

**Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger  
anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes**

von

**Dipl.-Ing. K. Hermann Neff**

Beratender Ingenieur für Erd- und Grundbau

**Hungen / Oberhessen**

Fortdruck aus der Zeitschrift „Die Bautechnik“, 1959, Heft 11

## Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes<sup>1)</sup>

Von Dipl.-Ing. K. Hermann Neff, Hungen/Oberhessen

DK 624.131.22 Bindige Böden — DK 624.131.3 Bodenuntersuchung — DK 624.131.431.3 Wassergehalt des Bodens

### 1. Einleitung

Die Bedeutung des 1933 von O. Enslin veröffentlichten Verfahrens zur „Messung der Flüssigkeitsaufnahme von quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit“ [1], das von Endell und seinen Mitarbeitern 1938 in die Bodenmechanik eingeführt worden ist [2] und [3], wurde wieder in den letzten Jahren mehrfach hingewiesen [4] bis [9].

Unabhängig von den Veröffentlichungen [4] bis [9] sind 1956 vom Verfasser an der Versuchsanstalt für Wasser- und Grundbau der Technischen Hochschule Darmstadt (Direktor Prof. Dipl.-Ing. Detig, † 1958) Reihenuntersuchungen an mehreren Ausführungen des Enslingerätes durchgeführt worden. Ziel war dabei zunächst, das bisher eingeführte Gerät [10] zu verbessern, da die Versuchsergebnisse besonders bei den ungleichförmigen bindigen Böden — wie sie im Erd- und Grundbau Deutschlands fast durchweg vorkommen (Bild 1 a und 1 b) —

auch bei großer Sorgfalt noch stark von der Geschicklichkeit des Laboranten abhängig sind [6], [7] und [10]. Außerdem sollte neben dem bisher nur untersuchten Schlammkorn ( $\phi < 0,06$  mm) auch das vielfach enthaltene Siebkorn bis 2 mm  $\phi$  (Sand) ungleichförmiger bindiger Böden (Bild 1 a und 1 b) erfaßt werden.

Nachdem das erreicht war, konnte 1957 das Enslinverfahren neben der üblichen Kornverteilungs- und Konsistenzgrenzenbestimmung [10] als durchaus gleichwertige Standarduntersuchung zur Kennzeichnung der Bodenart ungleichförmiger bindiger anorganischer Böden bei vergleichsweise sehr geringem Arbeits- und Zeitaufwand eingeführt werden. Nach zweijähriger Erprobung in der Praxis zahlreicher Baugrunduntersuchungen wird nun über die Umstellung des Verfahrens von Enslin [1] und [10] auf die praktischen Erfordernisse des Bereiches der o. a. Bodenarten (Bild 1 a und 1 b) berichtet. Schließlich werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens an Hand von Beispielen erläutert.

<sup>1)</sup> Eingang des Manuskriptes Februar 1959.

1. Ersparnisse des zylindrischen Schachtvolumens (Bild 1), denn das neue Wasserschloß kann mit kleinerem Horizontalquerschnitt und mit geringerer Höhe ausgeführt werden.
2. Vergrößerung der Schwingungsdämpfung bei dem schon bestehenden Wasserschloß mit stehenden Schwingungen kann erzielt werden.

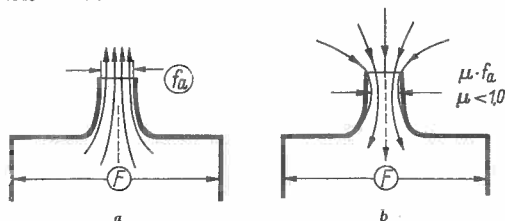


Bild 15. Optimale Form der Belüftungsöffnung

3. Ersparnisse am Volumen beim Kammerwasserschloß und Differentialwasserschloß mit Luftkissen.
4. Behinderung der Übertragung des Wasser-Druckstoßes vom Druckrohr zum Stollen, was bei stark gedrosselten Wasserschlossern der Fall ist.

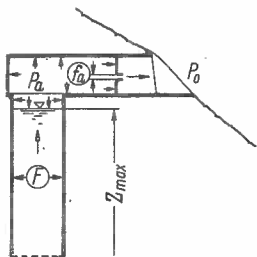


Bild 16. Oberer Teil des Schachtwasserschlosses mit Luftkissen

5. Günstigere Arbeit des Turbinen-Druckreglers als beim gedrosselten Wasserschloß.

Als Nachteile könnten erwähnt werden:

6. Die Luftströmung durch die Belüftungsöffnung kann eventuell pfeifen.
7. Der Zugang zum oberen Teil des Wasserschlosses ist erschwert im Vergleich mit anderen Wasserschloßtypen.

Die Bedeutung der Nachteile ist gegenüber der Vorteile vernachlässigbar, und deshalb ist die Ausführung der Wasserschlosser mit Luftkissen wirtschaftlich begründet.

Diese Arbeit hat sich nur auf prinzipielle Untersuchung des Luftkissens beschränkt, d. h. für den Fall, daß die Druckverluste beim Einsaugen und Ausblasen gleich sind. Die Raumerparnisse des Wasserschlosses sowie die Stabilitätsbedingungen werden noch günstiger, wenn die Druckverluste beim Lufteinsaugen durch den Bordaschen Effekt vergrößert werden (vgl. Bild 15b). Noch größere Raumerparnisse würde man erzielen, wenn der Luftraum mit Regulierventilen ausgerüstet wird, d. h. mit regulierbarer Belüftungsfläche  $f_a$  wie es schematisch auf Bild 17 dargestellt ist. In diesem Falle könnte man die Grenzwerte  $P_{a\max}$  und  $P_{a\min}$  annehmen und bei diesen Grenzwerten werden sich Auslaßventil „A“ bzw. Einlaß-

ventil „E“ öffnen. Man würde das P-V-Diagramm analytisch bestimmen, weil die schraffierte Fläche auf Bild 17 von zwei Hyperbeln begrenzt ist.

Die Schwingungs- und Stabilitätsfragen des Wasserschlosses mit Regulierventilen kann man mit den Gleichungen dieser Arbeit be-

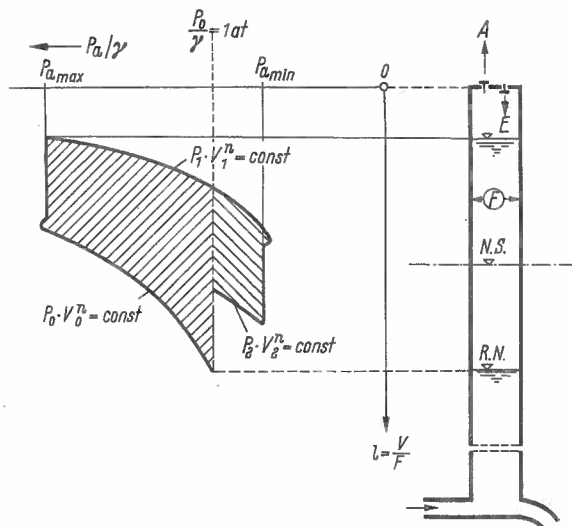


Bild 17. P-V-Diagramm des Luftraumes mit Druckregler-Ventilen

handeln. Die Ergebnisse der Untersuchung des Wasserschlosses, bei dem das Luftkissen mit Druckregler-Ventilen ausgerüstet ist, werden in einer anderen Arbeit veröffentlicht.

#### Schrifttum

- [1] Calame et Gaden: Théorie des chambres d'équilibre. Lausanne et Paris: La Concorde et Dunod 1926.
- [2] Frank und Schüller: Schwingungen in den Zuleitungs- und Ableitungskanälen von Wasserkraftanlagen. Berlin: Springer 1938.
- [3] Franković: Dimenzioniranje vodnih komora kod dovoda vode pod tlakom (Bemessung der Wasserschlosser an Druckstollen). Zagreb: 1947.
- [4] Jaeger, Ch.: Technische Hydraulik. Basel: Verlag Birkhäuser 1949.
- [5] Nusselt, W.: Technische Thermodynamik I: Grundlagen. Sammlung Götschen, Bd. 1084. Berlin: De Gruyter 1943.
- [6] Grčić, J.: Oscilacije vodostaja i tlakova u vodnoj komori kad je tlak iznad površine vode različit od atmosferskog. (Wasserspiegelschwingungen und Druckschwankungen im Wasserschloß, wenn der Druck oberhalb des Wasserspiegels sich von atmosphärischem Druck unterscheidet). Dissertation an der Technischen Hochschule Zagreb, 1956.
- [7] VDI-Durchflußmeßregeln, DIN 1952. Regeln für die Durchflußmessungen mit genormten Düsen, Blenden und Venturidüsen. Düsseldorf: 1948.

## Über die Messung der Wasseraufnahme ungleichförmiger bindiger anorganischer Bodenarten in einer neuen Ausführung des Enslingerätes<sup>1)</sup>

Von Dipl.-Ing. K. Hermann Neff, Hungen/Oberhessen

DK 624.131.22 Bindige Böden — DK 624.131.3 Bodenuntersuchung — DK 624.131.431.3 Wassergehalt des Bodens

### I. Einleitung

Auf die Bedeutung des 1933 von O. Enslin veröffentlichten Verfahrens zur „Messung der Flüssigkeitsaufnahme von quellbaren und porösen Stoffen und zur Charakterisierung der Benetzbarkeit“ [1], das von Endell und seinen Mitarbeitern 1938 in die Bodenmechanik eingeführt worden ist [2] und [3], wurde wieder in den letzten Jahren mehrfach hingewiesen [4] bis [9].

Unabhängig von den Veröffentlichungen [4] bis [9] sind 1956 vom Verfasser an der Versuchsanstalt für Wasser- und Grundbau der Technischen Hochschule Darmstadt (Direktor Prof. Dipl.-Ing. Detig, † 1958) Reihenuntersuchungen an mehreren Ausführungen des Enslingerätes durchgeführt worden. Ziel war dabei zunächst, das bisher eingeführte Gerät [10] zu verbessern, da die Versuchsergebnisse besonders bei den ungleichförmigen bindigen Böden — wie sie im Erd- und Grundbau Deutschlands fast durchweg vorkommen (Bild 1 a und 1 b) —

auch bei großer Sorgfalt noch stark von der Geschicklichkeit des Laboranten abhängig sind [6], [7] und [10]. Außerdem sollte neben dem bisher nur untersuchten Schlammkorn ( $\phi < 0,06$  mm) auch das vielfach enthaltene Siebkorn bis 2 mm  $\phi$  (Sand) ungleichförmiger bindiger Böden (Bild 1 a und 1 b) erfaßt werden.

Nachdem das erreicht war, konnte 1957 das Enslinverfahren neben der üblichen Kornverteilungs- und Konsistenzgrenzenbestimmung [10] als durchaus gleichwertige Standortuntersuchung zur Kennzeichnung der Bodenart ungleichförmiger bindiger anorganischer Böden bei vergleichsweise sehr geringem Arbeits- und Zeitaufwand eingeführt werden. Nach zweijähriger Erprobung in der Praxis zahlreicher Baugrunduntersuchungen wird nun über die Umstellung des Verfahrens von Enslin [1] und [10] auf die praktischen Erfordernisse des Bereiches der o. a. Bodenarten (Bild 1 a und 1 b) berichtet. Schließlich werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens an Hand von Beispielen erläutert.

<sup>1)</sup> Eingang des Manuskriptes Februar 1959.

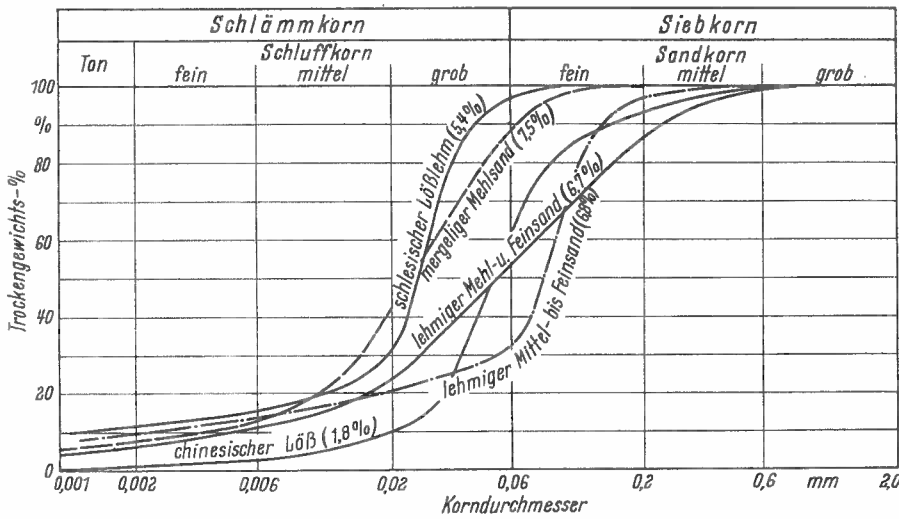


Bild 1a. Kornverteilungslinien von schwach bindigen Böden nach Tiedemann [11]. In Klammern ist die Bildsamkeitszahl  $w_{fa}$  [Trockengewichts-%] angegeben

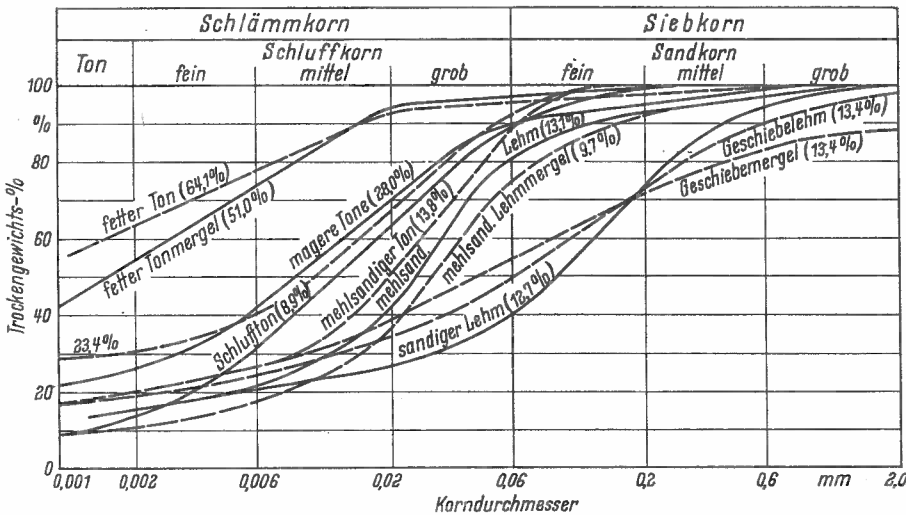


Bild 1b. Kornverteilungslinien von gut bindigen Böden nach Tiedemann [11]

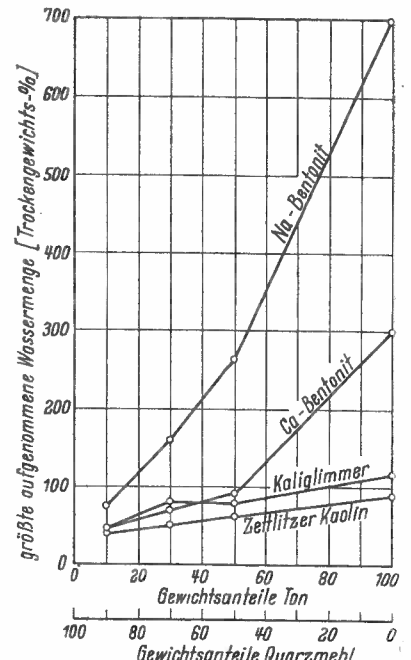


Bild 3. Abhängigkeit der maximalen Wasseraufnahme im Enslingerät von der Natur des Tonminerals und der Quarzmenge nach Endell [3]

2. Bisher eingeführtes Verfahren [10]

2.1 Gerät (Bild 2) und Versuchsdurchführung sind in [10] näher beschrieben. Wesentliches Merkmal ist, daß vor Versuchsbeginn der Kornanteil  $> 0,06 \text{ mm } \phi$  des zu untersuchenden Bodens abgeseiht wird. Das übriggebliebene Schlammkorn wird bei  $105^\circ \text{C}$  etwa 5 Stunden getrocknet und feingestoßen. Die Probenmenge ist in der Regel 0,3 g, in Ausnahmefällen bei stark quellfähigen Tonen 0,05 g.

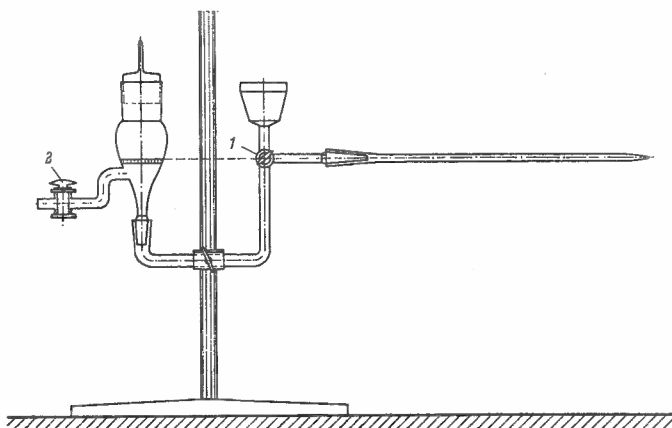


Bild 2. Enslin-Gerät nach Schultze-Muhs [10]

Fehlerquellen sind i. a.: Exakte Probenaufgabe, Genauigkeit der Probeneinwaage, Ablesegenauigkeit der Meßpipette, bei länger dauernden Versuchen auch Temperaturschwankungen und Verdunstung.

2.2 Hauptfehlerursachen bei Wasseraufnahmen bis etwa 150 Trockengewichts-%. Die Wasseraufnahme einer Schüttung feinkörnigen bindigen Bodens beruht auf [3]:

- a) der stets vorhandenen Kapillarwirkung, die z. B. bei dem nichtbindigen Quarzmehl allein maßgebend ist und
- b) dem mehr oder weniger starken Wasseranlagerungsvermögen (Quellfähigkeit [3]) der in der Probe enthaltenen Tonminerale (Bild 3).

Der stets vorhandene Anteil a) an der Wasseraufnahme liegt je nach der Feinheit des Bodens zwischen 25 und 30 Trockengewichts-%. Bei Schluffböden, deren Wasseraufnahme insgesamt nur etwa 35 bis 55 Trockengewichts-% beträgt und bei Tonböden mit Wasseraufnahmen bis etwa 150 Trockengewichts-% ist der Anteil a) (Kapillarwirkung) also verhältnismäßig groß. Bei Böden mit mehreren 100 Trockengewichts-% Wasseraufnahme (hochquellfähige Tone, Bild 3) überwiegt dagegen das Wasseranlagerungsvermögen der Tonminerale (Anteil b) so stark, daß Anteil a) praktisch nicht mehr ausschlaggebend ist.

Es läßt sich durch Versuche mit feinsandigem Schluff leicht nachweisen, daß die kapillare Wasseraufnahme der in Kegelform auf die Filterplatte des Enslingerätes geschütteten Probe stark von den jeweils vorhandenen Druckverhältnissen in der Probe beim Ansauge-

vorgang abhängt. Diese wiederum hängen ab von der Höhe und Form des Probenkegels in Verbindung mit der Genauigkeit der Meßpipettenhorizontierung bezogen auf OK-Filterplatte.

Da die aufgenommene Wassermenge auf das Trockengewicht der Probe bezogen wird, gehen bei kleinen Probemengen (z. B. 0,3 g) und niedrigen Wasseraufnahmen derartige Schwankungen der kapillaren Wasseraufnahme stark ein, so daß sich kleinere Unterschiede in der Bodenart zweier Böden im Bereich bis etwa 150 Trockengewichts-% Wasseraufnahme im Enslin-Versuch nach [10] nicht einfach feststellen lassen.

### 3. Neues Gerät, Versuchsanleitung und Kennwerte

3.1 Es lag aus den unter 2.2 genannten Gründen nahe, nicht wie bisher (Bild 2) mit Ansaughöhe  $H = 0$ , bezogen auf OK-Filterplatte, zu arbeiten, sondern eine solche Ansaughöhe  $H$  vorzugeben, daß unvermeidbare kleine Unterschiede in der Probenschütthöhe — und der damit verbundene Wechsel der Druckverhältnisse in der Probe — keinen merklichen Einfluß auf den kapillaren Wasseraufnahmeanteil mehr hatten.

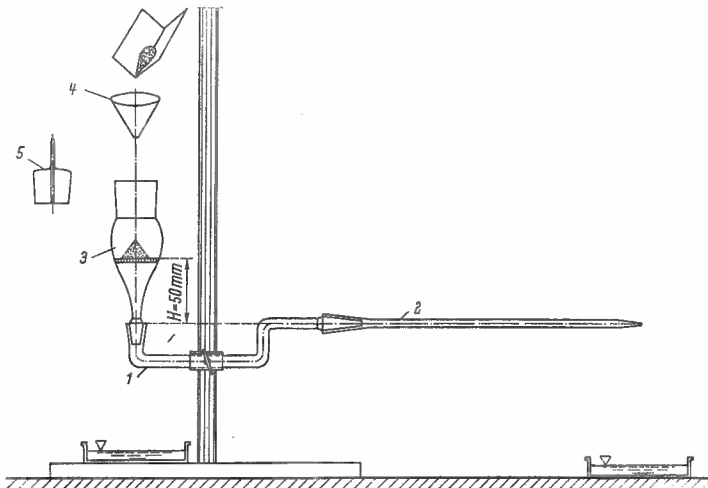


Bild 4. Enslin-Gerät nach den Untersuchungen des Verfassers

größen  $< 2 \text{ mm } \phi$  und Wasseraufnahmen bis etwa 150 Trockengewichts-% als günstigste Kombination ermittelt:

Ansaughöhe  $H = 50 \text{ mm}$  (Bild 4) und  
Probenmenge  $G_t = 1 \text{ g}$ .

Versuche an ein und demselben Boden lassen sich dann ohne besondere Mühe mit  $\pm 1$  Trockengewichts-% Genauigkeit mit dem Gerät nach Bild 4 wiederholen. Infolge der stärkeren Verdichtung der losen Kornschüttung bei  $H = 50 \text{ mm}$  gegenüber bisher  $H = 0 \text{ mm}$ , liegen die Wasseraufnahmen im neuen Gerät allgemein um rd. 5 Trockengewichts-% niedriger.

Wie sich aus dem folgenden Abschnitt ergibt, werden die Hähne (1) und (2) des alten Enslingerätes (Bild 2) bei der Untersuchung der Wasseraufnahme des genannten Bereiches ungleichförmiger bindiger Böden nicht benötigt und sind deshalb in dem neuen Gerät (Bild 4) weggelassen.

### 3.2 Versuchsanleitung

3.21 Vorbereitung der Probe. Der zu untersuchende Boden wird lufttrocken gut gemischt. Etwa 10 bis 20 g davon werden im Mörser zu Pulver zerrieben und etwa 2 Stunden bei  $105^\circ \text{C}$  im Trockenschrank getrocknet. Der pulverisierte Boden wird im Exsikkator etwa 10 Minuten abgekühlt. Mit einer Waage von mindestens  $\pm 5 \text{ kg}$  Genauigkeit werden 2 Proben von je 1,0 g Boden auf glattem, längsgeknicktem Papier (etwa  $5 \times 7 \text{ cm}$ ) abgewogen und in den Exsikkator zurückgestellt.

3.22 Vorbereitung des Gerätes (Bild 4). Das Verbindungsrohr (1) und die Meßpipette (2) werden luftblasenfrei mit Wasser gefüllt. Der Trichter (3) mit eingebauter Filterplatte wird von unten ebenfalls luftblasenfrei mit Wasser gefüllt und mit dem Zeigefinger geschlossen. Während der Füllung strömt Wasser durch die Filterplatte und reinigt diese von etwa vorhandenen Bodenresten aus vorangegangenen Versuchen. Der Trichter (3) wird dann umgestülpt, etwa bis 3 cm über OK-Filterplatte mit Wasser gefüllt und bei (1) so eingesetzt, daß keine Luftblasen zur Filterplatte hochsteigen. Das über OK-Filterplatte befindliche Wasser tropft dann über die Meßpipette ab. Das zwischen OK-Filterplatte  $H = 50 \text{ mm}$  und  $H = 0 \text{ mm}$  befindliche Wasser wird durch die Kapillarkraft der Filterplatte im Gerät festgehalten. Der letzte außerhalb der Meßpipettenspitze hängenbleibende Tropfen wird

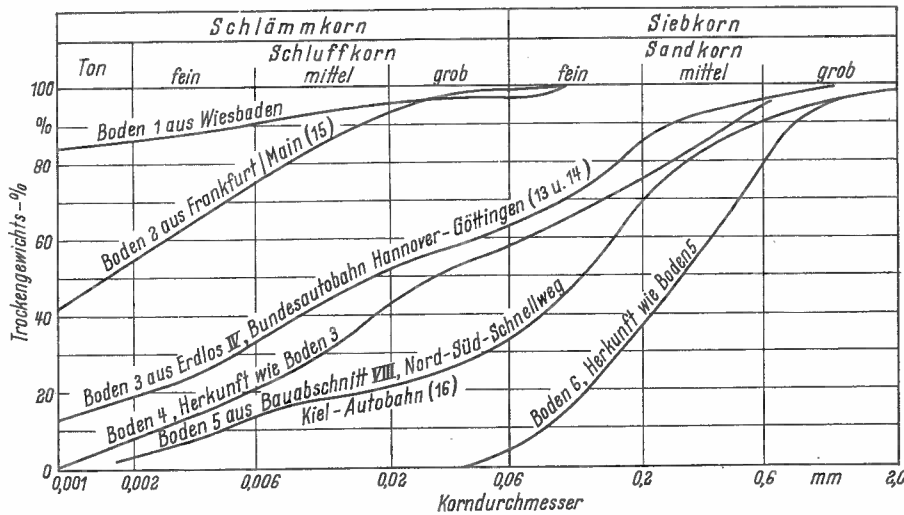


Bild 5a. Kornverteilungslinien von sechs Böden, deren Wasseraufnahme im neuen Gerät (Bild 4) auf Bild 5b dargestellt ist

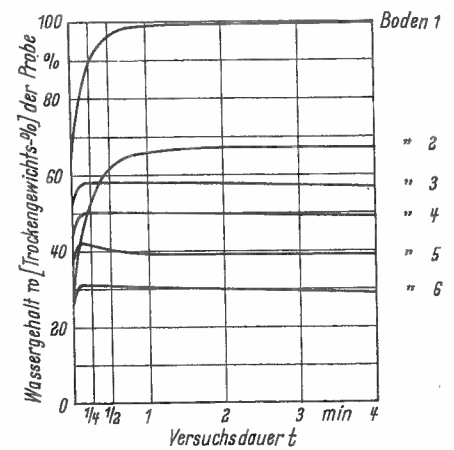


Bild 5b. Typische Wasseraufnahmen von sechs deutschen Böden im neuen Gerät (Bild 4); vgl. deren Kornverteilungslinien auf Bild 5a

Der grundsätzliche Mangel des bisherigen Vorgehens, bei dem nur das Schlammkorn ( $< 0,06 \text{ mm } \phi$ ) untersucht wird, konnte durch Vergrößern der Probenmenge behoben werden. Gleichzeitig wurde dabei die durch die kleine Probenmenge (0,3 g) bedingte Empfindlichkeit des Verfahrens (Einfluß der Genauigkeit von Probeneinwaage und Meßpipettenablesung) stark herabgesetzt.

An Hand von zahlreichen Reihenuntersuchungen mit wechselnden Ansaughöhen  $H$  und Probenmengen  $G_t$  wurde für Böden mit Korn-

abgetupft. Der trockene Einfülltrichter (4) aus Glas oder glattem Papier wird über der Filterplatte eingesetzt. Damit ist das Gerät versuchsbereit.

### 3.23 Versuchsdurchführung

Eine der 1-g-Proben wird aus dem Exsikkator entnommen und unmittelbar danach zügig (innerhalb von 5 s) durch den Einfülltrichter (4) in Kegelform auf die Filterplatte des Meßgerätes ge-

schüttet. Sobald die ersten Probenpartikel die Filterplatte berühren, wird die Stoppuhr in Gang gesetzt. Die aufgenommenen Wassermengen werden an der Meßpipette nach 1/4, 1/2, 1, 2 und 4 min Versuchsdauer abgelesen. Versuche an mehreren Hundert der verschiedensten Böden aus Baugrunduntersuchungen zeigten, daß i. a. 4 Minuten Versuchsdauer vollkommen ausreichen, da i. d. R. bereits nach 1 bis 2 Minuten die maximale Wasseraufnahme erreicht ist und danach bei vielen schluffigen Böden infolge Verdichtung der Probe durch den Wasserdruck von rd. 50 mm Wassersäule in den Probenkapillaren sogar wieder um einige Trockengewichts-% zurückgeht (Bild 5).

Sollte jedoch in Ausnahmefällen bei den selten vorkommenden sehr stark bindigen hochquellfähigen Tonböden zwischen 2 und 4 Minuten Versuchsdauer mehr als 5 Trockengewichts-% Zuwachs in der Wasseraufnahme festzustellen sein (darauf weist bereits beim Pulverisieren der Probe deren besonders große Trockenfestigkeit hin), so wird der Verdunstungsschutz (5) auf den Trichter (3) gesetzt und abgewartet, bis der Wasseraufnahmevergange Beharrungstendenz zeigt. Steigt die Wasseraufnahme dabei über 150 Trockengewichts-%, so empfiehlt es sich, Vergleichsversuche mit 0,3 g-Proben durchzuführen.

Zur Kontrolle wird der Versuch stets mit der im Exsikkator abgestellten 2. Probe wiederholt. Dabei sind max. 2 Trockengewichts-% Abweichung der Wasseraufnahme vom 1. Versuch zulässig und lassen sich ohne weiteres einhalten.

3.3 Kennwerte

3.31 Die im Endzustand aufgenommene Wassermenge  $w_{max}$ , bezogen auf das Trockengewicht  $G_t$  der Probe wird hier als Wasserbindevermögen  $w_b$  bezeichnet:

$$w_b = \frac{w_{max} [g]}{G_t [g]} \cdot 100 [\text{Trockengewichts-\%}] \quad (1)$$

Wie die vorliegende Erfahrung gezeigt hat (vgl. Abschnitt 3.23), genügt es jedoch i. a. für die praktischen Bedürfnisse, wenn mit  $w_{max}$ , das ist die innerhalb von 4 Minuten Versuchsdauer aufgenommene größte Wassermenge, gearbeitet wird:

$$w_b' = \frac{w_{max} [g]}{G_t [g]} \cdot 100 [\text{Trockengewichts-\%}] \quad (2)$$

Das Wasserbindevermögen  $w_b'$  einer gebräuchlichen Skala von Bodenarten ist aus der folgenden Zusammenstellung zu entnehmen:

schwach schluffige Sande . . . . .	$w_b'$ etwa	25 bis 30
Schluff-Sande . . . . .		30 bis 40
tonig-sandige Schluffe, Schluffe		40 bis 50
schluffige Tone, schwach bindig .		50 bis 60
Tone, gut bindig . . . . .		60 bis 100
Tone, stark bindig . . . . .		> 100

3.32 Der Wasserbindegrad  $w_{bg}'$  ist — ähnlich wie die Konsistenzzahl nach Atterberg [10] — ein Zustandskennwert für bindige Bodenproben mit natürlichem Wassergehalt  $w_n$ :

$$w_{bg}' = \frac{w_n [\text{Trockengewichts-\%}]}{w_b' [\text{Trockengewichts-\%}]} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

Als gute Mittelwerte ergaben sich aus zahlreichen Versuchen an Böden mit  $w_b' = 40$  bis 100 Trockengewichts-% für die bekannten Konsistenzformen folgende Werte:

Konsistenzzahl K		Wasserbindegrad $w_{bg}'$
> 1	halbfest	< 35 %
1 — 0,75	steif	35 — 50 %
0,75 — 0,50	weich	50 — 65 %
0,50 — 0,25	breiig	65 — 80 %
< 0,25	flüssig	> 80 %

4. Anwendung

4.1 Allgemein

Das vorstehende Verfahren zur Messung der Wasseraufnahme bindiger Böden erfaßt vollständig den Bereich ungleichförmiger

Böden mit Korngrößen < 2 mm und Wasseraufnahmen bis etwa 150 Trockengewichts-%, wie sie in Deutschland vorwiegend vorkommen. Es zeichnet sich durch einfache und schnelle Versuchsdurchführung aus, ist praktisch unabhängig von der Geschicklichkeit des Laboranten und erfordert keinen besonders großen Geräteaufwand (Mörser, kleiner Trockenschrank, Exsikkator, Waage, Wasseraufnahmemessgerät und Stoppuhr).

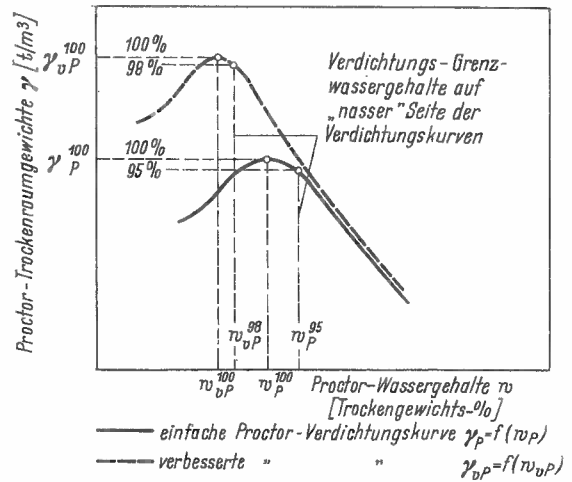


Bild 6. Charakteristische Proctorversuchs-Kennwerte [17]

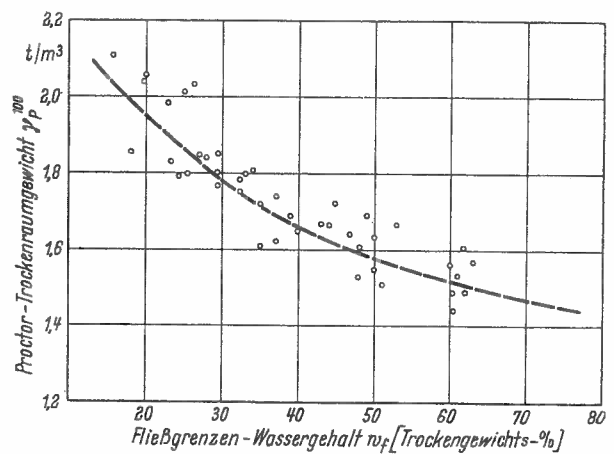


Bild 7a.  $\gamma_{VP}^{100} = f(w_f)$

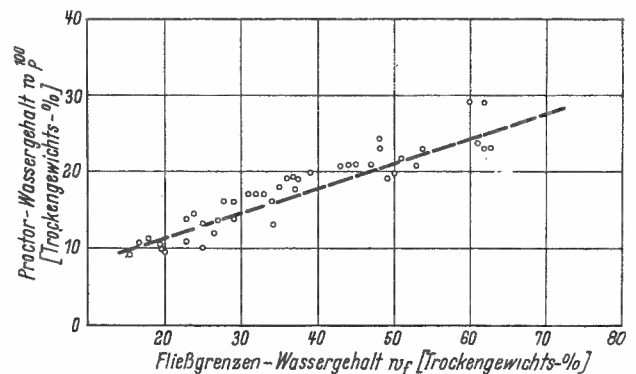


Bild 7b.  $w_{pP}^{100} = f(w_f)$

Bildgruppe 7. Beziehungen zwischen Proctor-Versuchskennwerten (Bild 6) und Fließgrenzen-Wassergehalt  $w_f$  nach Bjerrum [12]. Anm.: Verdichtungsversuche mit Fraktion < 5 mm, Fließgrenzenversuche mit Fraktion < 0,5 mm

Hinzu kommt, daß bereits in mehreren ausführlichen grundsätzlichen Untersuchungen [2] bis [7] der Nachweis erbracht worden ist, daß ganz allgemein zwischen dem mechanischen Verhalten und dem Wasserhaushalt bindiger Böden ein ursächlicher Zusammenhang besteht. Weiterhin wurde nachgewiesen, daß der Wasserhaushalt und das mechanische Verhalten eines bindigen Bodens sich mittelbar durch den „Enslinwert“ (hier  $\equiv$  Wasserbindevermögen  $w_b$ ) charakterisieren läßt.

Danach besitzen Böden mit vergleichsweise großem Wasserbindevermögen  $w_b$  auch vergleichsweise große Fließ-, Ausroll- und

Schrumpf-Grenzwassergehalte, große Zusammendrückbarkeit, kleine Durchlässigkeit und kleinen Winkel der inneren Reibung. Auch auf die Möglichkeit der Beurteilung der Frostgefährlichkeit bindiger Böden [3] mit Hilfe von  $w_b$  sei hier hingewiesen.

#### 4.2 Anwendung im Erdbau

In den letzten Jahren hat bei Erdbauten in Deutschland der Proctor-Versuch [10] besondere Bedeutung zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit feinkörniger bindiger Bodenmassen gewonnen. Wie bekannt ist, sind bereits mehrfach — u. a. von Bjerrum

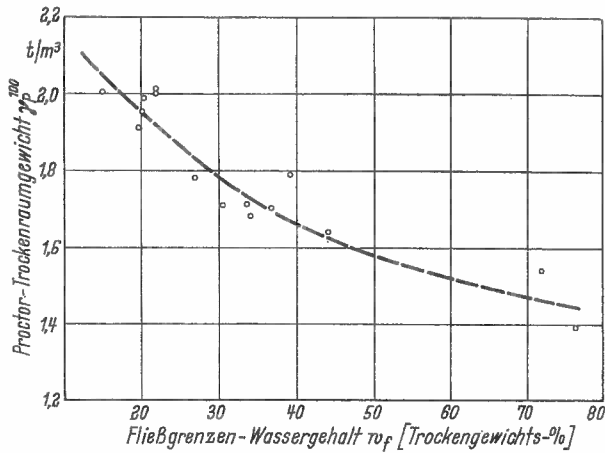


Bild 8a.  $\gamma_p^{100} = f(w_f)$

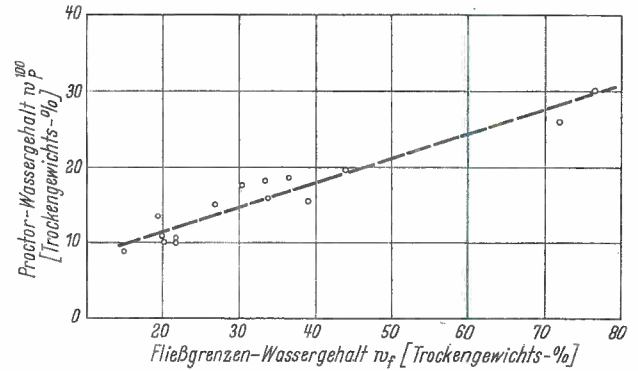


Bild 8b.  $w_p^{100} = f(w_f)$

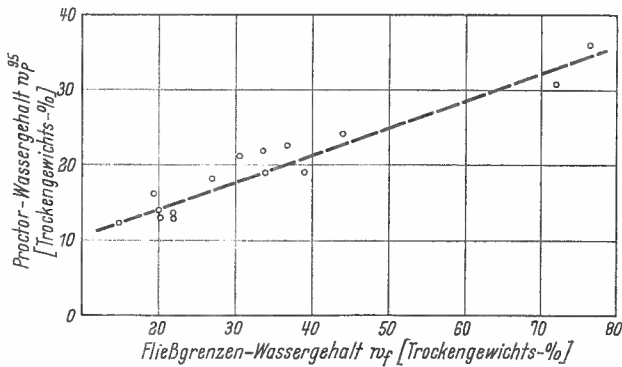


Bild 8c.  $w_p^{95} = f(w_f)$

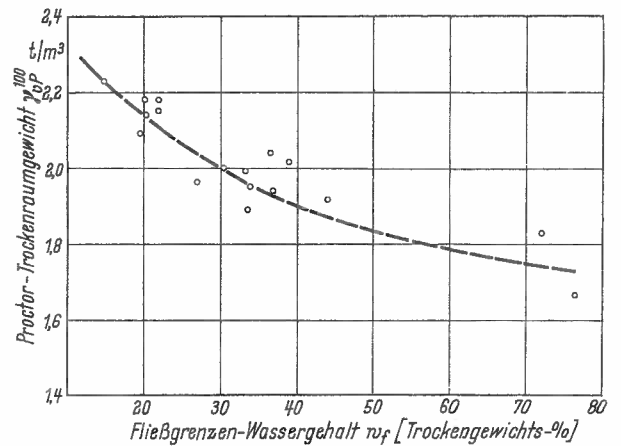


Bild 8d.  $\gamma_{vp}^{100} = f(w_f)$

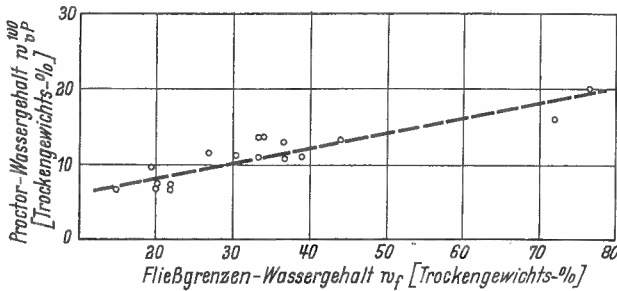


Bild 8e.  $w_{vp}^{100} = f(w_f)$

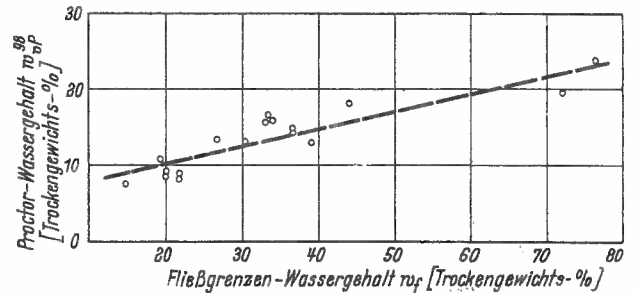


Bild 8f.  $w_{vp}^{98} = f(w_f)$

Bildgruppe 8. Beziehungen zwischen Proctorversuchs-Kennwerten und dem Fließgrenzen-Wassergehalt  $w_f$  verschiedener Böden aus Deutschland nach [13] bis [16]

[12]. — Zusammenhänge zwischen Fließgrenzenwassergehalt  $w_f$  und Proctor-Kennwerten (s. Bild 6) für Böden des Auslandes festgestellt worden (Bildgruppe 7). Diese ließen sich auch bei mehreren Untersuchungen für Erdbauvorhaben in Deutschland [13] bis [16] bestätigen (Bildgruppe 8). Es lag deshalb nahe, entsprechende Beziehungen auch zwischen dem Wasserbindevermögen  $w_b'$  und den Proctor-Kennwerten nach Bild 6 herzustellen (Bildgruppe 9).

Der Vergleich der Straffheiten einander entsprechender Beziehungen in den Bildgruppen 8 und 9 zeigt, daß die Kennwerte

$w_f$  und  $w_b'$  im Hinblick auf die Charakterisierung des mechanischen Verhaltens bindiger Böden im Proctor-Verdichtungsversuch als gleich gut zu bezeichnen sind. Der ausschlaggebende Vorteil des Kennwertes  $w_b'$  gegenüber  $w_f$  liegt deshalb vor allem darin, daß er sich wesentlich einfacher gewinnen läßt.

Im Bedarfsfall geht man dann so vor, daß zunächst für die in einem Baufeld vorkommenden Bodenarten Eichkurven entsprechend Bildgruppe 9 in einer Versuchsanstalt ermittelt werden. Wie die Erfahrung bestätigt, kommt man dann auf der Baustelle

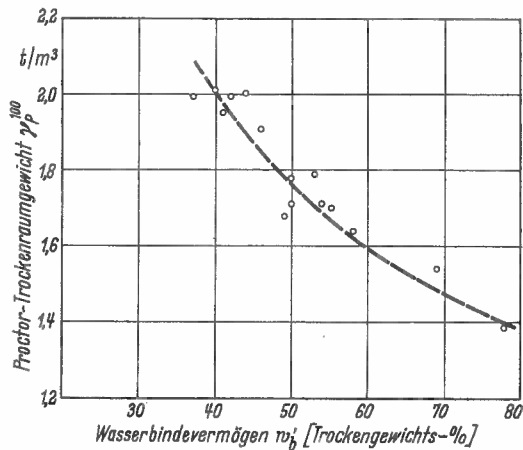


Bild 9a.  $\gamma_P^{100} = f(w_b')$

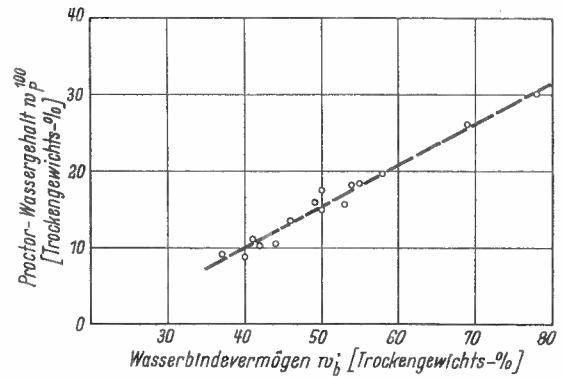


Bild 9b.  $w_{vP}^{100} = f(w_b')$

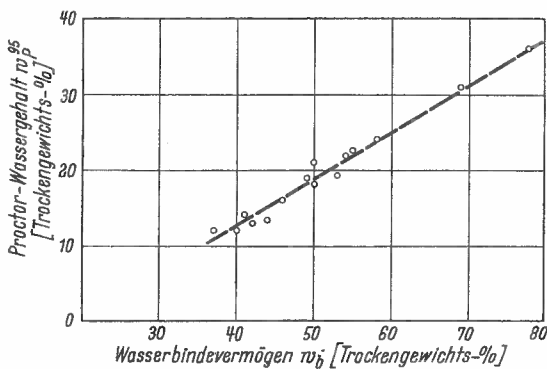


Bild 9c.  $w_{vP}^{95} = f(w_b')$

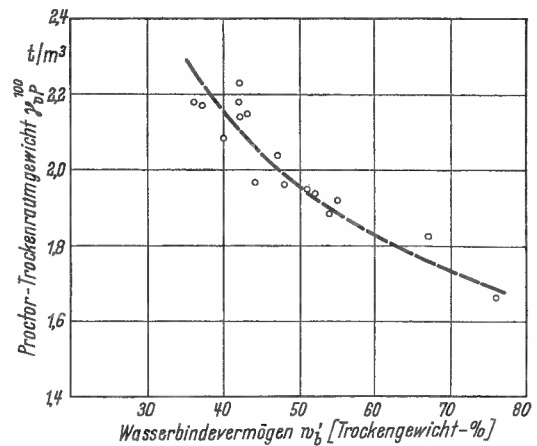


Bild 9d.  $\gamma_{vP}^{100} = f(w_b')$

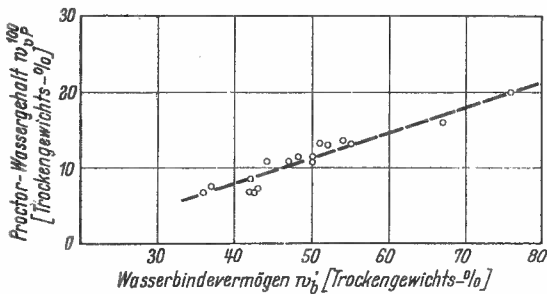


Bild 9e.  $w_{vP}^{100} = f(w_b')$

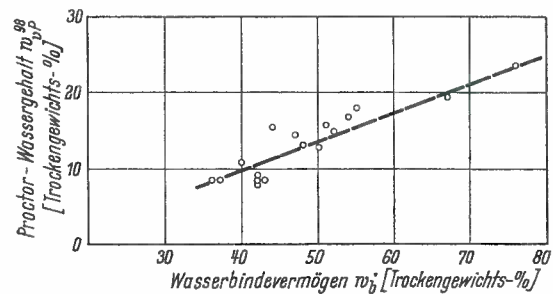


Bild 9f.  $w_{vP}^{98} = f(w_b')$

Bildgruppe 9. Beziehungen zwischen Proctorversuchs-Kennwerten und dem Wasserbindevermögen  $w_b'$  für dieselben Böden, von denen in Bildgruppe 8 Beziehungen mitgeteilt sind



i. a. ohne weiteres mit der Ermittlung von  $w_b'$  und dem natürlichen Wassergehalt  $w_n$  aus, wenn an Ort und Stelle der erzielte Verdichtungserfolg oder die Verarbeitbarkeit bindiger Bodenmassen beurteilt werden soll.

Böden, deren natürlicher Wassergehalt  $w_n$  z. B. so hoch liegt, daß die allgemein eingeführte Mindestforderung von 95% der einfachen Proctor-Dichte [17] nicht eingehalten werden kann, lassen sich mit Hilfe von  $w_n$  und  $w_b'$  an Hand von Bild 9 c feststellen. Es kann dann näher untersucht werden, ob sich eine Erhöhung des Wasserbindevermögens  $w_b'$  — was gleichbedeutend ist mit dem Heraufsetzen des Verdichtungs-Grenzwassergehaltes  $w_p^{95}$  auf Bild 9 c — z. B. durch Zusatz von Kalkhydrat [16], [18] und [19] lohnt, oder ob der Boden auszusetzen ist.

Auch bei der Herstellung von Erdbeton für Staudämme [20] und [21] dürfte sich der Kennwert Wasserbindevermögen  $w_b'$  besonders für die einfache Kontrolle der erdbaumechanischen Eigenschaften des bindigen Erdbeton-Ausgangsmaterials eignen.

#### 4.3 Anwendung im Grundbau

Bei der Beurteilung der Frage der Zusammendrückbarkeit bindiger Bodenschichten von größerer Dicke ist es vielfach von Interesse, wie gleichmäßig diese zusammengesetzt sind. Wie Bild 10

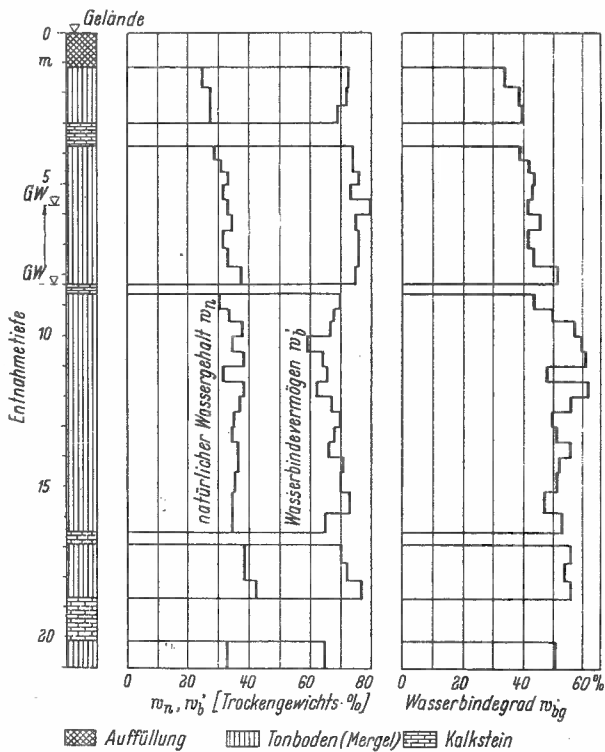


Bild 10.

Wechsel der Kennwerte  $w_n$ ,  $w_b'$  und  $w_bg'$  von Bodenproben aus einem typischen Aufschluß des Untergrundes in Frankfurt am Main [22]

für ein typisches Profil aus dem Untergrund von Frankfurt am Main [22] zeigt, gibt darüber besonders der Wasserbindegrad  $w_bg'$  Aufschluß in Verbindung mit den zugehörigen Konsistenzformen nach Abschnitt 3.32. Danach sind die untersuchten Schichten von Bild 10 trotz einheitlicher Geologie (tertiäre Mergelschichten) und dem Augenschein nach ziemlich gleich aussehenden Bodenproben als nicht sehr gleichmäßig fest anzusprechen. Das wird auch durch die allgemeine Versuchserfahrung bestätigt. Untersuchungsergebnisse von einer ungestörten Bodenprobe üblicher Größe (Probendurchmesser 10 cm, Probenhöhe 2 cm) aus diesen Tonschichten dürfen also nicht ohne weiteres als repräsentativ für die Zusammendrück-

barkeit einer mehrere hundert cm dicken Schicht angesehen werden. Es sind deshalb anfangs — solange noch nicht ausreichende Erfahrungen aus bereits durchgeführten Gründungen benachbarter Bauwerke vorhanden sind — stets mehrere ungestörte Proben aus derart zusammengesetzten Tonschichten zu untersuchen. Das ist besonders dann erforderlich, wenn das Setzungsverhalten von schweren Bauwerken, die z. B. im Rhein-Main-Gebiet des öfteren auf bis in sehr große Tiefe (2 bis 300 m) reichenden bindigen Tonschichten zu gründen sind, einigermaßen sicher beurteilt werden soll. Zweckmäßigerweise geht man dabei so vor, daß aus einer in Bauwerksmitte abzuteufenden Bohrung von ausreichender Tiefe ungestörte Proben in größerer Zahl entnommen und eingehend (Kompressionsversuch und Feststellung des Wasserbindegrades  $w_bg'$ ) untersucht werden. Bei den übrigen Bohrungen im Baufeld genügt dann die Entnahme von gestörten Proben, solange der Bohrmeister dem Augenschein nach keine merklichen Abweichungen von dem Bohrerergebnis aus Bauwerksmitte feststellt. Von diesen gestörten Proben wird dann ebenfalls  $w_bg'$  bestimmt und durch Vergleich mit den Wasserbindegraden der genauer untersuchten Bohrung in Bauwerksmitte festgestellt, welche Kompressions-Versuchsergebnisse am besten die Zusammendrückbarkeit der untersuchten Schichten repräsentieren.

Weiteren Untersuchungen ist es vorbehalten, in diesem Zusammenhang die Frage zu klären, welche quantitative Aussagekraft die hier besprochenen qualitativen Kennwerte Wasserbindevermögen  $w_b'$  und Wasserbindegrad  $w_bg'$  in bezug auf die Zusammendrückbarkeit von bindigen Bodenproben im Kompressionsversuch bei behinderter Seitenausdehnung besitzen.

#### Schrifttum

- [1] Enslin, O.: Chemische Fabrik 6 (1933) S. 147.
- [2] Endell, K., Loos, W., Meischeider, H. und Berg, V.: Veröff. der Degebo 5 (1938).
- [3] Endell, K.: Bautechnik 19 (1941) S. 201.
- [4] Pichler, E.: Proc. III. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Vol. I, Zürich 1953, S. 43.
- [5] Salas, J. A. und Serratos, J. M.: Proc. III. Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Vol. I, Zürich 1953, S. 192.
- [6] Neumann, R.: Ber. d. DKG 31 (1954) H. 5, S. 156.
- [7] Neumann, R.: Bauingenieur 32 (1957) S. 6.
- [8] Jelinek, R., Jessberger, H. L. und Körner, H.: Bautechnik 35 (1958) S. 223.
- [9] Krabbe, W.: Mitt. d. Hann. VA f. Grundb. u. Wasserb. Franzius-Institut d. TH Hannover 13 (1958) S. 256, Eigenverlag.
- [10] Schultze, E. und Muhs, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. Berlin 1950.
- [11] Tiedemann, B.: Bautechnik 19 (1941) S. 40.
- [12] Bjerrum, L.: Straße und Verkehr (1952) H. 2, 3, 4 und 5.
- [13] VA für Wasser- u. Grundbau, TH Darmstadt: Bodenuntersuchungen Bundesautobahn — Neubaustrecke Hannover — Göttingen, Erdlos IV, km 63,1 + 50 bis km 67,8 + 62,4 (1957), unveröffentlicht.
- [14] VA für Straßenbau, TH Darmstadt: Bodenuntersuchungen wie [13] (1957) unveröffentlicht.
- [15] VA für Wasser- u. Grundbau, TH Darmstadt: Bodenuntersuchungen Oberhafenbecken II, Frankfurt/Main (1957) unveröffentlicht.
- [16] VA für Wasser- u. Grundbau, TH Darmstadt: Bodenuntersuchungen Straßeneubau Kiel — Autobahn, Bauabschnitt VIII, Erdlos 3 A und 3 B, km 8,3 + 00 bis km 13,9 + 70 (1958) unveröffentlicht.
- [17] Voss, R.: Die Bodenverdichtung im Straßenbau., Düsseldorf (1956).
- [18] Ungef, R.: Straße und Autobahn IX (1958) S. 418.
- [19] Brand, W.: Straße und Autobahn IX (1958) S. 426.
- [20] Breth, H.: Bautechnik 35 (1958) S. 228.
- [21] Breth, H.: Baumaschine und Bautechnik 2 (1955) S. 313.
- [22] VA für Wasser- und Grundbau, TH Darmstadt: Bodenuntersuchungen, Katharinenkrankenhausbauten, Frankfurt/Main, Seckbacherlandstraße (1957) unveröffentlicht.

## Bau einer elliptischen Schalenkuppel in Ungarn

Von Prof. Dr. techn. Paul Csonka, Budapest

DK 69.024.4 Schalendächer

In der Gemeinde Taksony (Ungarn) wurde an Stelle der im Jahre 1956 durch ein Erdbeben zerstörten alten Kirche eine neue gebaut (Bild 1).

Der Kirchenraum ist eine Halle mit elliptischem Grundriß (Bild 2). Im ersten Stock des Eingangsgebäudes befindet sich ein gegen den Kirchenraum geöffneter, breiter Chor (Bild 3).

Den elliptischen Kirchenraum hat man durch eine flache Stahlbeton-Schalenkuppel abgedeckt, deren Durchmesser in Richtung der großen Achse 22,0 m, in Richtung der kleinen Achse 17,0 m betrug. Die Meridiankurve der Kuppelmittelfläche ist ein abgeflachter Cycloidbogen. Die Stichhöhe der Kuppel beträgt 3,25 m, ihre Wanddicke ist veränderlich. In der Quersymmetrie-Ebene beträgt sie 6 cm, sonst ist sie so bemessen, daß die in vertikaler Richtung gemessene Dicke in den gleich hoch liegenden Punkten gleich sei.



Bild 1. Ansicht der neuen Kirche

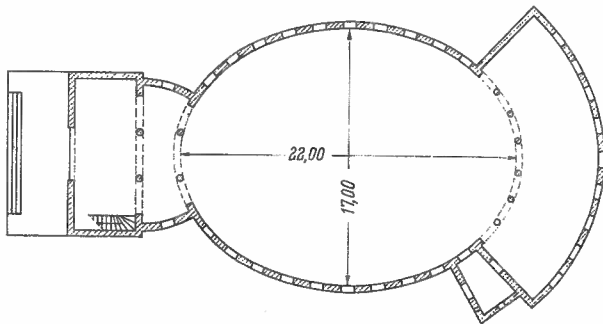


Bild 2. Grundriß der Kirche

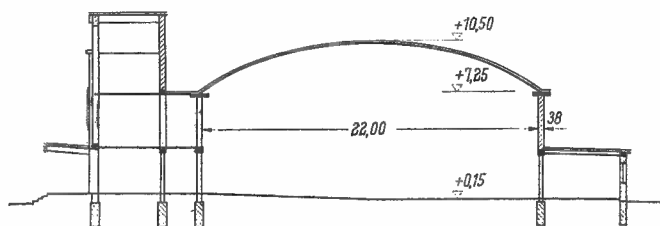


Bild 3. Längsschnitt der Kirche

Das Eigengewicht der Schale wurde in den Punkten der Quersymmetrie-Ebene mit  $255 \text{ kg/m}^2$  und die Schnee- und Windbelastung mit  $100 \text{ kg/m}^2$  in Rechnung gestellt. Diese Gewichtsangaben beziehen sich auf die Flächeneinheit der Mittelfläche, bzw. der Grundrißprojektion. Da die Belastung der Kuppel längs der horizontalen Schichten-Linien der Schale konstant ist und die Schalenmittelfläche ein affines Gebilde einer Rotationsfläche ist, wurde die Berechnung der Membrankräfte den Prinzipien des statischen Massenausgleiches

[1], [2] entsprechend an der erwähnten Rotationsfläche durchgeführt. Aus den so gewonnenen Membrankräften wurden die entsprechenden Membrankräfte des elliptischen Gebildes durch einfache affine Transformation abgeleitet.

Die Berechnung selbst bezog sich ausschließlich auf die Feststellung der Membrankräfte, die Biegewirkungen wurden daher außer acht gelassen. Diese Vereinfachung war um so eher möglich, als die Form der Schale und die Querschnittsabmessungen des Zugringes von vornherein so gewählt wurden, daß beim Anschluß der Schale am Zugring die Ringdehnungen beider Konstruktionen gleich seien [3].

Als Bewehrung der Schale wurden die Stahleinlagen (St 37) netzartig verlegt, und zwar so, daß die eine Lage mit der einen, die andere mit der anderen Symmetrieebene der Kuppel parallel läuft (Bild 4). Diese Bewehrung wurde in der Mitte der Schalendicke angebracht. Außerdem bekam die Schale noch beim Anschluß an den Zugring eine Zusatzbewehrung in Ring- sowie in radialer Richtung. Die Entfernung der in der Ringrichtung liegenden Stahleinlagen ist auf dem unteren 1,50 m breiten Abschnitt 10 cm, auf dem nach oben folgenden 1,50 m breiten Abschnitt 20 cm. Die in radialer Richtung gelegten Stahleinlagen befinden sich in je 15 cm Entfernung voneinander. Diese sind unten in den Zugring eingebettet, oben aber reichen sie abwechselnd bis 1,80 m, bzw. 3,30 m in die Schalenwand hinein.

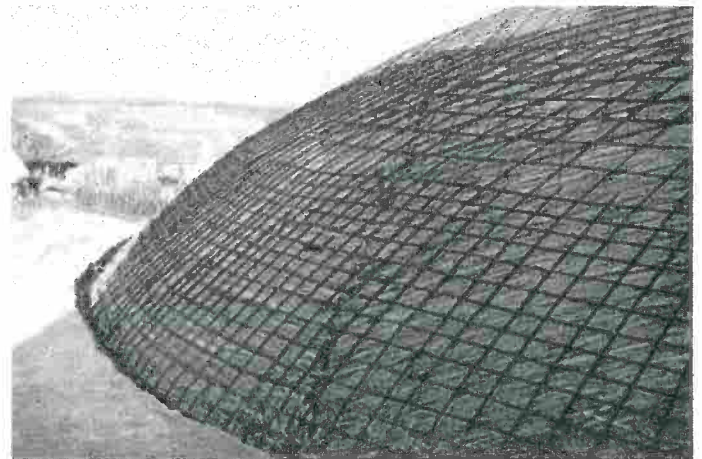


Bild 4. Die netzartigen Stahleinlagen

Der Querschnitt des Stahlbeton-Zugringes ist  $25 \times 90 \text{ cm}$ . Seine Mittellinie ist für Eigen- und Schneelast eine Seilkurve; infolgedessen ist der Zugring im wesentlichen nur auf Zug beansprucht. Bei einer halbseitigen Schneelast sowie bei Windlast erleidet natürlich der Zugring eine zusätzliche Biege-

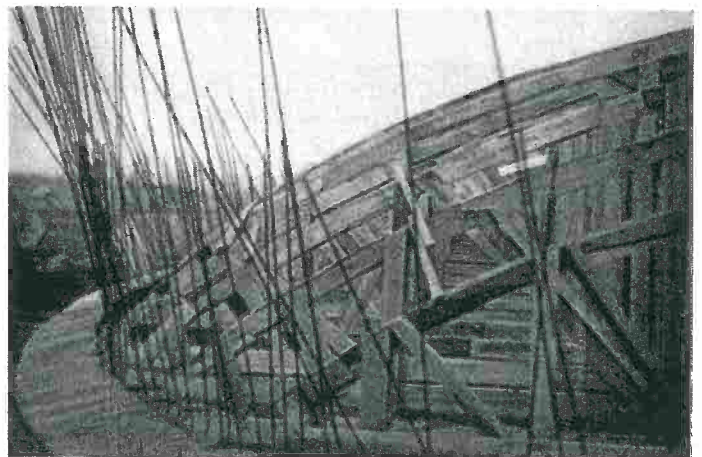


Bild 5. Die radialen Zusatzeinlagen (rückwärts gebogen)