

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Franke, Eberhard; Garbrecht, D.; Kiekbusch, Manfred**

## **Meßfehler infolge unvollkommener Volumenkonstanz von Porenwasser - druckgebern beim Scherversuch**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103035>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Franke, Eberhard; Garbrecht, D.; Kiekbusch, Manfred (1972): Meßfehler infolge unvollkommener Volumenkonstanz von Porenwasser - druckgebern beim Scherversuch. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 32. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 47-64.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Dr.-Ing. E. F r a n k e

Dipl.-Ing. D. G a r b r e c h t

M. K i e k b u s c h

MEßFEHLER INFOLGE UNVOLLKOMMENER VOLUMENKONSTANZ  
VON PORENWASSERDRUCKGEBERN BEIM SCHERVERSUCH

The time-lag of pore-water pressure  
measurement systems with uncomplete volume constancy  
during the consolidated undrained triaxial test

Zusammenfassung

Bei der Messung des Porenwasserdruckes im konsolidierten, undrainierten (CU) Triaxialversuch werden häufig Meßgeräte verwendet, deren Druckanzeige auf der Durchbiegung einer Metallmembran beruhen. Das bedeutet eine Volumenänderung im Meßsystem und ein Nachfließen von Porenwasser aus der Probe. Dafür wird eine gewisse Zeit benötigt, die von der Durchlässigkeit und Zusammendrückbarkeit der Probe und der Kompressibilität des Meßsystems abhängig ist. Der richtige Porenwasserüberdruck wird deshalb mit einer gewissen Zeitverzögerung angezeigt. Der Einfluß des damit verbundenen Fehlers wird theoretisch überdacht und experimentell für einen kraft- und einen weggesteuerten CU-Versuch überprüft.

Summary

Measuring the pore water pressures in consolidated undrained (CU) triaxial test often gages are used, which indicate the pressure by the deflection of a metal diaphragm. This causes a volume change in the measuring system and therefore a flow of pore water from the specimen into the measuring system. This means that for this flow time is needed which depends on the permeability and the compressibility of the specimen and on the compressibility of the measuring system, too. Therefore the exact pore pressure is indicated with a certain time delay. The fault, which is connected with this delay, is shown by theoretical considerations and by experimental procedures in both, stress and strain controlled tests.

## I n h a l t

	Seite
1. Zweck der Untersuchung	49
2. Theorie	51
3. Versuche	54
3.1 Bodenprobenauswahl	54
3.2 Versuchsdurchführung	54
4. Anwendung der Versuchsergebnisse	58
4.1 B-Wert-Bestimmung	58
4.2 Kraftgesteuertes Abscheren	60
4.3 Weggesteuertes Abscheren	60
5. Einfluß der Endflächenreibung	62
6. Schluß	62
7. Schrifttum	63

1. Zweck der Untersuchung

Der konsolidierte, undrainierte Triaxialversuch (CU-Versuch) mit konstanter Abschergeschwindigkeit ist einer der wichtigsten Versuche der bodenmechanischen Laborpraxis. Bei diesem Versuch werden an einer Reihe von bodenmechanischen Instituten Porenwasserdruckgeber verwendet, bei denen die Druckanzeige auf der Durchbiegung einer Metallmembran beruht (s. Abb.1 a), System Maihak, Hottinger u.a.). Mit der Durchbiegung dieser Membran oder anderer nachgiebiger Bauteile des Meßsystems (3 auf Abb.1 a) ist eine Ver-

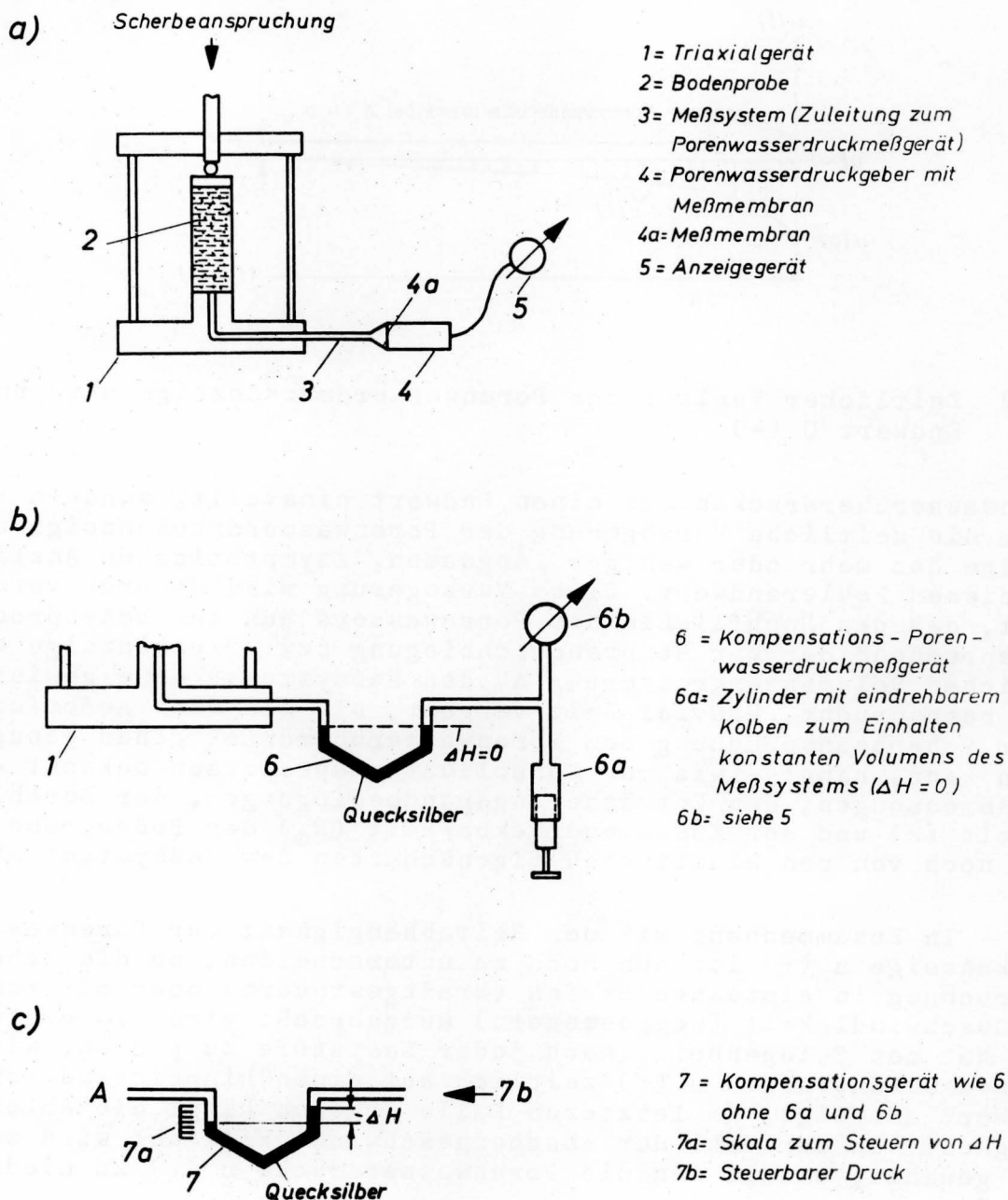


Abb.1 Triaxialgerät mit verschiedenen Versuchseinrichtungen (schematisch)

größerung des Volumens des Meßsystems verbunden, die ein Nachfließen von Porenwasser aus der Bodenprobe gestattet. Das bedeutet aber daß die Bodenprobe während der Scherbeanspruchung um ein entsprechendes Volumen konsolidieren kann, obwohl der CU-Versuch voraussetzt, daß nach Beginn des Abscherens kein Porenwasser mehr aus der Bodenprobe austritt. Mit der Verwendung solcher Porenwasserdruckgeber ist also ein systematischer Meßfehler verbunden.

Zu beachten ist dabei nicht nur der Absolutbetrag dieses Fehlers ( $\Delta p$  auf Abb.2), der sich nach asymptotischem Anstieg des

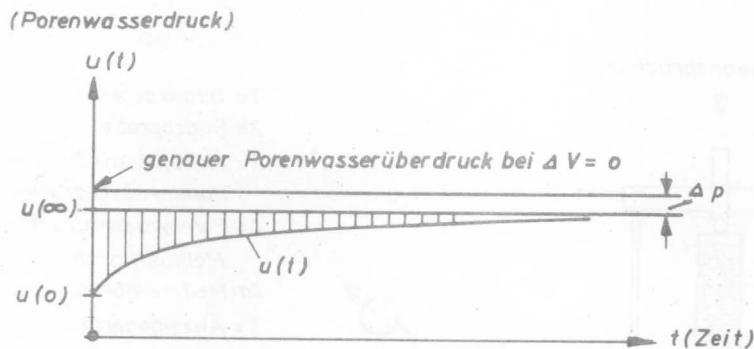


Abb.2 Zeitlicher Verlauf der Porenwasserdruckanzeige  $u(t)$  und ihr Endwert  $U(\infty)$

Porenwasserüberdruckes auf einen Endwert einstellt, sondern vor allem die zeitliche Verzögerung der Porenwasserdruckanzeige  $u(t)$  infolge des mehr oder weniger langsamen, asymptotischen Anstieges auf diesen Fehlerendwert. Diese Verzögerung wird dadurch verursacht, daß das Nachfließen des Porenwassers aus der Bodenprobe (entsprechend der zur Membrandurchbiegung bzw. Druckanzeige erforderlichen Volumenvergrößerung  $\Delta V$  des Meßsystems) eine gewisse Zeit beansprucht. Wieviel Zeit vergeht, bis man nach Aufbringen einer Scherbeanspruchung den Porenwasserüberdruck genau genug ablesen kann, hängt - wie von Konsolidationsprozessen bekannt - von den Abmessungen, den Entwässerungsrandbedingungen, der Durchlässigkeit ( $k$ ) und der Zusammendrückbarkeit ( $E_s$ ) der Bodenprobe und hier noch von den elastischen Eigenschaften des Meßsystems ab.

In Zusammenhang mit der Zeitabhängigkeit der Porenwasserdruckanzeige  $u(t)$  ist nun noch zu unterscheiden, ob die Scherbeanspruchung in einzelnen Stufen (kraftgesteuert) oder mit konstanter Geschwindigkeit (weggesteuert) aufgebracht wird. Im ersten Fall hat man Gelegenheit, nach jeder Laststufe zu prüfen, wie der Porenwasserüberdruck  $u(t)$  zeitlich auf einen hinreichend konstanten Wert ansteigt. Im letzteren Falle dagegen hängt die Ablesegenauigkeit von der Wahl der Abschergeschwindigkeit ab; wird sie zu groß gewählt, erhält man die Porenwasserdrücke  $u(t)$  zu niedrig (Abb.2).

Eine Reihe von Geräteherstellern haben deshalb Porenwasser-

druckmeßgeräte auf den Markt gebracht, mit denen das Volumen des Meßsystems konstant gehalten werden kann. (Kompensationsgeräte, s. Abb. 1 b). Die meisten von ihnen haben jedoch den Nachteil, daß sie von Hand gesteuert werden müssen oder aber störanfällig sind. Die hier behandelten, nicht vollständig volumenkonstant arbeitenden Porenwasserdruckgeber dagegen gestatten eine bequemere Ableitung der Meßwerte und vor allem deren automatische Registrierung durch elektrische Übertragungseinrichtungen. Sie sind also für Routineversuche handlicher und daher vielfach im Gebrauch, so daß es nützlich schien, einmal zu untersuchen, wie groß der mit ihrer Anwendung verbundene systematische Fehler sein kann.

## 2. Theorie

GIBSON [1] stellte folgende theoretische Untersuchungen über den Meßfehler bei der Messung des Porenwasserüberdruckes an der Unterseite einer Bodenprobe im CU-Versuch an:

Das Meßsystem (3 auf Abb. 1 a) habe die Kompressibilität  $\lambda$ , das ist seine Volumenänderung bezogen auf den in ihr herrschenden Wasserdruck in

$$\frac{\text{cm}^3}{\text{kp/cm}^2} = \frac{\text{cm}^5}{\text{kp}}$$

(Dabei ist neben dem Einfluß der Durchbiegung einer Meßmembran auch eine etwaige Volumenänderung der Zuleitung von der Bodenprobe zum Porenwasserdruckgeber - 3 in Abb. 1 a) - mit erfaßt).

Die Zeitabhängigkeit des Meßprozesses ergab sich - wie in Abschnitt 1 beschrieben - dadurch, daß das Nachfließen von Porenwasser aus der Bodenprobe in das Meßsystem eine Konsolidation der Bodenprobe bedeutet; insofern ist neben der Zusammendrückbarkeit  $\lambda$  des Meßsystems auch die der Bodenprobe  $K$  von Einfluß bzw. ihr Verhältnis  $\eta = K/\lambda$ .  $K$  ergibt sich dabei wie folgt: Für die Bodenprobe gilt

$$\Delta h = \frac{p \cdot h}{E_s}$$

Damit folgt

$$K = \frac{\Delta h \cdot F}{p} = \frac{h \cdot F}{E_s} \left[ \frac{\text{cm}^5}{\text{kp}} \right] \quad (1)$$

und

$$\eta = \frac{h \cdot F}{E_s \cdot \lambda} \quad (2)$$

Ferner wird ein relativer Meßfehler definiert zu

$$\epsilon = \frac{u(\infty) - u(t)}{u(\infty) - u(0)} \quad (3)$$

Seine Bedeutung geht aus Abb.2 hervor,  $u(\infty) - u(0)$  ist der Meßfehler bei  $t = 0$ , der mit der Zeit asymptotisch kleiner wird. ( $\Delta p$  nach Abb.2 kann - wie später nachgewiesen wird - als vernachlässigbar klein betrachtet werden).

In Abhängigkeit von  $\eta$  und  $\epsilon$  kann man dann nach GIBSON [1] die Zeit angeben, die vergehen muß, bis nach Aufbringen einer Laststufe der Scherbeanspruchung der Meßfehler auf einen bestimmten Prozentsatz des Anfangswertes dieses Fehlers abgeklungen ist. Abb.3 gestattet diese Ablesung für  $\epsilon = 5\%$ ,  $2\%$  und  $1\%$ . Die Zeit ist dabei - wie in der Konsolidationstheorie üblich - in der dimensionslosen Schreibweise

$$\tau = \frac{k \cdot E_s \cdot t}{\gamma_w \cdot h^2}$$

angegeben.

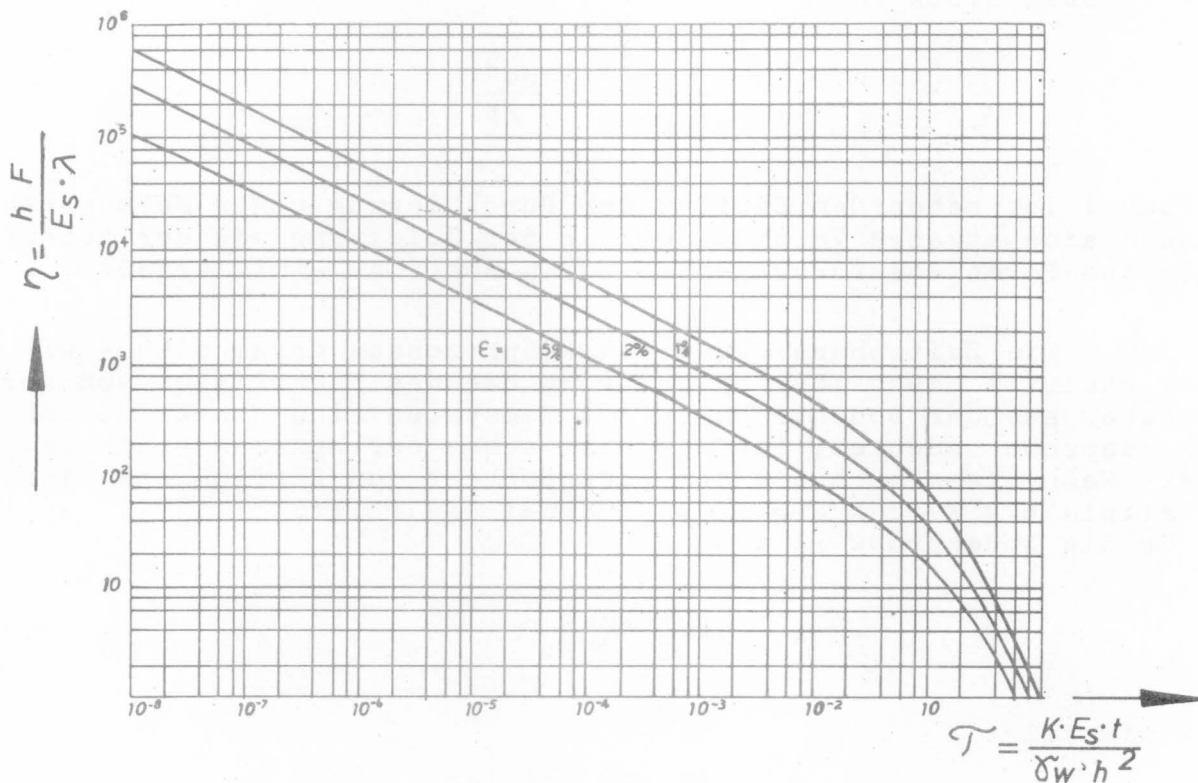


Abb.3 Zeitl. Abklingen des Meßfehlers in Abhängigkeit von der Steifigkeit und Durchlässigkeit der Probe und der Kompressibilität des Meßsystems

In den Formeln bedeuten:

F	= Querschnittsfläche der Bodenprobe	(cm <sup>2</sup> )
h	= Höhe der Bodenprobe	(cm)
Δh	= Änderung von h	
ΔV	= Δh · F	
E <sub>s</sub>	= Steifezahl	(kp/cm <sup>2</sup> )
λ	= Kompressibilität	(cm <sup>3</sup> /kp/cm <sup>2</sup> )
k	= Durchlässigkeitsbeiwert	(cm/s)
γ <sub>w</sub>	= spez. Gewicht von H <sub>2</sub> O	(kp/cm <sup>3</sup> )
u(t)	= Porenwasserdruck	(kp/cm <sup>2</sup> ) zur Zeit t
u(0)	= Porenwasserdruck	für t = 0
u(∞)	= Porenwasserdruck	für t = ∞

Das folgende Beispiel soll einen Eindruck vermitteln, welche Zeiten man abwarten muß, bis der Meßfehler bei praktischen Untersuchungen von Bodenproben ausreichend abgeklungen ist.

Die folgende Tabelle 1) zeigt die Abklingzeit des Meßfehlers in Abhängigkeit von E<sub>s</sub> und k; dabei kommen die in Klammern gesetzten Werte in der Praxis des norddeutschen Raumes kaum vor.

Tabelle 1:

E <sub>s</sub> $\left[ \frac{\text{kp}}{\text{cm}^2} \right]$	40			400			1200		
ε (%)									
k $\left[ \frac{\text{cm}}{\text{s}} \right]$	5	2	1	5	2	1	5	2	1
10 <sup>-8</sup>	1,6"	16"	1'4"	20"	1'50"	5'40"	(46")	(3'20")	(9')
10 <sup>-9</sup>	16"	2'40"	10'40"	(3'20")	(19')	(57')	(7'40")	(33')	(1,5 <sup>h</sup> )

Für F = 10 cm<sup>2</sup>; h = 9 cm; λ = 0,625 cm<sup>5</sup>/kp · 10<sup>3</sup>

Wie schon unter Abschnitt 1 hervorgehoben, ist damit jedoch noch nicht zu beurteilen, welche Fehler bei kontinuierlicher Steigerung der Scherbeanspruchung (weggesteuerter Versuch) entstehen.



### 3. Versuche

#### 3.1 Bodenprobenauswahl

Die Tabelle 1 zeigt, daß der Meßfehler  $\epsilon$  umso größer ist, je größer die Steifezahl des Bodens  $E_s$  und je kleiner seine Durchlässigkeit  $k$  wird, d.h. je größer  $E_s/k$  ist. Für die Versuche wurde deshalb von den praktisch interessanten Böden Geschiebemergel und Beckenschluff ins Auge gefaßt. Bei Geschiebemergel ist i.M.  $E_s \approx 400 \text{ kp/cm}^2$  und  $k \approx 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm/s}$ ; der Beckenschluff hat zwar eine geringere Durchlässigkeit, dafür aber auch eine geringere Steifezahl, so daß insgesamt zu erwarten war, daß für ihn  $E_s/k$  nicht ungünstiger würde. Es wurde deshalb Geschiebemergel für die Versuche verwendet.

Mit dem so ausgewählten Wert  $E_s/k$  war zu erwarten, daß die bei den Scherversuchen auftretenden Meßfehler die größten sind, die bei den Böden des Küstenraumes vorkommen können. Stellt sich für sie heraus, daß der Meßfehler im weggesteuerten Versuch bei den üblichen Abschergeschwindigkeiten vernachlässigbar klein ist, so bestünde kein Anlaß, diese Abschergeschwindigkeiten zu vermindern.

Die Bodenproben wurden mittels back-pressure, d.h. einem Porenwasserdruck  $u_0$  gesättigt. (Das empfiehlt sich auch bei den meisten Routineuntersuchungen, weil man auf diese Weise den Kleinstwert der wirksamen Kohäsion erhält. Bei ungesättigten Proben bindigen Bodens kann man ja nie sicher sein, ob der Sättigungsgrad der Bodenprobe dem der Natur entspricht, z.B. als Folge von Gasblasenausscheidung aus dem Porenwasser bei der Entspannung des Grundwasserdruckes im Zuge der Probeentnahme aus dem Baugrund. Außerdem kann ungesättigtes Material im Laufe der Zeit in der Natur eine Sättigung erfahren, z.B. im Deich- und Dammbau).

#### 3.2 Versuchsdurchführung

##### 3.2.1 Ermittlung der $u(t)$ in Abhängigkeit von $\Delta V$ beim CU-Versuch

Die Versuchsanordnung ist gemäß Abb. 1 c) vorgenommen worden. Von dem Kompensations-Porenwasserdruckmeßgerät der Firma Geonor (6 auf Abb. 1 b) wurde der U-förmige, quecksilbergefüllte Teil verwendet und auf der einen Seite an die Bodenprobe, auf der anderen an eine steuerbare Druckquelle (7b auf Abb. 1 c) angeschlossen. Durch Steuerung dieser Druckquelle 7b konnten die Quecksilberspiegel in den beiden U-Schenkeln auf eine bestimmte Höhendifferenz  $\Delta H$  eingestellt werden, wobei den  $\Delta H$  ganz bestimmte Volumenvergrößerungen  $\Delta V$  des Meßsystems (3 auf Abb. 1 a) entsprechen, die an einer Skala (7a auf Abb. 1 c) abzulesen waren.

Mit der Volumenvergrößerung des Meßsystems  $\Delta V$  trat ein Abfall des anfänglich vorhandenen Porenwasserdruckes  $u(0,0)$  auf einen Wert  $u(\Delta V, 0)$  ein (s. Abb. 4 a). Um die Verbindung zur Bezeichnungsweise der Abb. 2 herzustellen, ist zu erläutern, daß  $u$

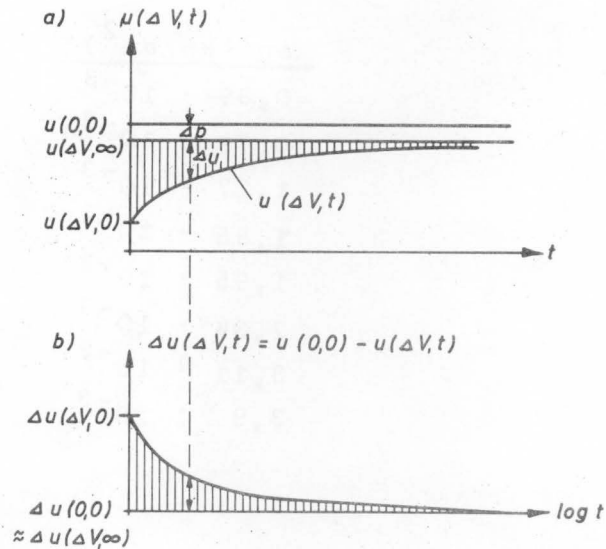


Abb.4 a) Zeitlicher Verlauf der Porenwasserdruckanzeige  $u(\Delta V, t)$  und ihr Endwert  $u(\Delta V, \infty)$   
 b) Zeitlicher Verlauf  $u(\Delta V, t)$  und Endwert  $u(\Delta V, \infty)$  des Porenwasserdruckmeßfehlers

jetzt nicht mehr nur von  $t$ , sondern auch von  $\Delta V$  abhängig gemacht wird, also  $u = u(\Delta V, t)$  ist. Der Verlauf von  $u(\Delta V, t)$  mit der Zeit wurde nun dadurch erhalten, daß die Druckquelle (7b auf Abb.1 c) so gesteuert wurde, daß  $\Delta V$  konstant blieb; der dazu erforderliche Druck war  $u(\Delta V, t)$ . Sein asymptotisches Ansteigen in Richtung des Wertes  $u(\Delta V, \infty)$  wurde, wie auf Abb.4 b) schematisch dargestellt, aufgetragen in der Form  $u(\Delta V, t)$ . Die Meßergebnisse für verschiedene  $\Delta V$  sind auf Abb.5 dargestellt.

Am Anfang des Abschnittes 1 ist bereits erläutert worden, daß neben Meßfehlern infolge der zeitlichen Verzögerung der Meßwertanzeige (das gesuchte Meßergebnis  $u(\Delta V, \infty)$  nach Abb.4 a) wird theoretisch erst nach  $\infty$  langer Zeit erhalten!) außerdem noch ein absoluter Meßfehler  $\Delta p$  nach Abb.4 a) infolge der Konsolidation der Bodenprobe um den Betrag  $\Delta V$  entsteht. Dieser Meßfehler ist zeitunabhängig, verschwindet also nicht mit zunehmender Zeit. Seine Größe kann mit der Drucksetzungslinie des untersuchten Bodenmaterials abgeschätzt werden, indem man

$$\Delta V = \Delta h \cdot F = \frac{\Delta p \cdot h}{E_s} \cdot F$$

setzt. Daraus folgt

$$\Delta p = u(0, 0) - u(\Delta V, \infty).$$

Es erweist sich, daß  $\Delta p$  gegenüber den  $\Delta u$  nach Abb. 4 a) stets vernachlässigbar klein ist. Für den untersuchten Geschiebemergel ergibt sich z.B. mit  $K = 3,4 \text{ cm}^5/\text{kp}$  nach Gleichung (1)

Tabelle 2:

$\Delta H$ (mm)	$\Delta p$ (kp/cm <sup>2</sup> )
1	$0,39 \cdot 10^{-3}$
2	$0,78 \cdot 10^{-3}$
3	$1,17 \cdot 10^{-3}$
4	$1,55 \cdot 10^{-3}$
5	$1,95 \cdot 10^{-3}$
6	$2,34 \cdot 10^{-3}$
8	$3,11 \cdot 10^{-3}$
10	$3,9 \cdot 10^{-3}$

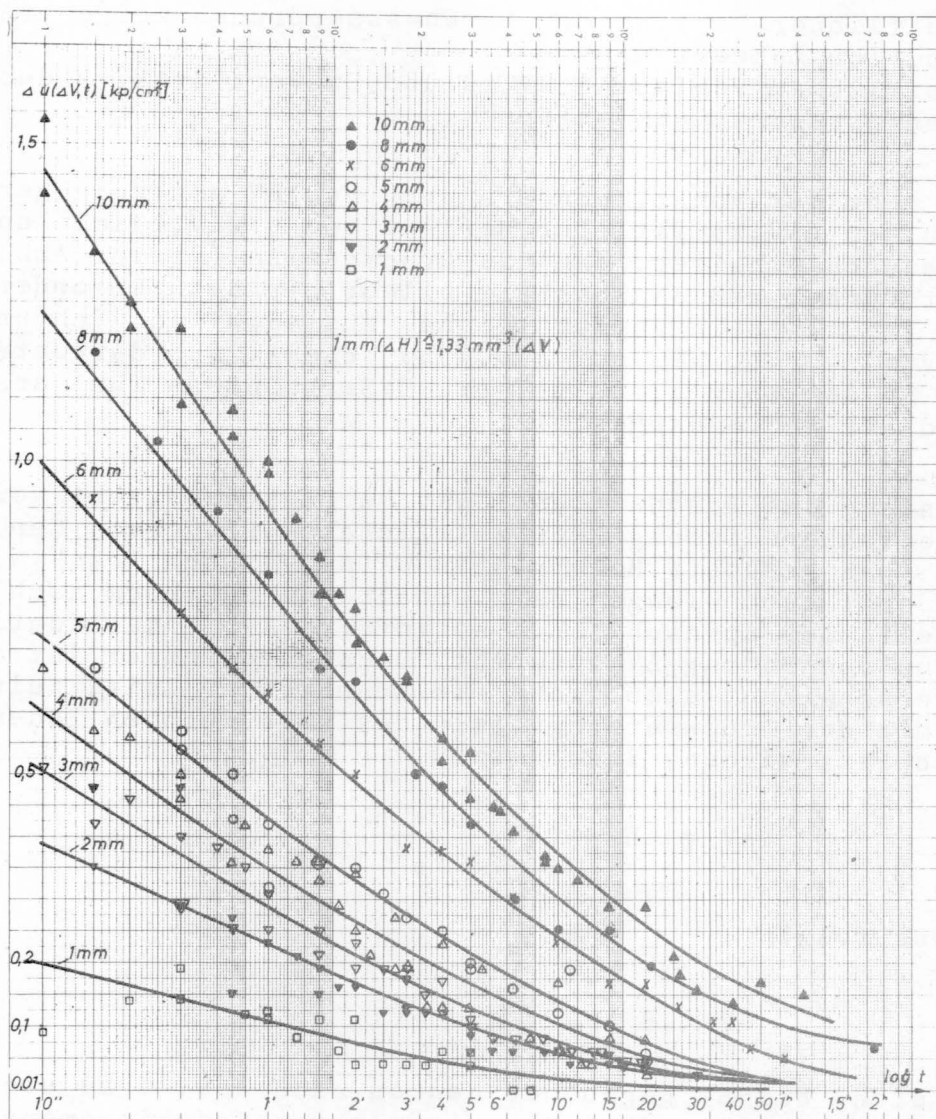


Abb. 5 Messungen des zeitlichen Verlaufs  $\Delta u(\Delta V, t)$  des Porenwasserdruckmeßfehlers

Auf Abb. 4 b) ist daher  $\Delta p = 0$  angenommen worden.

Eine kritische Betrachtung von Abb.5 zeigt gewisse Unregelmäßigkeiten, z.B. beim Vergleich der Ordinatendifferenzen zwischen den Kurven für  $\Delta H = 5$  und  $6$  mm mit denen zwischen den Kurven für  $\Delta H = 3,4$  und  $5$  mm. Die Ursache liegt in der Schwierigkeit, die Druckquelle 7b in Abb. 1 c) genau genug und stets mit gleichem Tempo zu steuern. Da die erreichte Genauigkeit im Rahmen der gestellten Aufgabe aber ausreicht, wurde auf die nur mit größerem Aufwand erreichbare gerätetechnische Verbesserung der Versuchsanlage verzichtet.

### 3.2.2 Ermittlung von $\Delta V$ in Abhängigkeit vom Druck für Maihak-Porenwasserdruckgeber

In Abb.6 sind die Volumenänderungen  $\Delta V$  zweier Maihakgeber<sup>1)</sup> in Abhängigkeit von aufgebrachtem Druck dargestellt. Die Ermittlung dieser Abhängigkeit erfolgte durch eine Anordnung nach Abb.1c), nur daß in diesem Falle mit Anschluß A statt der Triaxialzelle ein Maihakgeber verbunden wurde. (In die Untersuchung der Maihakgeber wurde ein Kupferrohranschluß, wie er zur Verbindung mit der Triaxialzelle verwendet wurde, einbezogen, um auch dessen Kompressibilität zu berücksichtigen).

Von den auf Abb.6 aufgetragenen Kurven zeigen zwei linearen und zwei gekrümmten Verlauf. Der gekrümmte Verlauf ist darauf zurückzuführen, daß die Entlüftung der Geber nicht vollständig gelang. So folgt der untere Teil der gekrümmten Kurven dem BOYLE-MARIOTTE'schen Gesetz und zeigt, daß mit steigendem Druck noch Luft gelöst wird. Zur Darstellung der Kompressibilität wurden nur die geraden Kurventeile verwendet, da die gekrümmten Teile stets mittels back-pressure ausgeschaltet werden. (Neben den genannten Gründen ist das also ein weiterer Anlaß für die Anwendung von back-pressure).

Es ergab sich für gut entlüftete Geber

$$\lambda_1 = 0,85 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{cm}^5}{\text{kp}} \right] \quad (4a)$$

für schlecht entlüftete Geber

$$\lambda_2 = 1,33 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{cm}^5}{\text{kp}} \right] \quad (4b)$$

---

1) Der Meßbereich der Geber beträgt  $0$  bis  $16 \text{ kp/cm}^2$ , das Auflösungsvermögen des Ablesegerätes  $0,2 \%$  des Skalenwertes. Der Einfluß der Temperatur- und Luftdruckänderung konnte bei der Meßvorrichtung vernachlässigt werden.

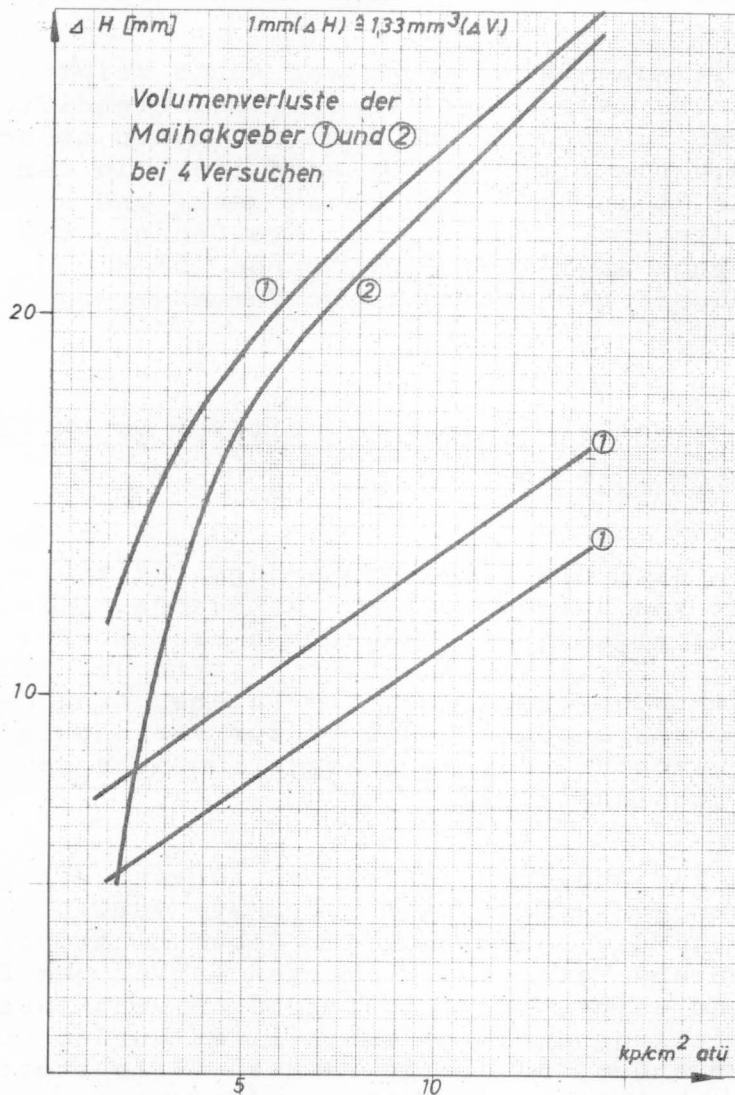


Abb.6 Darstellung der Kompressibilität des Porenwasserdruckmeßsystems bei schlechter (oben) und guter (unten) Entlüftung

#### 4. Anwendung der Versuchsergebnisse auf die Ermittlung der Meßfehler von Maihakgebern bei routinemäßigen CU-Triaxialversuchen

##### 4.1 B-Wert-Bestimmung

Wie erwähnt, ist es meistens zweckmäßig, die Bodenproben vor dem Scherversuch 100%ig zu sättigen. Die mittels back-pressure vorzunehmende Sättigung ist gelungen, wenn der B-Wert nach SKEMPTON [4] gleich 1 ist.

Bei der Sättigung und der B-Wert-Bestimmung wird der allseitige Druck in Stufen von etwa  $\Delta\sigma_3 = 0,5 \text{ kp/cm}^2$  erhöht. Dabei erleidet das Meßsystem mit dem Maihakgeber entsprechend dem  $\lambda$ -Wert von (4b) eine Volumenvergrößerung von

$$\Delta V = 0,5 \cdot \lambda = 0,5 \cdot 1,33 = 0,67 \text{ mm}^3$$

Solange die Probe nicht gesättigt ist, nimmt die Porenwasserdruckanzeige auch nach längerer Zeit nicht um diesen  $\Delta\sigma_3$ -Wert zu. Ist dann die Sättigung erreicht, dauert es jedoch auch noch eine gewisse Zeit, bis die Porenwasserdruckzunahme  $\Delta\sigma_3$  angezeigt wird. Es ist nun von praktischem Interesse zu wissen, wie lange es in diesem Fall dauert, bis die Anzeige genau genug ist. Das wird wie folgt festgestellt:

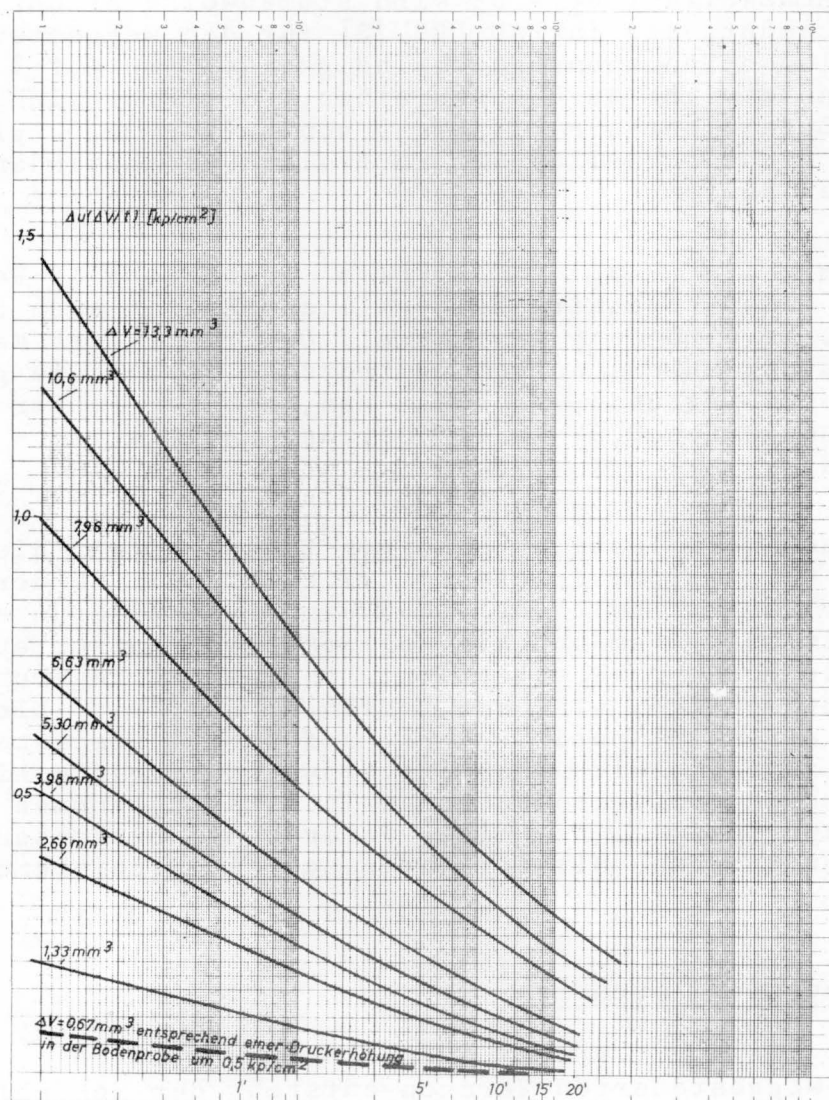


Abb.7 Interpolation des zeitlichen Verlaufs des Porenwasserdruckmeßfehlers nach Abb.5 bei einer Kompressibilität des Meßsystems nach Abb.6

Nach Abb.7 ergibt sich für den zu  $\Delta\sigma_3 = 0,5 \text{ kp/cm}^2$  gehörenden Wert von  $\Delta V = 0,67 \text{ mm}^3$  die aus den anderen extrapolierte, gestrichelte Kurve für  $u(\Delta V, t)$ . Aus dem Verlauf dieser Kurve erkennt man, daß der Meßfehler anfangs (nach 10")  $\Delta u = 0,07 \text{ kp/cm}^2$  beträgt, nach 5 bereits auf  $\Delta u = 0,015 \text{ kp/cm}^2$  abklingt und nach etwa 30' praktisch verschwindet. Je nachdem, wie genau man arbeiten will, muß man also die Ablesung des Porenwasserdruckes über einen gewissen Zeitraum ausdehnen. (Die Beschränkung des Kompressibilitätseinflusses auf die vorstehenden Werte war erst möglich, nachdem im Meßsystem Kunststoffleitungen gegen Kupferleitungen ausgetauscht worden waren).

#### 4.2 Kraftgesteuertes Abscheren

Die Achsiallast  $\sigma_1 - \sigma_3$  wird stufenweise erhöht. Wenn man sich dabei bemüht, die in EAU 89 [3] für den weggesteuerten Versuch empfohlenen Stauchungsgeschwindigkeiten von 0,1 % der Probenhöhe pro Minute nicht zu überschreiten, so ergibt sich erfahrungsgemäß, daß Zusatzlasten  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  von anfangs  $0,5 \text{ kp/cm}^2$ , später weniger und nicht schneller als in Dreiminutenabständen aufgebracht werden dürfen.

Der mit  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = 0,5 \text{ kp/cm}^2$  verbundene  $\Delta V$ -Wert ist i.a. kleiner als unter Abschnitt 4.1, weil der A-Wert nach SKEMPTON [4] i.a.  $< 1$  ist.  $\Delta V$  wird dann kleiner als  $0,67 \text{ mm}^3$ . Legt man der Ermittlung des Meßfehlers  $\Delta u(\Delta V, t)$  trotzdem wieder die gestrichelte Kurve der Abb.7 zugrunde, so sieht man, daß der Fehler nach 3 Minuten noch höchstens  $0,04 \text{ kp/cm}^2$  beträgt und mit  $1/3 < A < 1$  noch kleiner wird.

Bei hochvorbelasteten bindigen Böden besteht die Möglichkeit, daß  $A < 1/3$  wird. In diesem Falle entsteht in der Bodenprobe unter der Zusatzlast  $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$  ein Porenwasserunterdruck, dem ein  $\Delta V < 0$  im Meßsystem und ein Abfließen von Wasser aus dem Meßsystem in die Bodenprobe entspricht. Die Zeitverzögerung der Porenwasserdruckanzeige, d.h. der Meßfehler  $\Delta u(\Delta V, t)$  bleibt dabei derselbe, als wenn  $\Delta V$  positiv wäre, sofern die Steifezahl  $E_s$  für Be- und Entlastung gleich groß ist. Das kann für die hier ins Auge gefaßten hochvorbelasteten Böden in etwa angenommen werden, wie sich auch experimentell bei einer Porenwasserdruckmessung für einen Entlastungsvorgang mit dem untersuchten Geschiebemergel bestätigt hat.

#### 4.3 Weggesteuertes Abscheren

Beim weggesteuerten Versuch entsteht der Meßfehler nicht nur aus der augenblicklichen Änderung der Achsiallast  $d(\sigma_1 - \sigma_3)$ , sondern er entwickelt sich aus dem Integral der Meßfehler  $du(\Delta V, t)$  aller vorangegangenen Laststeigerungen  $d(\sigma_1 - \sigma_3)$ . Die Versuchsergebnisse der Abb.5 sind auf diesen Fall nicht mehr ohne weiteres anwendbar. Eine Abschätzung der Meßfehler, die infolge der Verzö-

gerung der Porenwasserdruckanzeige eintreten, ist hier einfacher aufgrund des Vergleiches der Versuchsspuren mehrerer weggesteuerter CU-Versuche mit unterschiedlichen Abschergeschwindigkeiten zu erhalten.

Auf Abb.8 sind die Spuren zweier CU-Versuche an Geschiebemergelproben mit verschiedenen Abschergeschwindigkeiten dargestellt. Sie liegen mit 0,2 bzw. 0,05 mm/min etwas ober- bzw. unterhalb der Geschwindigkeit von 0,1 mm/min, die in EAU 89 [3] für

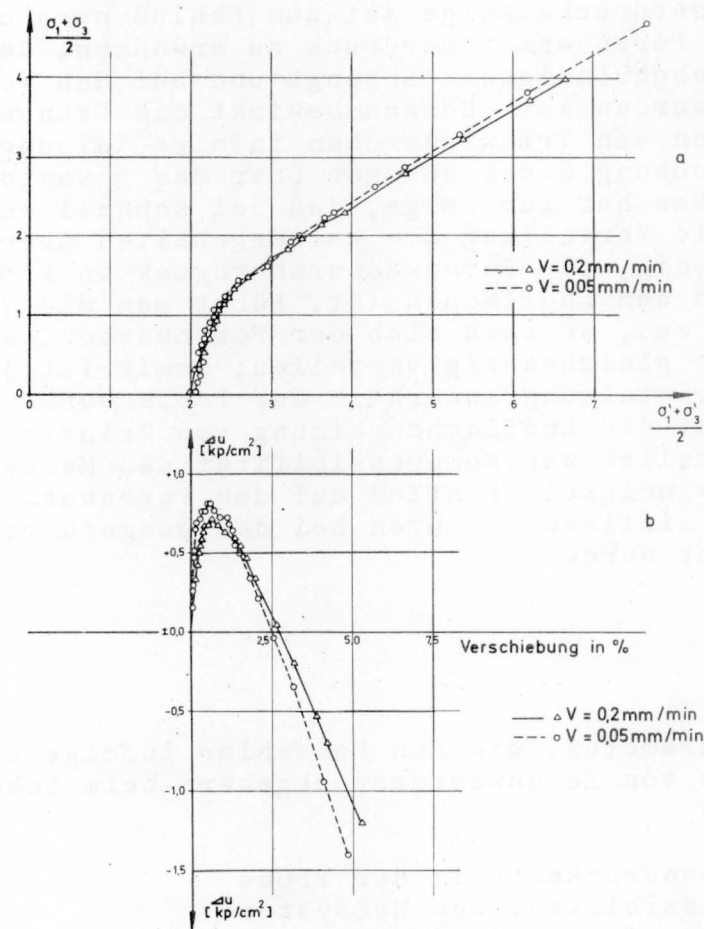


Abb.8 a) Einfluß des Porenwasserdruckmeßfehlers auf die Versuchsspur des weggesteuerten konsolidierten undrainierten Scherversuchs  
 b) Einfluß des Porenwasserdruckmeßfehlers auf die Änderung des Porenwasserdruckes beim weggesteuerten konsolidierten, undrainierten Scherversuch



solche Böden empfohlen wird. Dabei zeigt sich, daß noch erkennbare Unterschiede in der Porenwasserdruckanzeige bei den verschiedenen gewählten Geschwindigkeiten auftreten, und zwar ist die Anzeige niedriger, wenn schneller abgeschert wird. Für den Routineversuch können diese Unterschiede als vernachlässigbar angesehen werden. Wird eine höhere Genauigkeit gefordert, so kann man bei Versuchen mit Geschiebemergel auf den auch von BISHOP und HENKEL [2] empfohlenen Wert von 0,04 mm/min zurückgehen.

## 5. Einfluß der Endflächenreibung

Neben dem Einfluß der Kompressibilität des Meßsystems auf die Porenwasserdruckanzeige ist zum Schluß noch ein anderer Einfluß auf den Porenwasserüberdruck zu erwähnen, der ebenfalls von der Abschergeschwindigkeit abhängt und auf den von SKEMPTON [5] hingewiesen worden ist. Danach bewirkt die Dehnungsbehinderung an den Endflächen von Triaxialproben infolge Reibung, daß sich die Scherbeanspruchung nicht homogen über das gesamte Probenvolumen entwickelt. Das hat zur Folge, daß bei schnell ausgeführten Versuchen nur die Verteilung des Wassergehaltes über das Probenvolumen gleichmäßig, der Porenwasserüberdruck in Probenmitte dagegen anders als an den Endflächen ist. Führt man die Versuche aber sehr langsam aus, so kann sich der Porenwasserüberdruck über das Probenvolumen gleichmäßig verteilen; damit ist jedoch eine Wassergehaltsumverteilung innerhalb der Probe verbunden. Wie man sieht, bewirkt die Endflächenreibung von Triaxialproben beim CU-Versuch zusätzlich zur Kompressibilität des Meßsystems, daß die Abschergeschwindigkeit Einfluß auf den Porenwasserüberdruck hat. Diese beiden Einflüsse konnten bei den ausgeführten Versuchen nicht getrennt werden.

## 6. Schluß

Die Parameter, die den Meßfehler infolge unvollkommener Volumenkonstanz von Porenwasserdruckgebern beim Scherversuch beeinflussen, sind

1. die Zusammendrückbarkeit der Probe
2. die Kompressibilität des Meßsystems
3. die Durchlässigkeit der Probe
4. die Entlüftung der Meßflüssigkeit
5. die Zeit.

Durch Verbesserung des Versuchsgerätes in den Punkten 2 und 4 kann der Fehler soweit herabgesetzt werden, daß er für Routineversuche mit den üblichen Bedingungen (back-pressure, Vorschub nach EAU 89 [3]) vernachlässigt werden kann. Für wissenschaftliche Untersuchungen, bei denen der genaue Verlauf des Spannungspfades interessant ist, sollte die zulässige Abschergeschwindigkeit durch Versuche bestimmt werden. Außerdem sollte man dann die Endflächen der Triaxialproben schmieren.

7. Schrifttum

- [1] GIBSON, R.E. : An analysis of system flexibility and its effect on time - lag in pore-water pressure measurements.  
Geotechnique, Vol.I (1963) S.1-11
- [2] BISHOP u. HENKEL : The measurement of soil properties in the triaxial test.  
London: Edward Arnold Ltd., 1969
- [3] EAU : Empfehlungen des Arbeitsausschusses für Ufereinfassungen.  
4.Aufl., Berlin/München/Düsseldorf;  
Verl. Wilh. Ernst u. Sohn, 1971
- [4] SKEMPTON, A.W. : The pore pressure coefficients A and B.  
Geotechnique, Vol.IV (1954) S.143-147
- [5] SKEMPTON, A.W. : Horizontal stresses in an over-consolidated Eocene clay.  
Proc. of the 5th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Paris, Vol.I (1961)  
S.351-357.

