) und ($R + m$) in besonderen Spalten eingetragen. Es genügt natürlich R' oder R aufzuschreiben und daraus unmittelbar den Wert $W\%$ zu berechnen.

¹ Dieser Boden ist durch Verwitterung von Glimmerschiefer entstanden, daher sein hohes spez. Gewicht.

In der Auftragung der kombinierten mechanischen Analyse in Abb. 14 sieht man, daß die Trennung durch Waschen ohne Sieb die Probe etwa bei einer Korngröße von 0,04 mm teilt. Diese kritische Größe schwankt bei verschiedenen Laboranten zwischen 0,04 und 0,06 mm. Ein kleiner Teil der Probe unter dieser kritischen Größe bleibt in der groben Fraktion zurück, während einige der größeren Körner in die feine Fraktion übertragen werden. Durch zusammenzählen beider Kurven, wie in Abb. 14 für die Probe Nr. 46—6 gezeigt, erhält man die Kornverteilungskurve der ursprünglichen, ungeteilten Probe.

d) Anwendung auf Forschungen in anderen Gebieten.

Methoden zur Bestimmung der Korngröße feinkörniger Materialien spielen in vielen Zweigen der Industrieforschung eine wichtige Rolle. In zahlreichen Fällen könnte die Aräometermethode mit großem Vorteil verwandt werden. Die Brauchbarkeit dieser Methode möge an den folgenden Beispielen gezeigt werden:

1. Zement.

Es ist bekannt, daß die Eigenschaften des Zementes unter anderem auch von seiner Kornverteilung abhängen. Wenn noch keine verlässlichen Forschungsergebnisse darüber bestehen, so ist dies darauf zurückzuführen, daß die Versuchsmethoden, welche verwandt wurden, zu beschwerlich und für Vergleichsstudien nicht genügend genau sind.

Um die Aräometermethode auf Zement anzuwenden, muß man eine Flüssigkeit finden die kein Wasser enthält und in welcher der Zement nicht koaguliert. Eine solche Flüssigkeit ist z. B. das Petroleum¹. Das handelsübliche Petroleum hat den Nachteil, daß es in seinen Eigenschaften nicht sehr beständig ist. Aus diesem Grunde ist es sehr empfehlenswert, sich für Untersuchungen dieser Art eine reichliche Menge Petroleum zu beschaffen und davon die Zähigkeit und das spezifische Gewicht bei verschiedenen Temperaturen zwischen 15 und 30° C zu ermitteln.

Da die suspendierende Flüssigkeit ein geringeres spezifisches Gewicht hat als Wasser, muß man für diesen Zweck ein Aräometer beschaffen, das für den gewünschten Dichtigkeitsbereich geeicht ist, und muß den Vorgang bei der Berechnung der *D*- und *W*%-Werte etwas abändern.

Die nomographische Lösung des Stokesschen Gesetzes, in Abb. 11, kann mit Ausnahme von den *s*- und *t*-Skalen verwendet werden. Die

¹ In leichten Petroleumarten kann auch Koagulation eintreten, die sich nach einer kürzlich veröffentlichten Arbeit des U. S. Bureau of Public Roads durch Zugabe von Oläinsäure vermeiden läßt [27].

Größe A sollte für verschiedene Temperaturen berechnet und wie in Abb. 17 gezeigt, graphisch dargestellt werden. Aus diesem Graphikon kann der A -Wert für eine bestimmte Temperatur sofort entnommen werden. Dann wird die Korngröße aus Abb. 11 in der gewöhnlichen Weise bestimmt.

Zur Ermittlung der Prozentsätze $W\%$ muß man die allgemeine Gl. (16) verwenden. Für $V = 1000 \text{ cm}^3$ wird sie

$$W\% = \frac{10^5}{W_0} \cdot \frac{s}{s - \delta_t} \cdot [r - \delta_t + \gamma_0 - 1 - r \cdot \varepsilon \cdot (t - t_0)].$$

Für das Beispiel, welches in folgender Tabelle enthalten ist, betragen

$$W_0 = 40 \text{ g}$$

$$s = 3,15$$

$$\delta_t = \text{s. Abb. 17}$$

$$t_0 = 15,6^\circ \text{C}$$

Die folgenden Werte sind praktisch konstant:

$$\frac{s}{s - \delta_t} \cdot \frac{10^5}{W_0} = 3380$$

und

$$\begin{aligned} \gamma_0 - 1 - r \cdot \varepsilon \cdot (t - t_0) \\ = -0,0011. \end{aligned}$$

Die Gleichung für $W\%$ vereinfacht sich damit zu

$$W\% = 3380 \cdot [r - \delta_t - 0,0011].$$

Falls viele Versuche ausgewertet werden müßten, würde es der Mühe wert sein, für die obige Gleichung eine nomographische

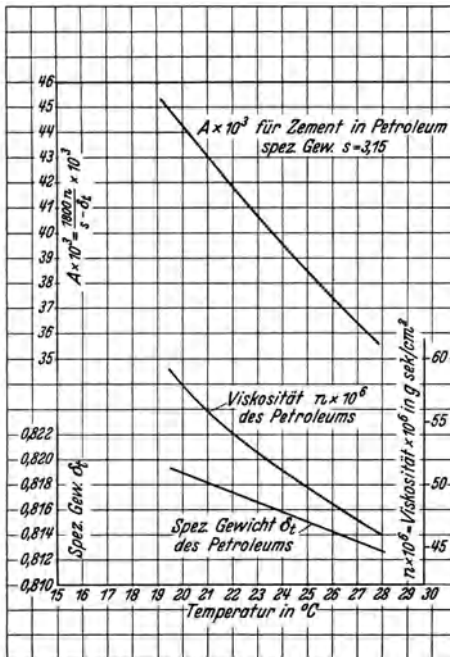


Abb. 17. Eigenschaften des Petroleums, die zur Auswertung der Aräometer-Analyse von Zement verwendet wurden.

phische Lösung auszuarbeiten. Für diesen besonderen Versuch sind die Werte $W\%$ aus den Lesungen r und der Dichte δ_t errechnet (s. Abb. 17).

Die folgende Tafel enthält die Versuchswerte und die berechneten Größen für eine Zementprobe. Die dazugehörige Kornverteilungskurve ist in Abb. 13 gezeigt.

Aräometeranalyse der Zementprobe Nr. G.

Instrument: Dichtearäometer Nr. 5838, . . . $t_0 = 15,6^\circ \text{C}$ Meniskuskorrektion für Petroleum $c = 0,0007$ Trockengewicht der Probe $W_0 = 40,0 \text{ g.}$

Physikalische Eigenschaften des Petroleums sind in Abb. 17 dargestellt.

Spezifisches Gewicht von Zement in Petroleum $s = 3,15$

$$W\% = 3380 \cdot [r - \delta_t - 0,0011] .$$

Temp. °C	Verflossene		$r =$ $r' + c$	$A \cdot 10^3$ (Abb. 17)	$\frac{D}{mm}$ (Abb. 11)	W %
	Zeit	Zeit in Minuten				
	27. April 1931					
—	9 : 35	0	—	—	—	—
—	—	0 : 30	0,8469	42,5	0,147	94,5
—	—	2 : 00	8441	42,5	0,076	85,2
21,5	—	5 : 00	8410	42,5	0,048	74,6
—	—	15 : 00	8358	42,5	0,029	57,2
21,5	—	46 : 00	8305	42,5	0,0175	39,0
21,6	—	123 : 00	8270	42,3	0,0108	27,8
21,7	—	320 : 00	8243	42,2	0,0068	18,9
20,9	9 : 30	24 Stdn.	8231	43,2	0,0033	12,8
	28. April					
22,5	10 : 20	49 Stdn.	8209	41,3	0,0022	9,6

2. Diatomeenerde.

Die Ermittlung der Kornverteilungskurve einer Probe von Diatomeenerde ist als lehrreiches Beispiel angeführt, für die Schwierigkeiten, welchen man bei der Untersuchung gewisser Materialien begegnen kann. Während das spezifische Gewicht von gewöhnlichen Böden, welche aus festen Mineralteilchen bestehen, genau bestimmt werden kann, ist es für Diatomeenerde eine variable Größe. Die Hülle von einzelnen trockenen Teilchen umschließt eine ansehnliche Menge von Luft, welche sich nicht einmal durch Kochen vollständig austreiben läßt. Im übrigen brauchen wir für die Aräometeranalyse nicht das wahre spezifische Gewicht des Materiales, sondern nur jenes der Hülle mit der eingeschlossenen Luft, welches ja auch die Fallgeschwindigkeit im Wasser beeinflusst. Es wurde festgestellt, daß dieses durchschnittliche spezifische Gewicht mit der Zeit, welche das Material im Wasser verbleibt, direkt proportional wächst. Nach 24 Stunden betrug es 2,09, nach acht Tagen 2,18 und nach 14 Tagen

2,27. Scheinbar wird ein Teil der eingeschlossenen Luft langsam ausgetrieben oder aber im Wasser gelöst. Nach mehreren Stunden Kochens stieg das spezifische Gewicht noch höher. Die gekochte Probe wurde getrocknet und wieder für eine spezifische Gewichtsbestimmung verwendet, wobei sich nach 24stündiger einfacher Wasserlagerung ein Wert von 2,10 ergab. Das eben erwähnte Experiment würde beweisen, daß die Änderung des spezifischen Gewichtes eine rein physikalische und umkehrbare Erscheinung ist.

In Übereinstimmung mit diesen Beobachtungen wurde die Auswertung der folgenden Versuchsergebnisse unter Zugrundelegung eines spezifischen Gewichtes von 2,10—2,20, proportional mit der seit Versuchsbeginn verflossenen Zeit wachsend, durchgeführt.

Aräometeranalyse von Diatomeenerde.

Instrument: Dichtearäometer Nr. 5937, $t_0 = 15,6^\circ \text{C}$.

Meniskuskorrektion $C = 1,0$.

Trockengewicht der Probe $W_0 = 30,0 \text{ g}$.

Das spezifische Gewicht $s = 2,10$ am Anfang des Versuches und mit der Zeit wachsend bis $s = 2,20$ am Ende des Versuches.

$$W\% = \frac{100 \cdot s}{s - 1} \cdot \frac{1}{W_0} (R + m) = 6,37 (R + m) \text{ bis } 6,12 (R + m).$$

Datum	Temp. °C	Zeit	Verflossene Minuten	$R =$ $R' + C$	D in mm	$R + m$	$W\%$
16. April	—	11 : 00	0	—	—	—	—
1931	—	—	0 : 15	14,3	0,134	15,6	99,3
—	—	—	0 : 30	14,2	0,095	15,5	98,7
—	—	—	1 : 00	14,1	0,067	15,4	98,0
—	23,2	—	2 : 00	14,0	0,048	15,3	97,3
—	23,2	—	5 : 00	13,9	0,030	15,2	96,7
—	23,0	—	15 : 00	13,2	0,0174	14,5	92,3
—	23,0	—	45 : 00	11,8	0,0103	13,1	83,4
—	22,6	13 : 00	2 Std.	9,7	0,0064	10,9	69,0
—	22,8	16 : 00	5 „	6,0	0,0041	7,2	45,4
—	22,2	21 : 00	10 „	4,2	0,0030	5,3	33,4
17. April	22,6	8 : 15	21,2 „	3,0	0,0020	4,2	26,3
18. April	22,8	14 : 50	51,8 „	1,9	0,0013	3,2	20,0
19. April	21,2	20 : 00	153,0 „	1,1	0,0008	2,0	12,2

Die Kornverteilungskurve dieser Probe ist in Abb. 13 dargestellt.

3. Vorschlag einer Vorrichtung zur Erzielung beliebiger Genauigkeit für besondere wissenschaftliche Arbeiten (Präzisionsaräometer).

An Einfachheit in der Handhabung und Zeit- und Arbeitsersparnis ist die Aräometeranalyse jeder anderen Methode der Schlämmasanalyse so weit überlegen, daß es sich wohl lohnt zu untersuchen inwieweit sich die Genauigkeit der Methode mit Hilfe besonderer Einrichtungen stei-

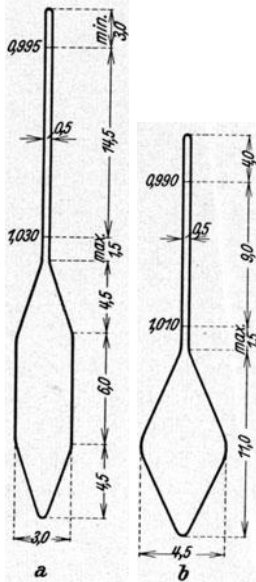


Abb. 18. Dichtearäometer für Bodenanalysen. Normaltemperatur 20° C. Die angegebenen Dimensionen sind abgerundete Werte, in cm. Sie sollen nur als ungefähre Angaben für den Hersteller dienen.

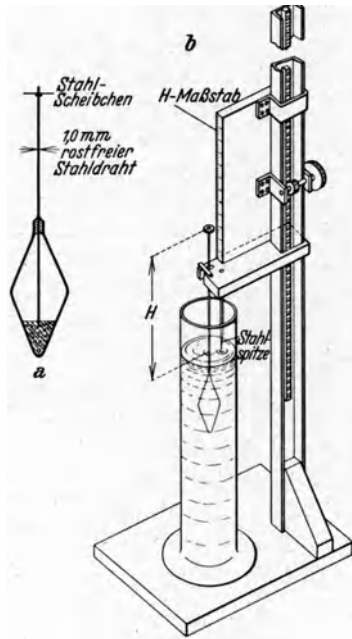


Abb. 19.
Vom Verfasser vorgeschlagenes
Präzisionsaräometer (für Unter-
suchungen, die große Genauigkeit
erfordern).

gern ließe, um sie auch für sehr schwache Konzentrationen, oder für wissenschaftliche Untersuchungen auf anderen Gebieten, wo große Genauigkeit erforderlich ist, anwenden zu können.

Die notwendige Reduktion in der Dicke des Aräometerschaftes kann durch Verwendung von rostfreiem Stahldraht oder sehr feiner Stahlröhrchen geschehen. Der Verfasser hat das in Abb. 19a dargestellte Aräometer (aus einem gebrochenen Aräometer vom Typus Abb. 18b) selbst hergestellt und es für gut brauchbar gefunden.

Da man die Dichteskala nicht in geeigneter Weise auf dem Schaft anbringen kann, hat der Verfasser die in Abb. 19 b angegebene Einrich-

tung entworfen. Der Aräometerschaft ist an seinem oberen Ende mit einem dünnen Metallscheibchen versehen, das den doppelten Zweck hat, als Tragvorrichtung zu dienen und die Ablesung der Höhenskala (indirekte Dichteablesung) zu erleichtern. In normaler Stellung hängt das Aräometer auf einem Schlitten, wo es durch eine einfache Verschlußvorrichtung vor dem Herausfallen geschützt ist. Will man eine Dichteablesung vornehmen, so schraubt man den Schlitten nach abwärts, bis das Instrument frei schwimmt, und darüber hinaus bis die am Schlitten befestigte Stahlspitze die Oberfläche der Suspension berührt. In dieser Stellung liest man die Höhe des Scheibchens über der Suspensionsoberfläche am dahinter befindlichen Maßstab ab. Dieser Höhe entspricht eine bestimmte Dichte, die man von der „Eichkurve“ des Aräometers ablesen kann. Die Eichung muß daher für die Höhenunterschiede zwischen der Suspensionsoberfläche und dem Scheibchen erfolgen.

Diese Einrichtung hat mehrere große Vorteile:

1. Die Ablesung der Höhenlage des Scheibchens an einem Maßstab ist viel genauer als die Dichteablesung am Schaft eines gewöhnlichen Aräometers am oberen Rande des Meniskus.

2. Das Einführen und Herausziehen des Aräometers geschieht viel sorgfältiger, als es mit freier Hand vorgenommen werden kann.

3. Durch die Art der Einführung werden Schwingungen des Aräometers vermieden und dadurch eine raschere Ablesung ermöglicht, was bei Präzisionsaräometern mit besonders dünnem Schaft ($d < 1,0 \text{ mm}$) von Wichtigkeit ist.

Es soll den Instrumentenfirmer überlassen bleiben zweckmäßige Formen solcher Präzisionsaräometer und dazugehöriger Ablesevorrichtungen auszuarbeiten.

VI. Zusammenfassung und kurze Anweisung für die Aräometeranalyse von Böden.

Der besondere Vorteil der Aräometermethode, im Vergleich zu anderen Verfahren der Schlämmanalyse, liegt im geringen Aufwand an Zeit und Arbeit und der einfachen und billigen Einrichtung, mit der die ganze Kornverteilungskurve bestimmt werden kann.

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt hauptsächlich von der genauen Befolgung eines sorgfältig untersuchten Verfahrens ab, welches die zahlreichen möglichen Fehler vermeidet. Wenn Wissenschaftler geneigt sind den Wert der Aräometermethode zu bezweifeln, so geschieht es auf Grund dieser Fehler, die in oberflächlicher Weise nachgeprüft, den Eindruck hinterlassen, als ob die Ergebnisse einer solchen Analyse bestenfalls als eine rohe Annäherung betrachtet werden könnten.

Die Aräometermethode ist auf viele andere Forschungsgebiete anwendbar wie z. B. in der Zementindustrie, der kolloidchemischen Industrie, der Nahrungsmittel- und Arzneiindustrie usw.

Jeder gewünschte Genauigkeitsgrad kann für wissenschaftliche Arbeiten durch Präzisionsaräometer und Suspensionen schwacher Konzentration erreicht werden, wobei der Zeit- und Arbeitsaufwand gleich gering ist, wie bei den in diesem Bericht beschriebenen Verfahren für die Aräometeranalyse von Böden.

Die allgemeinen in dieser Schrift abgeleiteten Gleichungen können auf jede Kombination von suspendiertem Material und suspendierender Flüssigkeit angewandt werden.

Kurze Versuchsbeschreibung für die Schlämmanalyse feinkörniger Böden mit Hilfe eines Aräometers.

Das Gesamtvolumen der Suspension soll genau 1000 cm^3 sein, unabhängig von der verwandten Bodenmenge. Das Trockengewicht des Bodens in der Suspension, entweder vor oder nach dem Versuch bestimmt, soll etwa 20—40 g für Tone und zwischen 50 und 100 g für sandige Böden betragen.

Man zerteile den Boden vor dem Versuch gründlich auf mechanischem Weg und benütze dabei die nötigen chemischen Zusätze, z. B. Wasserglaslösung, um eine stabile Suspension zu erhalten. Bei plastischen Böden soll die Probe vor Durchführung der mechanischen Zerteilung mindest einen Tag lang mit reichlich Wasser eingeweicht und während dieser Zeit einige Male gründlich durchgeknetet werden.

Man schüttele den Zylinder gründlich während mindestens einer Minute, indem man entweder eine Handfläche oder einen Gummistopfen als Verschuß gebraucht und den Zylinder wiederholt gänzlich umkehrt.

Man setze eine Stoppuhr in dem Augenblick in Gang, in welchem der Zylinder auf den Tisch gestellt wird und tauche das Aräometer etwas unter den Punkt ein, bei welchem es frei schwimmt und lasse es dann los. Man lasse das Aräometer während der ersten zwei Minuten in der Suspension und mache Ablesungen nach einer halben Minute, einer und zwei Minuten. Dann nehme man das Aräometer langsam heraus, spüle es in reinem Wasser ab und trockne es mit einem reinen Leinentuch. Das Aräometer soll für jede weitere Ablesung wieder in die Suspension eingeführt werden. Weitere Lesungen werden zweckmäßig nach 15 Minuten, 45 Minuten, 2 Stunden, 5 Stunden und dann ein- oder zweimal täglich vorgenommen. Einführen und Herausziehen des Aräometers muß vorsichtig geschehen, wobei jeder Vorgang etwa 5—10 Sekunden Zeit in Anspruch nehmen soll.

Vor dem Ablesen des Aräometers muß man sich vergewissern, daß

54 Zusammenfassung und kurze Anweisung für die Aräometeranalyse von Böden.

der Meniskus voll ausgebildet ist. An unregelmäßiger Form des Meniskus kann ein fettiger Schaft schuld sein. Er soll daher gelegentlich mit Seife gewaschen werden, und nur am oberen Ende berührt werden. Die Ablesung ist am oberen Rand des Meniskus vorzunehmen. Die Temperatur soll einmal während der ersten 15 Minuten und dann nach jeder folgenden Ablesung vermerkt werden.

Die beobachteten Daten und die errechneten Größen werden in einer Tabelle mit den folgenden Rubriken zusammengestellt:

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Temp.	Zeit	Verflossene Zeit	R'	$R =$ $R' + C$	D (Abb. 11)	$R + m$ (Abb. 12)	W

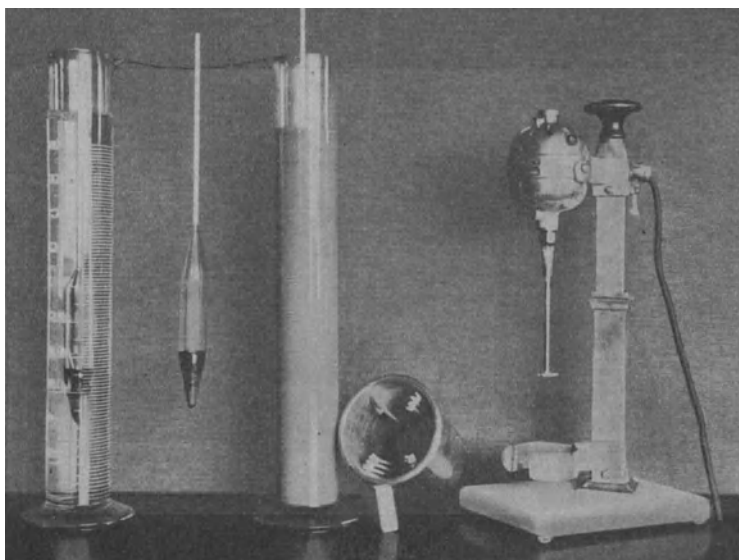


Abb. 20.

R' bedeutet die Aräometerlesung am oberen Rand des Meniskus. Die Lesung wird vorgenommen, indem man nur die Dezimalen abliest und den Dezimalpunkt zwischen die dritte und vierte Stelle setzt. Z. B. die Dichte 1,0325 wird gelassen $R' = 32,5$.

$R = R' + C$ ist die korrekte Lesung in der Höhe der Oberfläche der Suspension.

$(R + m)$ bedeutet die Aräometerlesung mit Temperaturkorrektion.

Ein erfahrener Laborant kann eine oder beide der Rubriken V und VII auslassen. Der Anfänger sollte alle Werte aufschreiben um Fehler zu vermeiden.

Die Korngröße D wird ohne Rechnung, mit Hilfe der nomographischen Lösung des Stockesschen Gesetzes ermittelt, Abb. 11.

Für jedes Aräometer ist ein eigenes Nomogramm nötig, da die R -, r -Skala von den Abmessungen des Instrumentes abhängt und nach dem Schema entworfen werden muß, wie es auf der rechten Seite von Abb. 11 angegeben ist.

Verwendung der Nomogramme: Eine Gerade durch die gegebenen s - und t -Werte ergibt die Konstante A , die sich während desselben Versuches kaum ändert. Wenn die Temperatur während des ganzen Versuches nur um einige Grade schwankt, so genügt es einen mittleren A -Wert für den ganzen Versuch zu verwenden.

Der Schnittpunkt einer geraden Linie durch die R -, r - und T -Skalen ergibt auf der v -Skala die Geschwindigkeit. Halte diesen Punkt mit dem Bleistift fest und drehe das Lineal, bis es den vorher bestimmten A -Wert schneidet. In dieser Lage gibt der Schnitt mit der D -Skala die gesuchte Korngröße an.

Die Temperaturkorrektur m wird aus einer der Skalen in Abb. 12 entnommen und der Größe R zugezählt.

Die Prozente $W\%$ werden unmittelbar aus folgender Gleichung errechnet:

$$W\% = \frac{100}{W_0} \cdot \frac{s}{s-1} \cdot (R + m)$$

Die Menge $\frac{100}{W_0} \cdot \frac{s}{s-1}$ ist für einen gegebenen Versuch konstant. Sie ist durch das Gesamtrockengewicht W_0 und das spezifische Gewicht s , der für den Versuch gebrauchten Probe bestimmt.

Literaturnachweis.

1. Oden, S.: Eine neue Methode zur mechanischen Bodenanalyse. Int. Mitt. für Bodenkunde, Vol. 5, Berlin 1915.
2. — The Size Distribution of Particles in Soils and the Experimental Methods of Obtaining Them. Soil Sci., Vol. 19, 1925.
3. Wiegner, G.: Eine neue Methode der Schlämmanalyse. Landwirtschaftliche Versuchsstationen, Vol. 91, 1918.
4. Gessner, H.: Der Wiegnerische Schlämmapparat und seine praktische Anwendung. Kolloid-Z., Vol. 38, p. 115—123, 1926.
5. — Die Schlämmanalysen, Kolloidforschung in Einzeldarstellungen. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1931.
6. Gilboy, G.: Soil Mechanics Research. Proc. of the Amer. Soc. C. E., Oktober 1931.
7. Stiny: Eine Abänderung des Wiegnerischen Schlämmverfahrens. Fortschritte der Landwirtschaft, Vol. 2, 1927.
8. Hahn: Dispersoidanalyse Vol. III of „Handbuch der Kolloidwissenschaft“, by Ostwald. Published by Steinkopff, Dresden 1928.

9. Grenness, J.: Slemningsanalyser av lerer med pelometer. Bulletin of the Norwegian „Statens råstoffkomite“, 1926.
 10. — Undersøkelser over kornstørrelser hos lerer. Teknisk Ukeblad, Nr. 4 and 5, 1928.
 11. Bouyoucos, G. J.: The Hydrometer as a New and Rapid Method for Determining the Colloidal Content of Soils. Soil Sci, Vol. 23, No. 4 and 5, 1927.
 12. — The Hydrometer Method in the Study of Soils. Soil Sci, Vol. 25, p. 365—369.
 13. — Making Mechanical Analysis of Soils in Fifteen Minutes. Soil Sci., Vol. 25, p. 473—480.
 14. — The Hydrometer Method for Making a Very Detailed Mechanical Analysis of Soils. Soil Sci., p. 233—238, 1928.
 15. Stockes, G. G.: Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Vol. 9, 1850. G. G. Stockes, Mathematical and Physical Papers, Vol. 3, Cambridge 1901.
 16. Andreasen, A. H. M.: The validity of Stokes' Law for nonspherical particles. Kolloid-Z., Nr. 48, p. 175—179, 1929.
 17. Terzaghi, K.: Erdbaumechanik. Wien, p. 39, 1925.
 18. U. S. Bureau of Standards: Circular No. 16, 1916. The Testing of Hydrometers.
 19. Weatherby, W. C.: The Hydrometer Method for Determining the Grain Size Distribution Curve of Soils. Thesis, C. E. Dept., Mass. Institute of Technology, 1929.
 20. Wiegner, C.: Method of Preparation of Soil Suspensions and Degree of Dispersion as Measured by the Wiegner-Gessner Apparatus. Soil Sci., Vol. XXIII, May 1927.
 21. Olmstead, L. B., Alexander, L. T., and Middleton, H. E.: A Pipette Method of Mechanical Analysis of Soils Based on Improved Dispersion Procedure. U. S. Dept. of Agriculture, Techn. Bull., No. 170, Jan. 1930.
 22. Olmstead, L. B., and Alexander, Lyle T.: The Mechanical Analysis of Soils Without Acid Pretreatment. Soil Research, Vol. II, Nr. 1, 1930.
 23. Crowther, E. M.: Proceedings and Papers, First Intern. Congress of Soil Sci., Vol. 1, Washington, D. C., 1928.
 24. Keen, B. A.: The Physical Properties of the Soil. The Rothamsted Monographs on Agricultural Sci., London 1931.
 25. Wintermyer, A. M., Willis, E. A., Thoreen, R. C.: Procedures for Testing Soils for the Determination of the Subgrade Soil Constants. Public Roads, October 1933.
 26. Thoreen, R. C.: Comments on the Hydrometer Method of Analysis. Public Roads, August 1933.
 27. Willis, E. A., Johnston, C. M.: Mechanical Analysis of Portland Cement by the Hydrometer Method. Public Roads, May 1934.
-