

Baugrund, Untersuchung von Bodenproben
Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts
 Teil 1: Laborversuche

DIN
18130-1

ICS 93.020

Ersatz für
Ausgabe 1989-11

Deskriptoren: Baugrund, Bodenprobe, Wasserdurchlässigkeit, Laborversuch

Soil, investigation and testing —
 Determination of the coefficient of water permeability —
 Part 1: Laboratory tests
 Sol, reconnaissance et essais —
 Détermination du coefficient de perméabilité à l'eau —
 Partie 1: Essais de laboratoire

Inhalt

	Seite		Seite
Vorwort	2	6.4 Verhinderung der Umläufigkeit	7
1 Anwendungsbereich	2	6.5 Sättigung	7
2 Normative Verweisungen	2	6.6 Spannungszustände des Probekörpers	8
3 Definitionen	2	6.7 Auswahl der Versuchsanordnung	8
3.1 Durchfluß	2	7 Ermittlung der Durchlässigkeit	
3.2 Filtergeschwindigkeit	2	in ausgewählten Versuchsanordnungen	8
3.3 Standrohrspiegelhöhe	3	7.1 Untersuchung im Kompressions-Durchlässig-	
3.4 Hydraulischer Höhenunterschied	3	keitsgerät mit statischer Belastung des	
3.5 Hydraulisches Gefälle	3	Probekörpers	8
3.6 Durchlässigkeitsbeiwert	3	7.2 Untersuchung im Versuchszylinder	
3.7 Durchlässigkeitsbereich	3	mit Standrohren	10
3.8 Versuchsklasse	3	7.3 Untersuchung in der Triaxialzelle	12
4 Bezeichnung	3	7.4 Untersuchung im Versuchszylinder	14
5 Versuchsgrundlagen	3	8 Auswertung der Versuche	16
5.1 Allgemeines	3	8.1 Versuch mit konstantem hydraulischen Gefälle	16
5.2 Korngröße, Korngrößenverteilung		8.2 Versuch mit veränderlichem hydraulischen Gefälle	16
und Korngefüge	3	8.3 Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts	
5.3 Dichte	4	von der Porenzahl	16
5.4 Beschaffenheit des Wassers	4	8.4 Angabe der Versuchsergebnisse	16
5.5 Sättigungszahl	4	9 Anwendungsbeispiele	17
5.6 Hydraulisches Gefälle	4	9.1 Bestimmung der Durchlässigkeit im	
5.7 Temperatur	5	Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit	
5.8 Probenabmessungen	5	statischer Belastung des Probekörpers nach 7.1	17
6 Bestandteile von Versuchsanordnungen	5	9.2 Bestimmung der Durchlässigkeit	
6.1 Erzeugung des hydraulischen Gefälles	5	im Versuchszylinder mit Standrohren nach 7.2	18
6.2 Messung der Standrohrspiegelhöhen	6	9.3 Bestimmung der Durchlässigkeit	
6.3 Messung der durchströmenden Wassermenge ..	6	in der Triaxialzelle nach 7.3	18
		9.4 Bestimmung der Durchlässigkeit	
		im Versuchszylinder nach 7.4	19

Fortsetzung Seite 2 bis 20

Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.

Vorwort

Die Ausgabe dieser Norm wurde vom Normenausschuß Bauwesen im DIN e. V. im Arbeitsausschuß 05.03.00 "Baugrund, Versuche und Versuchsgeräte" erarbeitet.

DIN 18130 "Baugrund, Untersuchung von Bodenproben — Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts" besteht aus:

— Teil 1: Laborversuche

Folgende Normen dieser Reihe befinden sich zur Zeit in Vorbereitung:

— Feldversuche

Änderungen

Gegenüber der Ausgabe November 1989 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Anpassung an überarbeitete Normen
- Aufnahme des Beispiels "Untersuchung im Versuchszylinder"
- Wegfall des Beispiels "Untersuchung bei Sättigungsdruck und bei im Verhältnis zum Porenwasserdruck kleinem Unterschied der Standrohrspiegelhöhen"
- Allgemeine redaktionelle Überarbeitung der Norm
- Änderung der Normbezeichnung

Frühere Ausgaben

DIN 18130-1: 1983-11, 1989-11

1 Anwendungsbereich

Diese Norm gilt für die Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts von Böden (Lockergestein) durch Laborversuche (im folgenden kurz: Durchlässigkeit). Die Versuchsergebnisse werden im Grund- und Erdbau angewendet. Sie sind Grundlage z. B. für die Berechnung von Grundwasserströmungen und zur Beurteilung der Durchlässigkeit von künstlich hergestellten Dichtungs- oder Filterschichten.

2 Normative Verweisungen

Diese Norm enthält durch datierte oder undatierte Verweisungen Festlegungen aus anderen Publikationen. Diese normativen Verweisungen sind an den jeweiligen Stellen im Text zitiert, und die Publikationen sind nachstehend aufgeführt. Bei datierten Verweisungen gehören spätere Änderungen oder Überarbeitungen dieser Publikationen nur zu dieser Norm, falls sie durch Änderung oder Überarbeitung eingearbeitet sind. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe der in Bezug genommenen Publikation.

DIN 4021

Baugrund — Aufschluß durch Schürfe und Bohrungen sowie Entnahme von Proben

DIN 4022-1

Baugrund und Grundwasser — Benennen und Beschreiben von Boden und Fels — Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels

DIN 18125-2 : 1986-05

Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte — Bestimmung der Dichte des Bodens — Feldversuche

DIN 18127

Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte — Proctorversuch

DIN 18137-2 : 1990-12

Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte — Bestimmung der Scherfestigkeit — Triaxialversuch

DIN 18196

Erd- und Grundbau — Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

3 Definitionen

Für die Anwendung dieser Norm gelten die folgenden Definitionen:

3.1 Durchfluß Q

Quotient aus dem Wasservolumen V_w , das eine bestimmte Querschnittsfläche A (Feststoffe und Poren) eines Probekörpers durchfließt und der dazu benötigten Zeit t (siehe Bild 1):

$$Q = \frac{V_w}{t} \quad (1)$$

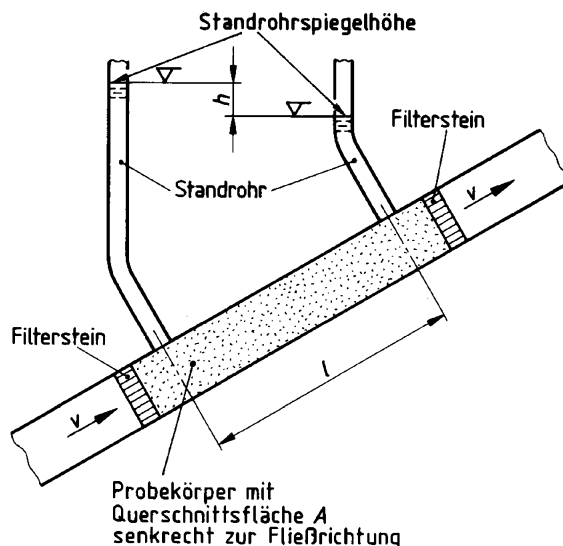


Bild 1: Strömungsvorgang in einer Bodenprobe

3.2 Filtergeschwindigkeit v

Quotient aus Durchfluß Q und zugehöriger Querschnittsfläche A senkrecht zur Fließrichtung:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

3.3 Standrohrspiegelhöhe

Diejenige Wasserspiegelhöhe in einem bestimmten Querschnitt, die sich während des Strömungsvorganges in einem — wirklichen oder gedachten — genügend hohen Rohr einstellt, das an diesen Querschnitt angeschlossen ist, ohne die Strömung merklich zu stören (siehe Bild 1).

3.4 Hydraulischer Höhenunterschied h

Differenz zweier Standrohrspiegelhöhen in zwei Querschnitten des Probekörpers (siehe Bild 1).

3.5 Hydraulisches Gefälle i

Quotient aus hydraulischem Höhenunterschied h und der durchströmten Länge l (Abstand der Ansatzpunkte der Standrohre in Fließrichtung) des Probekörpers:

$$i = \frac{h}{l} \quad (3)$$

3.6 Durchlässigkeitsbeiwert k

Quotient aus Filtergeschwindigkeit v und dem hydraulischen Gefälle i bei laminarer Durchströmung des wassergesättigten Bodens

— allgemein (Fließgesetz von DARCY):

$$k = \frac{v}{i} = \text{const.} \quad (4)$$

ANMERKUNG: Die Durchlässigkeit teilgesättigter Böden ist stets kleiner als die Durchlässigkeit gesättigter Böden (siehe auch Anmerkung 2 zu 5.5).

3.7 Durchlässigkeitsbereich

Eine bestimmte Spanne von Durchlässigkeitsbeiwerten.

ANMERKUNG: Für bautechnische Zwecke werden fünf Durchlässigkeitsbereiche definiert (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Durchlässigkeitsbereiche in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert

k m/s	Bereich
unter 10^{-8}	sehr schwach durchlässig
10^{-8} bis 10^{-6}	schwach durchlässig
über 10^{-6} bis 10^{-4}	durchlässig
über 10^{-4} bis 10^{-2}	stark durchlässig
über 10^{-2}	sehr stark durchlässig

3.8 Versuchsklasse

Klasse, in der Durchlässigkeitsversuche erfaßt werden, die unter jeweils gleichen Bedingungen bezüglich Wassersättigung und Art der Strömung (siehe Tabelle 4) ablaufen.

ANMERKUNG: Die Versuchsklassen stufen die Durchlässigkeitsversuche danach ein, in welchem Maße sie eine fehlerfreie Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes k des gesättigten Bodens ermöglichen.

4 Bezeichnung

Bezeichnung des Laborversuchs zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts an feinkörnigem Boden im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät (KD) mit Messung des hydraulischen Gefälles in einem Standrohr (ES) und des Wasservolumens im Standrohr (ST) sowie mit statischer Belastung (SB) des Probekörpers, Versuchsklasse 3:

Versuch DIN 18130 — KD — ES — ST — SB — 3

5 Versuchsgrundlagen

5.1 Allgemeines

Der Durchfluß und das hydraulische Gefälle müssen an der zu untersuchenden Bodenprobe zuverlässig gemessen werden können. Die Versuchsanordnung ist entsprechend zu wählen. Anhaltspunkte hierfür geben die Korngrößenverteilung und das Korngefüge des Bodens. Des weiteren ist der Einfluß von Dichte, Beschaffenheit des Wassers und Sättigung des Porenraums zu beachten. Diese Bedingungen sollten im Versuch den Verhältnissen im Feld möglichst treu angepaßt werden (siehe 5.3, 5.4 und 5.5), da sie von Einfluß auf das Ergebnis sind. Sie müssen bei der Deutung des Versuchsergebnisses berücksichtigt werden und sind im Versuchsbericht zu nennen (siehe 8.4).

Ergebnisse, die aus unterschiedlichen Versuchsanordnungen erhalten wurden, sind nur miteinander vergleichbar, wenn die Versuchsanordnungen der Versuchsklasse 1 genügen.

5.2 Korngröße, Korngrößenverteilung und Korngefüge

Die Korngröße bestimmt die Mindestabmessungen der Proben (siehe 5.8). Korngrößenverteilung und Korngefüge dürfen sich während der Durchströmung nicht verändern.

ANMERKUNG: Feinkörnige Proben sind in der Regel schwächer durchlässig, grobkörnige Proben stärker durchlässig. Bei gleichem Korndurchmesser d_{10} ist eine ungleichförmige Probe bei sonst gleichen Verhältnissen weniger durchlässig als eine gleichförmige. Auch kolloidale Eigenschaften des Feinkorns können die Durchlässigkeit herabsetzen.

Fein- und gemischtkörnige Böden haben bei Krümelstruktur infolge der vorhandenen Grobporen eine größere Durchlässigkeit als bei homogener Verteilung der Körner. Krümelstruktur ist bei gestörten und mit niedrigem Wassergehalt künstlich aufbereiteten fein- und gemischtkörnigen Proben zu erwarten.

Geschichtete Böden und Böden mit plattigen oder stabförmigen Körnern mit bevorzugter Orientierung weisen parallel zur Schichtung oder der Kornorientierung eine größere Durchlässigkeit auf als senkrecht dazu.

Bei zu hohem hydraulischen Gefälle können insbesondere in gemischtkörnigen und stark durchlässigen Böden Kornumlagerungen während des Versuchs zu einer Veränderung der Durchlässigkeit führen.

Ebenso kann es insbesondere bei feinkörnigen Böden mit geringen Feinstkornanteilen zu Kolmationen an den Filtersteinen kommen, wodurch eine zu geringe Durchlässigkeit vorgetäuscht wird. In diesem Falle sollte der Versuch mit kleinem hydraulischen Gefälle begonnen und das hydraulische Gefälle allmählich gesteigert werden.

5.3 Dichte

Die Dichte der Probe darf sich während der Durchströmung nicht ändern.

Ist der Einfluß der Dichte auf die Durchlässigkeit zu prüfen, dann sind mindestens drei Durchströmungsversuche mit jeweils unterschiedlichen Porenzahlen des Probekörpers auszuführen (siehe 8.3).

ANMERKUNG: Mit zunehmender Dichte nimmt die Durchlässigkeit bei gleicher Korngrößenverteilung und gleichartiger Einregelung der Körner ab.

5.4 Beschaffenheit des Wassers

Das für den Versuch zu verwendende Wasser darf weder aus dem Probekörper Bestandteile herauslösen noch gelöste oder in Schwebel befindliche Teile in dem Probekörper ablagern noch die kolloidchemische Beschaffenheit des Bodens verändern. Nach Möglichkeit ist ein dem Porenwasser ähnliches Wasser zu verwenden. In der Regel genügt entlüftetes Leitungswasser. In besonderen Fällen (z. B. marine Sedimente) ist das Wasser aufzubereiten oder zur Sicherstellung der natürlichen Bedingungen besonders zu beschaffen.

5.5 Sättigungszahl

Die Sättigungszahl darf sich während der Meßphase nicht ändern, oder es darf sich das Meßergebnis bei Wiederholung der Messung mit gleichem hydraulischen Gefälle nicht mehr ändern. Dies ist gegeben, wenn bei konstantem Druck und konstantem Gefälle die in die Probe einströmende der aus ihr austretenden Wassermenge gleich ist.

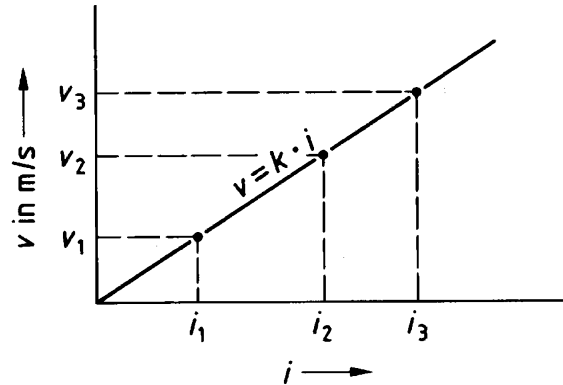
ANMERKUNG 1: Diese Anforderung ist durch volle Sättigung der Probe am einfachsten zu erfüllen. Der bei voller Sättigung ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert k ist zugleich die Bodenkenngroße, die die Durchlässigkeit des Korngerüsts beschreibt. Luftporen verengen nämlich den Durchflußquerschnitt und können damit eine Verringerung der Durchlässigkeit bewirken.

ANMERKUNG 2: Die Sättigungszahl beeinflusst die Durchlässigkeit eines Bodens wesentlich. Generell gilt: Je höher die Sättigungszahl, desto größer ist die Durchlässigkeit.

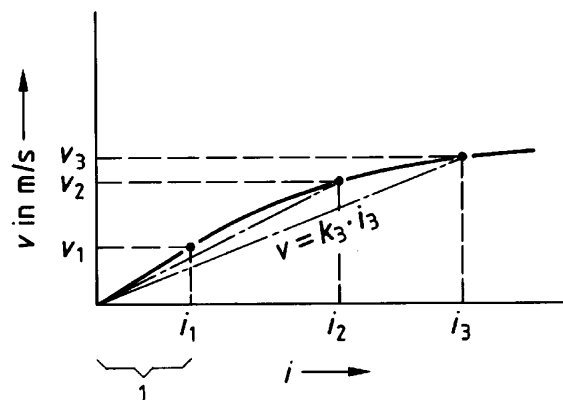
5.6 Hydraulisches Gefälle

Das hydraulische Gefälle darf im Versuch nach praktischen Gesichtspunkten gewählt werden, solange das Durchströmungsverhalten dem Fließgesetz von DARCY entspricht (linearer Strömungsbereich, siehe Bild 2a)), solange das Korngefüge nicht verändert wird (siehe 5.2) und durch die Durchströmung keine Konsolidierung oder Schwellung der Probe bewirkt wird.

In den Fällen, in denen das Durchströmungsverhalten nicht linear ist (siehe Bild 2b) und 2c)), muß das hydraulische Gefälle im Labor den Verhältnissen im Feld angepaßt werden.

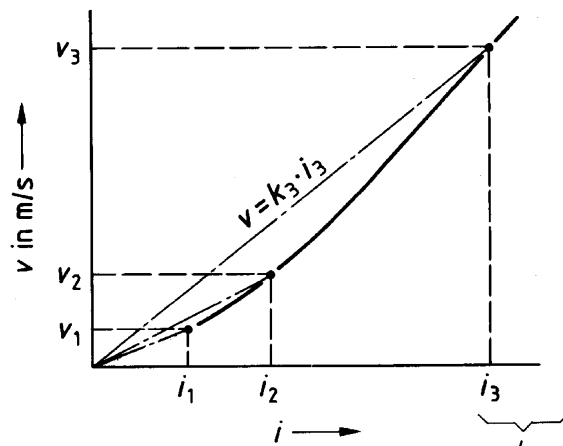


a) für lineare Strömung (Gesetz von DARCY)
 $k_1 = k_2 = k_3 = \text{const.}$



1 linearer Bereich

b) für turbulente Strömungen in grobkörnigen Böden (postlinearer Bereich)
 $k_1 = k > k_2 > k_3$



4 linearer Bereich

c) für Strömung in feinkörnigen Böden, die durch diffuse Wasserhüllen eingeeengt ist (prälinearer Bereich)
 $k_1 < k_2 < k_3$

Bild 2: Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v und hydraulischem Gefälle i

Für praktische Belange reicht es aus, auch die Strömungsvorgänge, die vom linearen Fließgesetz abweichen, mit der Geradengleichung (4) auszuwerten. Es ergibt sich dann eine Abhängigkeit des ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerts vom hydraulischen Gefälle

$$k_T = f(i) \quad (5)$$

ANMERKUNG 1: Bei grobkörnigen Böden — insbesondere bei lockerer Lagerung — weicht das Fließverhalten oberhalb bestimmter hydraulischer Gefälle vom linearen Verhalten nach dem DARCY-Gesetz ab, die Fließgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem hydraulischen Gefälle infolge des Einflusses von Trägheitskräften unterlinear zu (postlinearer Bereich, siehe Bild 2b).

Bei der Durchströmung feinkörniger Böden mit kleinen hydraulischen Gefällen kann die Fließgeschwindigkeit mit kleiner werdendem hydraulischen Gefälle unterlinear abnehmen (prälinearer Bereich, siehe Bild 2c)), da die fest an die Wände der Porenkanäle gebundenen Wassermoleküle (diffuse Wasserhüllen der Tonminerale) die Strömung einengen.

ANMERKUNG 2: Der rechnerische Durchlässigkeitsbeiwert für Strömungsvorgänge außerhalb des Gültigkeitsbereiches des DARCY-Gesetzes nimmt gegenüber dem k -Wert für den DARCY-Bereich stark ab. Für grobkörnige Böden nimmt der rechnerische k -Wert mit zunehmendem hydraulischen Gefälle ab, für feinkörnige Böden wird er mit abnehmendem hydraulischen Gefälle kleiner.

5.7 Temperatur

Die Versuche sind bei annähernd konstanter Raumtemperatur durchzuführen, wobei die Temperatur des Probekörpers und des Wassers sich dieser Temperatur angepaßt haben müssen.

ANMERKUNG 1: Die Zähigkeit des Wassers ist von der Temperatur abhängig. Deshalb werden bei gleichem Gefälle die Fließgeschwindigkeit und damit der k -Wert von der Temperatur des Wassers beeinflusst.

Der im Versuch festgestellte k -Wert wird auf eine Vergleichs-Temperatur von 10°C umgerechnet. Nach Poiseuille ist:

$$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} k_T = \alpha \cdot k_T \quad (6)$$

Dabei ist:

- T die Wassertemperatur beim Versuch, in °C;
- k_T der ermittelte Durchlässigkeitsbeiwert bei der Temperatur T , in m/s;
- α der Korrekturbeiwert (siehe Tabelle 2).

**Tabelle 2: Korrekturbeiwert α
zur Berücksichtigung der Zähigkeit des Wassers**

Temperatur T °C	5	10	15	20	25
α	1,158	1,000	0,874	0,771	0,686

Zwischenwerte können geradlinig eingeschaltet werden.

ANMERKUNG 2: Die Vergleichs-Temperatur $T = 10^\circ\text{C}$ entspricht der durchschnittlichen Temperatur des Grundwassers. Es können je nach Anwendungsfall auch andere Temperaturen maßgebend sein.

5.8 Probenabmessungen

Durchmesser und Höhe der Probe sind so zu wählen, daß sich Inhomogenitäten der Probe nicht mehr auf das Versuchsergebnis auswirken können.

Die Mindestabmessungen richten sich nach dem in der Probe enthaltenen Größtkorn und nach dem Versuchsgerät.

Das Verhältnis Größtkorn zu Probendurchmesser bzw. Probenhöhe sollte 1 : 5 bei ungleichförmigen und 1 : 10 bei gleichförmigen Böden nicht unterschreiten.

Bei bindigen Böden sollte die Querschnittsfläche mindestens $A = 10 \text{ cm}^2$ betragen, bei grobkörnigen Böden mindestens $A = 20 \text{ cm}^2$, sofern die Versuchsgeräte nach Abschnitt 7 keine größeren Abmessungen bedingen.

6 Bestandteile von Versuchsanordnungen

6.1 Erzeugung des hydraulischen Gefälles

6.1.1 Konstantes hydraulisches Gefälle

Das hydraulische Gefälle wird als konstant bezeichnet, wenn sich die Differenz zwischen der Standrohrspiegelhöhe des in den Probekörper einströmenden Wassers (Oberwasser) und der Standrohrspiegelhöhe des ausströmenden Wassers (Unterwasser) während einer Messung nicht merklich ändert.

Die Spiegelhöhe des Oberwassers wird am einfachsten mit Hilfe eines Überlaufgefäßes erzeugt, dem mehr Wasser zugeführt wird als durch den zu untersuchenden Probekörper strömt (siehe Bild 6). Größere Drücke können z. B. durch Luftdruck über eine luftundurchlässige Membrane bzw. über eine Öltrennschicht erzeugt werden. Der Unterwasserspiegel wird durch einen definierten Gegendruck (siehe Bild 9) oder durch einen Überlauf konstant gehalten, über den die zu messende Wassermenge abläuft (siehe Bild 6).

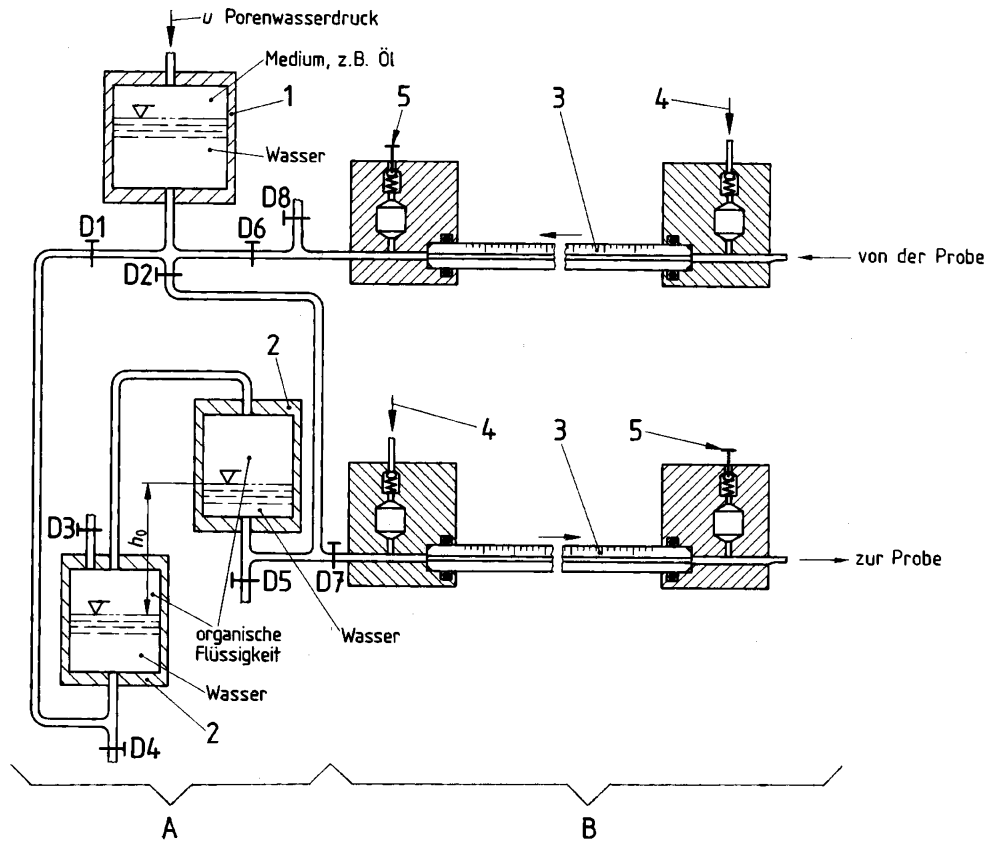
Der Unterwasserspiegel muß bei einer Durchströmung von unten nach oben über der Oberfläche des Probekörpers liegen. Wird die Probe von oben nach unten durchströmt, muß der Unterwasserspiegel oberhalb der Probenunterkante liegen. Die Unterwasserspiegelhöhe ist während einer Messung in beiden Fällen auf $\pm 1\%$ der Spiegelhöhendifferenz konstant zu halten.

Sehr kleine Unterschiede der Standrohrspiegelhöhen können z. B. mittels Differenzdruckaufnehmer gemessen oder unter Ausnutzung des Wichteunterschiedes zwischen Wasser und Flüssigkeit geringerer Dichte in einem Differenzdruckerzeuger eingestellt werden (siehe Bild 3, Vorrichtung A):

$$h = \frac{h_0 (\gamma_w - \gamma_{\text{org}})}{\gamma_w} \quad (7)$$

Dabei ist:

- h_0 der Höhenunterschied der Trennspiegel, in m (siehe Bild 3);
- γ_w die Wichte des Wassers, in kN/m^3 ;
- γ_{org} die Wichte der organischen Flüssigkeit, in kN/m^3 .



- | | | | |
|---|-----|--|-----|
| 1 Vorratsbehälter mit entlüftetem Wasser | } A | 3 Kalibrierte Glaskapillare | } B |
| 2 Differenzdruckerzeuger | | 4 Anschluß zum Einpressen einer Luftblase in die Glaskapillare | |
| h_0 Höhenunterschied der Trennspiegel | | 5 Entlüftung | |
| D ₁ bis D ₈ Ventile | | | |

Bild 3: Vorrichtung A zur Erzeugung sehr kleiner hydraulischer Gefälle und Vorrichtung B zum Messen kleiner Durchflußmengen

6.1.2 Veränderliches hydraulisches Gefälle

Das hydraulische Gefälle wird durch eine Wassersäule in einem Standglas erzeugt, deren Spiegelhöhe während des Versuchs abnimmt (siehe Bild 5).

Für die Ermittlung der Durchlässigkeit wird die Spiegelhöhe der Wassersäule im Standrohr in bestimmten Zeitabständen gemessen.

Bei schnellem Absinken der Wassersäule im Standrohr ist es stattdessen zweckmäßiger, die Zeiten zu messen, in denen der sinkende Wasserspiegel Markierungen des Standrohrs durchwandert.

Bei geringem Standrohrdurchmesser können sehr kleine Wassermengen direkt im kalibrierten Standrohr gemessen werden; deshalb ist diese Versuchsanordnung besonders für feinkörnige Probekörper geeignet.

6.1.3 Strömungsrichtungen

Bei den Versuchsanordnungen nach 6.1.1 und 6.1.2 sollte der Probekörper grundsätzlich von unten nach oben, darf aber auch von oben nach unten durchströmt werden.

Bei Durchströmung von unten nach oben muß durch Auflast oder Einspannung verhindert werden, daß sich die Probe auflockert.

6.2 Messung der Standrohrspiegelhöhen

Bei durchlässigen bis stark durchlässigen Probekörpern wird der hydraulische Höhenunterschied nur längs eines Teils des durchströmten Probekörpers mit Standrohren gemessen (siehe Bild 6), um Spiegelhöhenverluste außerhalb der Probe und Störungseinflüsse an den Enden des Probekörpers auf das Meßergebnis auszuschalten. Die Standrohre sollten einen lichten Durchmesser von 3 bis 4 mm haben und vom oberen und unteren Rand des Probekörpers in einem Abstand von etwa 30 mm angeordnet werden. Das in den Probekörper einbindende Ende ist gegen Verstopfung durch ein Feinsieb zu schützen. Bei schwach durchlässigen Böden sind die Spiegelhöhenverluste außerhalb des Probekörpers vernachlässigbar klein, so daß der Spiegelhöhenunterschied zwischen Oberwasser und Unterwasser dem Spiegelhöhenunterschied zwischen den Enden des Probekörpers gleichgesetzt werden kann.

6.3 Messung der durchströmenden Wassermenge

Die zur Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts maßgebende Wassermenge ist bei stationärer Strömung zu messen. Die stationäre Strömung kann exakt nur durch

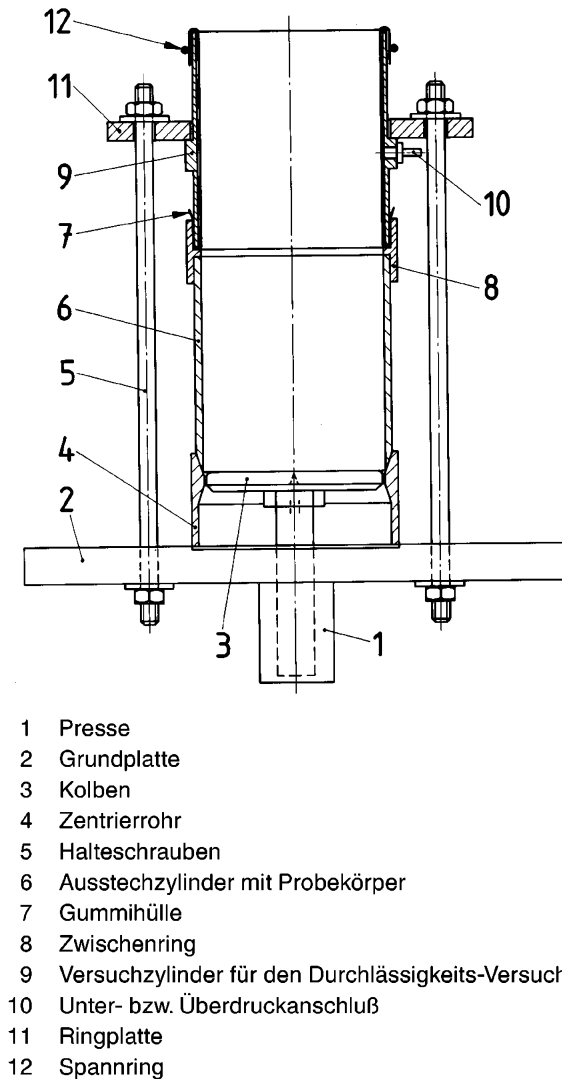


Bild 4: Vorrichtung zum Ummanteln eines Probekörpers mit einer Gummihülle

Vergleich der ein- und ausströmenden Wassermenge kontrolliert werden. Auf einen stationären Strömungszustand kann auch geschlossen werden, wenn bei konstantem Strömungsgefälle die in der Zeiteinheit ein- oder ausströmende Wassermenge gleich bleibt.

ANMERKUNG: Der Nachweis des stationären Strömungszustandes kann im Einzelfall sehr schwierig und zeitaufwendig sein. Die versuchstechnischen Schwierigkeiten und Randeinflüsse nehmen mit abnehmendem k -Wert zu. Insbesondere bei sehr schwach durchlässigen Böden werden sehr kleine Wassermengen der Messung zugrunde gelegt, auf die z.B. Volumenänderungen des Porenwassers infolge von Temperaturänderungen Einfluß haben können.

Bei Versuchen mit konstantem hydraulischen Gefälle und größeren durchströmenden Wassermengen wird das unterwasserseitig überlaufende Wasser gemessen.

Sehr geringe Wassermengen werden zweckmäßig mittels Piezometern (siehe Bild 5), Büretten (siehe Bild 8) oder mit Hilfe kalibrierter Glaskapillaren gemessen, in denen als Marke jeweils eine Luftblase von der Strömung mitgeführt wird (siehe Bild 3, Vorrichtung B).

Bei geringen Wassermengen ist auf mögliche Verfälschung der Meßergebnisse durch Verdunsten zu achten. Eventuell kann diese Fehlerquelle durch Erhöhung des hydraulischen Gefälles vermieden werden, falls die in 5.2 und 5.6 besprochenen Umstände nicht dagegen sprechen. Während des Meßvorgangs darf keine die Wassermenge nennenswert verändernde Konsolidation der Probe auftreten.

In Versuchen mit veränderlichem hydraulischen Gefälle ist die durchströmende Wassermenge gleich dem Innenvolumen des Standrohres, das sich aus der Höhendifferenz zweier Ablesungen ergibt.

6.4 Verhinderung der Umläufigkeit

Bei ungestörten Probekörpern können durch eingelagerte Steine und Fremdkörper sowie Hohlräume entlang der Wand des Versuchszylinders Umläufigkeiten auftreten, die eine höhere Durchlässigkeit vortäuschen.

Augenscheinlich vorhandene Gänge an der Zylinderwand sind abzudichten, z. B. mit Bentonit. Ist bei grobkörnigen Probekörpern eine Umläufigkeit entlang der Zylinderwand infolge größerer Bestandteile anders nicht auszuschließen, sollte der Ausstechzylinder vor der Probenentnahme mit einem festen Belag mit niedrigem Schmelzpunkt (z. B. Paraffin) ausgekleidet werden, so daß durch Erwärmen nach Probenentnahme eine Ver kittung der Anschlußfuge herbeigeführt werden kann.

Das Abdichtmittel darf in die Probe nicht eindringen. Dieses ist nach Versuchsdurchführung zu überprüfen. Standfeste Probekörper können zur Verhinderung der Umläufigkeit in einen Versuchszylinder gestellt werden, dessen Innendurchmesser um einige Millimeter größer als der Durchmesser des Probekörpers ist. Der Zwischenraum wird durch eine Vergußmasse ausgefüllt.

Mit einem Versuchsgerät nach Bild 4 kann ein standfester Probekörper zur Verhinderung der Umläufigkeit in einen Versuchszylinder eingeschoben werden, der mit einer Gummihülle aus Latex ausgekleidet ist. Beim Einbau wird die Gummihülle durch Unterdruck an die Behälterwand gezogen. Der Innendurchmesser des Versuchszylinders muß um mehr als das Doppelte der Gummidicke größer als der des Ausstechzylinders sein. Während der Versuchsdurchführung wird die Gummihülle mit einem Druck gegen den Probekörper gedrückt, der unter Beachtung der Zustandsform des Probekörpers um 10 bis 50 kN/m² über dem höchsten Druck des Porenwassers liegt. Dieser Außendruck muß durch Wasser aufgebracht werden, da Latex nicht luftdicht ist. Anordnungen zur Verhinderung von Umläufigkeit bei standfesten Probekörpern zeigen die Bilder 8, 9 und 10.

ANMERKUNG: Wird der Druck, mit der die Gummihülle gegen den Probekörper gedrückt wird, zu groß gewählt, so führt herausgedrücktes Porenwasser (Konsolidation des Probekörpers) zu Verfälschungen des Versuchsergebnisses.

Das beschriebene Vorgehen ist auch für den Einbau von Probekörpern in Gummihüllen zur Bestimmung der Durchlässigkeit in Triaxialzellen (siehe Abschnitt 6) geeignet.

6.5 Sättigung

Um den Bedingungen der Versuchsklasse 1 zu genügen, muß die Probe vor dem Versuch gesättigt werden.

Feinkörnige und gemischtkörnige Böden sowie Sande werden durch Aufbringen eines Sättigungsdrucks gesättigt. Dazu wird das Porenwasser in dem Probekörper mit einem hydrostatischen Druck (Sättigungsdruck, back pressure) belastet (siehe Tabelle 3). Dies ist nur mit den Versuchsanordnungen nach Bild 8 und Bild 9 möglich.

**Tabelle 3: Sättigungsdruck u_0
in Abhängigkeit von der Sättigungszahl S_r**

S_r	u_0 kN/m ²
$\geq 0,95$	300
0,90	600
0,85	900

Der aufgebrauchte Sättigungsdruck muß während des Durchströmungsvorganges aufrechterhalten bleiben.

Die Sättigung ist beendet, wenn die Probe unter dem Sättigungsdruck kein Wasser mehr aufnimmt (siehe 6.2.6 von DIN 18137-2 : 1990-12).

ANMERKUNG 1: Künstlich aufbereitete Probekörper sind in der Regel nicht voll wassergesättigt. Gleiches trifft für Proben zu, bei denen sich das Porenwasser bei der Entnahme entspannt hat, so daß gelöstes Gas freigesetzt wird. Im durchströmenden Wasser gelöste Luft kann sich auch während des Strömungsvorgangs in dem Probekörper ausscheiden und damit zu einer Verringerung der Durchlässigkeit führen.

ANMERKUNG 2: Bei Sanden sollte die Probe zunächst mit CO₂-Gas (Luftaustausch) und danach mit Wasser durchströmt werden.

6.6 Spannungszustände des Probekörpers

Um den Einfluß des Porenanteils auf die Durchlässigkeit zu ermitteln, wird der Versuch bei stark zusammendrückbaren Probekörpern unter verschiedenen Spannungszuständen durchgeführt. Eine äußere statische Belastung ist auch bei Aufbringen eines Sättigungsdrucks (siehe 6.6) oder bei Durchströmung von unten nach oben (siehe 6.2) aus Gleichgewichtsgründen erforderlich.

6.7 Auswahl der Versuchsanordnung

Es bestehen verschiedene Möglichkeiten der Versuchsanordnung (siehe Tabelle 5). Die Versuchsanordnung ist entsprechend den jeweiligen Erfordernissen des Anwendungsfalls zusammenzustellen. Bei Auswahl der Versuchsanordnung ist zu beachten, ob der Durchlässigkeitsbeiwert bei voller Wassersättigung und stationärer Strömung benötigt wird, ob eine Bestimmung bei nicht voller Wassersättigung mit stationärer Strömung ausreicht oder ob nur eine überschlägliche Ermittlung ohne Kontrolle der stationären Strömung genügt.

Entsprechend diesen Bedingungen werden die Versuche in drei Versuchsklassen eingeteilt (siehe Tabelle 4).

Im folgenden Abschnitt werden Beispiele verschiedener Versuchsanordnungen beschrieben.

7 Ermittlung der Durchlässigkeit in ausgewählten Versuchsanordnungen

7.1 Untersuchung im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit statischer Belastung des Probekörpers

7.1.1 Bodenarten, Probengröße

Der Versuch eignet sich für feinkörnige Böden, insbesondere für Tone und Schluffe. Die Probe sollte einen Durchmesser von mindestens 70 mm und eine Höhe von mindestens 20 mm haben.

7.1.2 Geräte

- Anlage zum Entlüften von Wasser
- Vorratsbehälter für entlüftetes Wasser
- Ausstech- oder Beschneidegeräte
- Abgleichlineal
- Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit Standrohr und Belastungseinrichtung (siehe Bild 5) und Bodenplatte mit spiralförmiger Rille unter dem Filterstein (siehe A-A)

7.1.3 Anordnung

Die Versuchsanordnung entspricht einem Versuch mit veränderlichem hydraulischen Gefälle nach 6.1.2 (siehe Bild 5). Es wird ein Kompressions-Durchlässigkeitsgerät benutzt, an das ein Standrohr so angeschlossen ist, daß der Probekörper von unten nach oben durchströmt wird. Zur Füllung des Standrohrs wird diesem über ein Dreiwegeventil entlüftetes Wasser aus einem Vorratsbehälter zugeleitet. Damit das entlüftete Wasser im Vorratsbehälter nicht mit Luft in Berührung kommt, ist dieser mit einer luftdichten, beweglichen Haut verschlossen. Das Standrohr ist zur genauen Volumenbestimmung zu kalibrieren. Sein Durchmesser ist der Durchlässigkeit des Probekörpers anzupassen (z. B. $d = 4$ mm bei $k < 10^{-9}$ m/s). Die im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät eingebauten Filtersteine müssen hinreichend durchlässig sein ($k > 10^{-6}$ m/s). Ihre Durchlässigkeit ist regelmäßig zu prüfen; dabei ist der Einfluß der Ventile und Zuleitungen zu berücksichtigen.

7.1.4 Durchführung

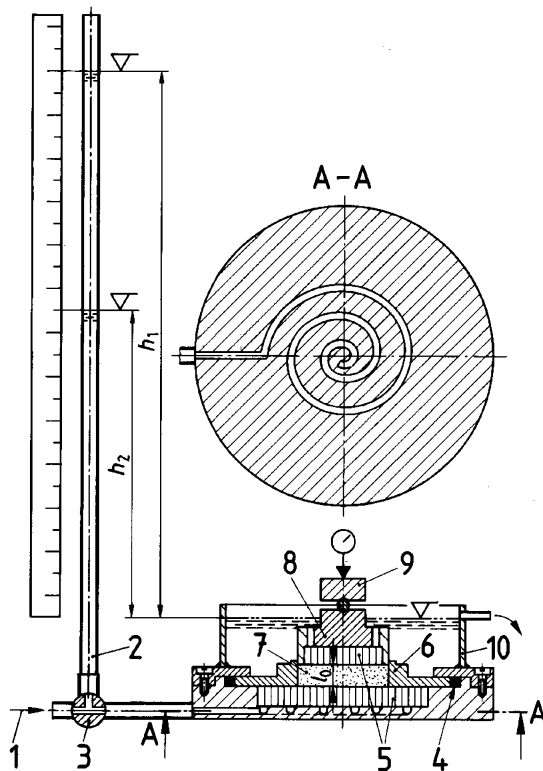
7.1.4.1 Vorbereitung der Versuchsgeräte

Nach der Füllung des Vorratsbehälters mit entlüftetem Wasser sind die Lufteinschlüsse im Versuchsgerät zu beseitigen. Dabei werden Zuleitungen und die Kammern des unteren Filtersteins mit entlüftetem Wasser gefüllt. Der Filterstein selbst wird durch Kochen in Wasser entlüftet und in die wassergefüllte Kammer gedrückt.

Tabelle 4: Einteilung der Versuche in Versuchsklassen, abhängig von den einzuhaltenden Bedingungen

Versuchsklasse	Wassersättigung nachgewiesen und kontrolliert nach DIN 18137-2	Strömung stationär nachgewiesen
1a	ja	ja
1b	ja	nein*)
2	nein	ja
3	nein	nein

*) Die stationäre Strömung wird nicht nachgewiesen. Aufgrund der Versuchsbedingungen, insbesondere aufgrund der vorausgegangenen Phase der Wassersättigung kann aber angenommen werden, daß die Strömung stationär ist.



- 1 Zuführung von entlüftetem Wasser
 - 2 Aufsetzbares Standrohr (Piezometer), mit Querschnittsfläche A
 - 3 Dreiwegeventil
 - 4 Gummidichtung
 - 5 Filtersteine
 - 6 Probenring
 - 7 Probekörper
 - 8 Kopfplatte für statische Belastung
 - 9 Vorrichtung für vertikale Belastung und Meßuhr für Zusammendrückung
 - 10 Wasserbehälter mit Überlauf für konstante Bezugshöhe
- h_1 Wasserspiegelhöhe zu Beginn der Messung
 h_2 Wasserspiegelhöhe zum Zeitpunkt t
 l_0 Höhe des Probekörpers (gleich Länge der Sickerstrecke)

ANMERKUNG: Bei Nachweis stationärer Strömung darf der Versuch der Versuchsklasse 2 zugeordnet werden.

Bild 5: Versuchsanordnung für Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit statischer Belastung des Probekörpers und veränderlichem hydraulischen Gefälle, Versuchsklasse 3

Prüfung DIN 18130 — KD — ES — ST — SB — 3

7.1.4.2 Herstellung des Probekörpers

Ist die Durchlässigkeit einer Bodenprobe der Güteklasse 1 oder 2 nach DIN 4021 zu untersuchen, so ist aus dieser der Probekörper mit einem Ausstechring herauszuschneiden. Je nach Bauweise des Versuchsgerätes wird der Ausstechring anschließend als Probenring verwendet oder die Probe aus dem Ausstechring in den Probenring des Versuchsgerätes hineingedrückt. Im zweiten Fall muß der Probenring zuvor aus dem Versuchsgerät ausgebaut werden. Zur Vermeidung von Umläufigkeiten sind etwa vorhandene Hohlräume an den zylindrischen Seitenflächen mit Hilfe eines flachen Stahlstabes (Querschnitt etwa 1 mm × 2,5 mm) vorsichtig von der Ober- und Unterseite des Probekörpers her bis jeweils zur Probemitte mit gestörtem Boden aus der Probe zu verstopfen. Die Endflächen werden sorgfältig in Höhe des Ringrandes abgeglichen, ohne dabei die Oberfläche der Probe zu verschmieren. Der Probenring wird in das Kompressions-Durchlässigkeitsgerät eingesetzt, dann wird die Gummidichtung angepreßt.

Eine gestörte Bodenprobe, z. B. Schüttmaterial, ist auf die gewünschte Dichte zu verdichten. Dies kann direkt im Probenring oder im Proctorgerät nach DIN 18127 geschehen. Aus dieser Bodenprobe wird dann der Probekörper in der vorstehend beschriebenen Weise entnommen und in das Kompressions-Durchlässigkeitsgerät eingebaut.

7.1.4.3 Konsolidierung

Der nach 7.1.4.2 eingebaute Probekörper wird unter senkrechter statischer Belastung, die über die Kopfplatte (siehe Bild 5) aufgebracht wird, konsolidiert. Aus Gleichgewichtsgründen muß die senkrechte Spannung größer

sein als der beim anschließenden Durchlässigkeitsversuch zusätzlich auf die Probe wirkende hydrostatische Druck. Das bei der Konsolidierung in den unteren Filtersteinen ausgepreßte Porenwasser muß druckfrei abgeleitet werden. Die Verbindung zwischen Standrohr und Kompressions-Durchlässigkeitsgerät ist während der Konsolidationsphase geschlossen. Das Ende der Konsolidierung wird durch den mit der Meßuhr (siehe Bild 5) gemessenen zeitlichen Ablauf der Zusammendrückung bestimmt.

7.1.4.4 Bestimmung der Durchlässigkeit

Nach Abschluß der Konsolidation wird das Standrohr (siehe Pos. Nr 2) von unten nach oben bis zur oberen Meßmarke gefüllt.

Dann wird es durch Drehung des Dreiwegeventils (siehe Pos. Nr 3) mit der Zuleitung zum Kompressions-Durchlässigkeitsgerät verbunden, so daß die Durchströmung des Probekörpers beginnt. Es wird entweder das Absinken des Wasserspiegels im Standrohr in bestimmten Zeitabständen oder die Absinkzeit zwischen zwei Meßmarken gemessen (siehe 5.1.2). Die Zeitabstände bzw. der Abstand der Meßmarken sind in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Probekörpers festzulegen.

Bei jeder Ablesung wird in der Regel auch die Temperatur gemessen. Der Durchlässigkeitsversuch darf beendet werden, wenn sich aus den Messungen ein annähernd gleichbleibender k -Wert ergibt. Die Wasserzuführung zum Kompressions-Durchlässigkeitsgerät wird dann geschlossen, die statische Belastung des Probekörpers erhöht und die Messung der Durchlässigkeit nach Abschluß der Konsolidation erneut durchgeführt. Bild 5 zeigt ein Beispiel für eine Versuchsanordnung.

Tabelle 5: Geeignete Versuchsanordnungen in Abhängigkeit von den Bodenarten

Bodenart	Erreichbare Versuchsklasse	Bauteil zur Aufnahme des Probekörpers			Messung des hydraulischen Gefälles			Messung des Wasservolumens			Statische Belastung	Sättigungsdruck
		Versuchszylinder	Kompres-sions-Durch-lässig-keits-gerät	Triaxial-zelle	mehrere Stand-rohre	ein Stand-rohr	Druck-erzeuger	Meß-zylinder	Stand-rohr oder Bürette	Kapillare		
		ZY	KD	TX	MS	ES	DE	MZ	ST	KP	SB	UO
Ton, Schluff	3 3 1	X	X	X	X — —	X X —	X — X	(X) — —	X X (X)	— — X	(X) X X	— — X
Feinsand	2 2 (1)	X	—	X	X —	X —	— X	X X	X —	— —	— X	— X
Mittel- und Grobsand	2	X	—	—	X	X	—	X	X	—	—	—
Sand-Kies-Gemisch	2	X	—	—	X	(X)	—	X	(X)	—	—	—
Sand-Ton-Gemisch	2 3 1	X	X	X	X — —	X X X	X — X	(X) — (X)	X X X	— — X	(X) X X	— — X
Kies-Sand-Ton-Gemisch	2 1	X	—	X	— —	X —	X X	(X) (X)	X —	— X	— X	— X
Dabei ist: X geeignet (X) bedingt geeignet — nicht geeignet												

7.2 Untersuchung im Versuchszylinder mit Standrohren

7.2.1 Bodenarten

Der Versuch eignet sich für Sande, Kiese, Sand-Kies-Gemische (Mindestprobenabmessungen siehe 5.8).

7.2.2 Geräte (siehe Bild 6)

- Anlage zum Entlüften von Wasser
- Vorrichtung zum Einstampfen des Bodens
- Versuchszylinder mit einem Durchmesser $d > 4$ cm bzw. $d > 5 \cdot \text{max. Korndurchmesser}$ und Anschlüssen für seitliche Standrohre
- Standrohre (Piezometer mit Meßmarkierung)
- Meßgefäße mit gelochtem Deckel
- zwei Überlaufgefäße zum Festlegen des Ober- und Unterwasserspiegels
- Moosgummi oder ähnliches zur Beseitigung von Randundichtheiten

7.2.3 Anordnung

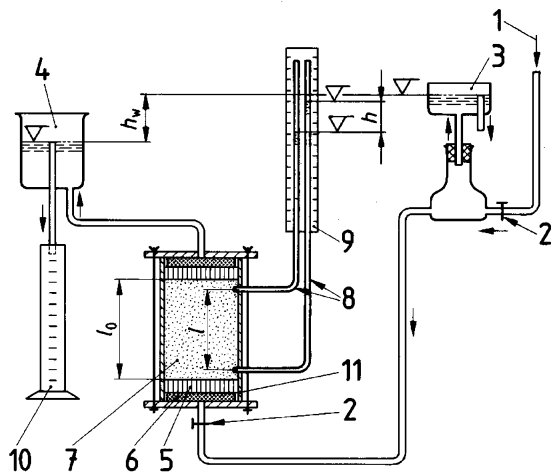
Für Böden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert $k > 10^{-2}$ m/s ist eine Entlüftungsanlage zur Aufbereitung des Versuchswassers erforderlich, um laufend ausreichende Mengen entlüfteten Wassers der Versuchsanlage zuleiten zu können (siehe Bild 7). In der Entlüftungsanlage kann das Wasser entweder durch Versprühen unter hohem Vakuum oder durch Durchsickern eines Feinsandfilters

entlüftet werden. Die im Filter aufgefangene Luft muß bei längerer Versuchsdauer in bestimmten Zeitabständen entfernt werden.

Von der Entlüftungsanlage wird das Wasser in einem durchsichtigen Schlauch dem Überlauf O (Oberwasser) und von hier dem Versuchgerät zugeleitet. Der Zufluß von der Entlüftungsanlage zum Überlauf O wird durch eine Schlauchklemme oder ein Kugelventil reguliert (siehe Bild 6).

ANMERKUNG: Die Regulierung des Durchflusses durch Schlauchklemmen oder Kugelventile vermeidet plötzliche Querschnittsänderungen, die zur Bildung von Luftblasen führen können.

Die Menge des den Probekörper je Zeiteinheit durchströmenden Wassers wird durch Einstellung der Höhendifferenz zwischen Überlauf O (Oberwasserspiegel) und Überlauf U (Unterwasserspiegel) reguliert. Am Versuchszylinder müssen mindestens zwei Standrohre seitlich angebracht sein, deren Einlauföffnungen in den Probekörper hineinreichen sollten. Die Standrohre dienen dazu, das hydraulische Gefälle in dem Probekörper außerhalb des Bereichs der Leitungs- und Einströmungsverluste zu messen; sie sollten daher vom unteren und oberen Rand des Probekörpers mindestens 30 mm Abstand haben. Zur gleichmäßigen Einleitung des Wassers in den Probekörper muß ein Verteilerraum vorhanden sein, der vom Filter (bzw. vom Versuchsmaterial) durch eine mit Drahtgewebe abgedeckte Lochplatte getrennt wird. Die gleiche Anordnung ist unterwasserseitig zwischen Filter und Auslauf des Versuchszylinders vorzusehen.

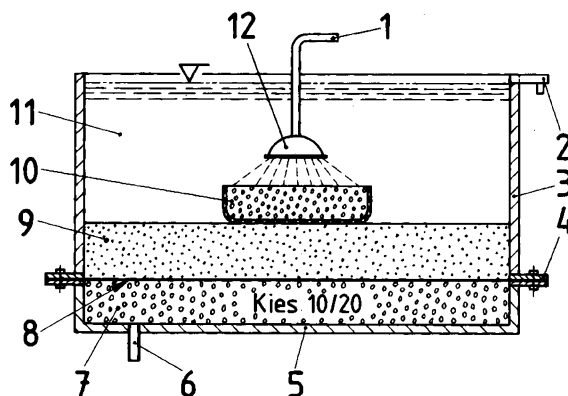


- 1 Zuführung von entlüftetem Wasser
- 2 Schlauchklemme oder Kugelventil
- 3 Überlauf O (Oberwasser)
- 4 Überlauf U (Unterwasser)
- 5 Filter
- 6 Lochplatte mit Drahtgewebe
- 7 Probekörper
- 8 Standrohr (Piezometer)
- 9 Meßstab
- 10 Meßzylinder
- 11 Versuchszyylinder
- h Differenz der Standrohrspiegelhöhen
- h_w Höhendifferenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel
- l durchströmte Länge
- l_0 Höhe des Probekörpers
- Versuchsklasse 3

ANMERKUNG: Bei Nachweis stationärer Strömung darf der Versuch der Versuchsklasse 2 zugeordnet werden.

Bild 6: Versuchsanordnung für Versuch mit Standrohren, konstantem hydraulischen Gefälle und Messung des Wasservolumens im Meßzylinder, Versuchsklasse 3

Versuch DIN 18130 – ZY – MS – MZ – 3



- 1 Wasserzulauf
- 2 Überlauf
- 3 Oberteil
- 4 Unterteil
- 6 Ablauf mit Ventil
- 7 Kies 10/20
- 8 Filtertuch
- 9 Feinsand
- 10 Sieb mit Kies
- 11 Wasser
- 12 Brause

Bild 7: Beispiel einer Anlage zur Wasserentlüftung

7.2.4 Durchführung

7.2.4.1 Vorbereitung der Versuchsgерäte

Die Schlauchverbindungen zwischen Entlüftungsbehälter und Überlauf O sowie zwischen Überlauf O und Versuchszyylinder werden angeschlossen und die beiden Schlauchklemmen (Kugelventile) geschlossen. Nach Einschalten der Entlüftungsanlage wird die Schlauchklemme zwischen Entlüftungsbehälter und Überlauf O geöffnet, der Überlauf gefüllt und dabei der Schlauch entlüftet. Anschließend wird der Verbindungsschlauch zum Versuchszyylinder durch Öffnen der unteren Schlauchklemme entlüftet; dann werden beide Schlauchklemmen geschlossen.

7.2.4.2 Herstellung des Probekörpers

Auf die untere Lochplatte mit Drahtgewebe wird, falls erforderlich, eine (15 ± 1) mm dicke Filterschicht aufgebracht.

Der getrocknete und homogenisierte Boden wird in Lagen in den Versuchszyylinder eingebracht. Die Dicke dieser Lagen ist so gering zu halten, daß keine Entmischung auftreten kann. Auch eine örtliche Anhäufung von Grobkörnern ist zu vermeiden. Um eine bestimmte Dichte zu erreichen, ist die für eine Lage erforderliche Materialmenge auszuwägen und durch gleichmäßiges Andrücken oder durch Einstampfen mit einem Stößel auf die gewünschte, zweckmäßigerweise an der Versuchszyylinderwand markierte Dicke zu verdichten.

Wird gleichkörniger Kies untersucht, so ist zur Ausschaltung von Randundichtheiten an der Innenwand des Versuchszyinders Moosgummi oder ähnliches einzulegen.

Nach dem Einbau der Gesamtmenge wird die obere Endfläche des Probekörpers abgeglichen, erforderlichenfalls eine (15 ± 1) mm dicke Filterschicht aufgebracht, das Drahtgewebe mit Lochplatte aufgelegt und die Kopfplatte auf dem Versuchszyylinder befestigt.

7.2.4.3 Bestimmung der Durchlässigkeit

Nach dem Einbau des Probekörpers werden die Standrohre am Versuchszylinder angebracht und der Schlauch vom oberen Ausfluß zum Überlauf U angeschlossen. Die Höhe des Überlaufes U wird so eingestellt, daß das gewünschte hydraulische Gefälle erreicht wird.

Die Schlauchklemme zwischen der Entlüftungsanlage und dem Überlauf O wird so weit geöffnet, daß Wasser über den Überlauf abfließt. Dann wird die Schlauchklemme am Zulauf des Versuchszylinders vorsichtig geöffnet. Dabei darf der Wasserspiegel in dem Probekörper nur langsam ansteigen, so daß keine Luftblasen in den Poren eingeschlossen werden. Hat der Wasserspiegel den Überlauf U erreicht, wird die Schlauchklemme am Versuchszylinderzulauf ganz geöffnet. Die Zulaufmenge zum Überlauf O ist so zu regeln, daß weiterhin Wasser über den Überlauf ausläuft. Zur Entfernung unvermeidlicher kleiner Lufteinschlüsse im Probekörper muß das entlüftete Wasser vor Beginn der Ablesungen den Probekörper eine gewisse Zeit durchströmen.

Vor dem eigentlichen Durchlässigkeitsversuch wird die Schlauchklemme am Versuchszylinder nochmals geschlossen. Die Wasserspiegel in den Piezometern müssen nun auf gleicher Höhe mit dem Unterwasserspiegel stehen. Ist dies nicht der Fall, so ist die Funktion der Piezometer gestört (z. B. durch Lufteinschlüsse oder Verstopfung). Sind der Probekörper entlüftet und die Piezometer funktionsfähig, so wird die untere Schlauchklemme wieder entfernt und der Wasserzulauf durch Einstellen der Schlauchklemme zwischen Entlüftungsbehälter und Überlauf so geregelt, daß das Wasser im ruhigen Strahl über die Überlaufkante des letzteren abfließt. Ist dies nicht zu erreichen, muß die Wasserspiegeldifferenz der beiden Überläufe verringert werden.

Zur Bestimmung des k -Wertes ist die im Meßzylinder aufgefangene Wassermenge in bestimmten Zeitabständen zu ermitteln. Außerdem ist die Temperatur des Wassers im Meßzylinder zu messen.

Bei lockeren und grobkörnigen Probekörpern sind die Versuche bei sehr kleiner Wasserspiegeldifferenz zu beginnen und mit größerer Wasserspiegeldifferenz zu wiederholen. Nimmt dabei der Quotient Wassermenge zu Wasserspiegeldifferenz ab, so sind die Ergebnisse durch Turbulenz beeinflusst (siehe Bild 2b)).

7.3 Untersuchung in der Triaxialzelle

7.3.1 Bodenarten

Die Versuche eignen sich für alle Bodenarten mit Durchlässigkeitsbeiwerten $k < 10^{-5}$ m/s (Mindestprobenabmessungen siehe 5.8).

7.3.2 Versuch mit isotroper statischer Belastung

7.3.2.1 Geräte (siehe Bild 8)

- Anlage zum Entlüften von Wasser
- Vorrichtung zum Einstampfen des Bodens
- Form zur Probeherstellung
- Triaxialzelle mit geschlossener Kopfplatte zur Erzeugung isotroper statischer Belastung für Probekörper mit einer Querschnittsfläche $A \geq 10 \text{ cm}^2$ bzw. $d \geq 5 \times \text{max. Korndurchmesser}$ und Höhe $h \geq 5 \times \text{max. Korndurchmesser}$
- Vorrichtung zur Erzeugung konstanten Wasserdrucks in der Triaxialzelle
- Druckerzeuger mit Überdruckmeßgerät

7.3.2.2 Anordnung

Der Versuch wird mit einer Anordnung für konstantes hydraulisches Gefälle (siehe 6.1.1) nach Bild 8 durch-

geführt. Es wird ein Versuchsgerät verwendet, dessen Maße auf das vorhandene Größtkorn abgestimmt sind (siehe 7.3.2.1) und das die Erzeugung eines konstanten Wasserdrucks in der Triaxialzelle ermöglicht. Der Probekörper wird von einer Gummihülle umschlossen sowie unten und oben durch je einen Filterstein begrenzt. Diese Filtersteine müssen ausreichend durchlässig sein, d. h. ihr Durchlässigkeitsbeiwert muß mindestens um eine Zehnerpotenz über desjenigen des Probekörpers liegen. Das Probenkopfstück sowie der Sockel müssen für eine gleichmäßige Durchströmung des Probekörpers sowie zur Entlüftung eine spiralförmige Rille haben. An das Versuchsgerät wird ein Druckerzeuger angeschlossen, der mit entlüftetem Wasser beschickt wird und dieses unter konstantem Druck an den Probekörper abgibt. Der Probekörper wird von unten nach oben durchströmt. Die Gummihülle steht dabei unter einem konstanten Zelldruck, der größer ist als der Oberwasserdruck. Der Zelldruck muß so groß sein, daß die effektiven Spannungen im Eingangsbe- reich der Bodenprobe beim Durchströmen einen ausreichenden Abstand vom Grenzzustand behalten.

Der Oberwasserdruck wird in der Anordnung nach Bild 8 durch Druckluft erzeugt. Der Unterwasserspiegel in Pos. Nr 7 muß höher als die Oberseite des Probekörpers liegen.

Die Wassermenge, die den Probekörper durchströmt, wird mit Hilfe des Meßzylinders (siehe Pos. Nr 8) gemessen.

7.3.2.3 Durchführung

7.3.2.3.1 Vorbereitung der Versuchsgeräte

Nach Öffnen des Ventils Pos. Nr 14.4 wird der Druckbehälter mit entlüftetem Wasser gefüllt. Dann wird die Verbindungsleitung zur Triaxialzelle geöffnet; diese und die Verbindungsleitungen im Versuchsgerät werden so lange durchströmt, bis angenommen werden kann, daß alle Lufteinschlüsse entfernt sind. Die Filtersteine sind mit Wasser zu sättigen. Alle Ventile an der Entlüftungsanlage und am Versuchsgerät werden geschlossen und der Oberwasserdruck wird am Druckerzeuger eingestellt.

7.3.2.3.2 Herstellung des Probekörpers

Sonderproben oder Bohrkerne können nach Ablängen und Abgleichen ihrer Enden ohne weitere Vorbereitung in das Versuchsgerät eingebaut werden.

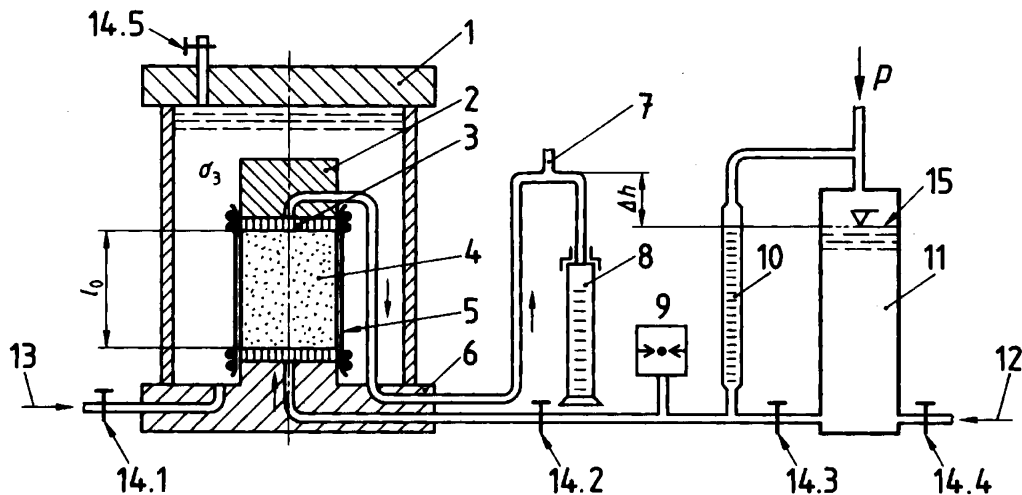
Gestörtes Material wird möglichst gleichmäßig durchmischt und in Lagen in die Form zur Herstellung des Probekörpers eingebaut. Dabei darf keine Entmischung auftreten. Um eine bestimmte Dichte zu erreichen, ist die für eine Lage erforderliche Menge abzuwägen, in einer einheitlichen Dicke in die Form zur Herstellung des Probekörpers einzubringen und durch gleichmäßiges Stampfen oder durch Andrücken auf die gewünschte, zweckmäßigerweise auf der Zylinderwand markierte Dicke zu verdichten.

Die Oberseite des Probekörpers wird nach Einbringen der Gesamtmenge eben abgeglichen, der Probekörper der Form entnommen und, nachdem seine Enden mit den wassergesättigten Filtersteinen bedeckt worden sind, mit Hilfe der in Bild 4 dargestellten Vorrichtung in die Gummihülle eingeführt.

Der so vorbereitete Probekörper wird in die Triaxialzelle eingebaut, und die Verbindungsleitungen werden angeschlossen.

7.3.2.3.3 Bestimmung der Durchlässigkeit

Nach Aufbringen des Zelldrucks wird das Ventil Pos. Nr 14.3 geschlossen und das Ventil Pos. Nr 14.2 zwischen Bürette und Triaxialzelle geöffnet (siehe Bild 8). Die in die Probe einfließende Wassermenge wird mit der Bürette,



- l_0 Höhe des Probekörpers (gleich Länge der Sickerstrecke)
 P Druck zur Erzeugung des hydraulischen Gefälles
 1 Kopfplatte
 2 Probenkopfstück mit spiralförmiger Rille über dem Filterstein
 3 Filterstein mit $k_{\text{Filter}} \geq 10 \cdot k_{\text{Probe}}$
 4 Probekörper
 5 Gummihülle mit O-Ringen
 6 Bodenplatte
 7 Zuführung des Zellenwassers und Einleitung des Zellendrucks σ_3
 8 Meßzylinder zur Bestimmung der abfließenden Wassermenge mit Verdunstungsschutzkappe
 9 Überdruckmeßgerät
 10 Bürette zur Bestimmung der zufließenden Wassermenge
 11 Druckbehälter mit entlüftetem Wasser
 12 Zuführung von entlüftetem Wasser
 13 Glasrohr mit Belüftungsöffnung, Durchmesser < 1 mm
 14.1 bis 14.5 Ventile
 15 Trennschicht zwischen Luft und Wasser, z. B. gefärbtes Paraffinöl

Versuchseinheit A
Triaxialzelle

Versuchseinheit B

ANMERKUNG : Versuchseinheit A: Triaxial- oder Druckzelle (Prüfzelle)

Versuchseinheit B: Vorrichtung zur Druckerzeugung und zur Messung des zu- und abfließenden Wasservolumens

Bild 8: Versuchsanordnung für Versuch in der Triaxialzelle mit Isotroper statischer Belastung, Versuchsklasse 2
 Prüfung DIN 18130 – TX – DE – MZ – SB – 2

die ausfließende Wassermenge mit dem Meßzylinder gemessen. Der Oberwasserdruck wird mit einem Überdruckmeßgerät in der Zuleitung der Triaxialzelle gemessen. Sind die zu- und abfließenden Wassermengen in der Zeiteinheit gleich, wird der Durchlässigkeitsbeiwert aus dem Durchfluß und dem hydraulischen Gefälle bestimmt. Während einer Durchlässigkeitsbestimmung darf sich das hydraulische Gefälle um höchstens 1 % verändern.

7.3.3 Versuch mit anisotroper statischer Belastung des Probekörpers und Sättigungsdruck

7.3.3.1 Geräte

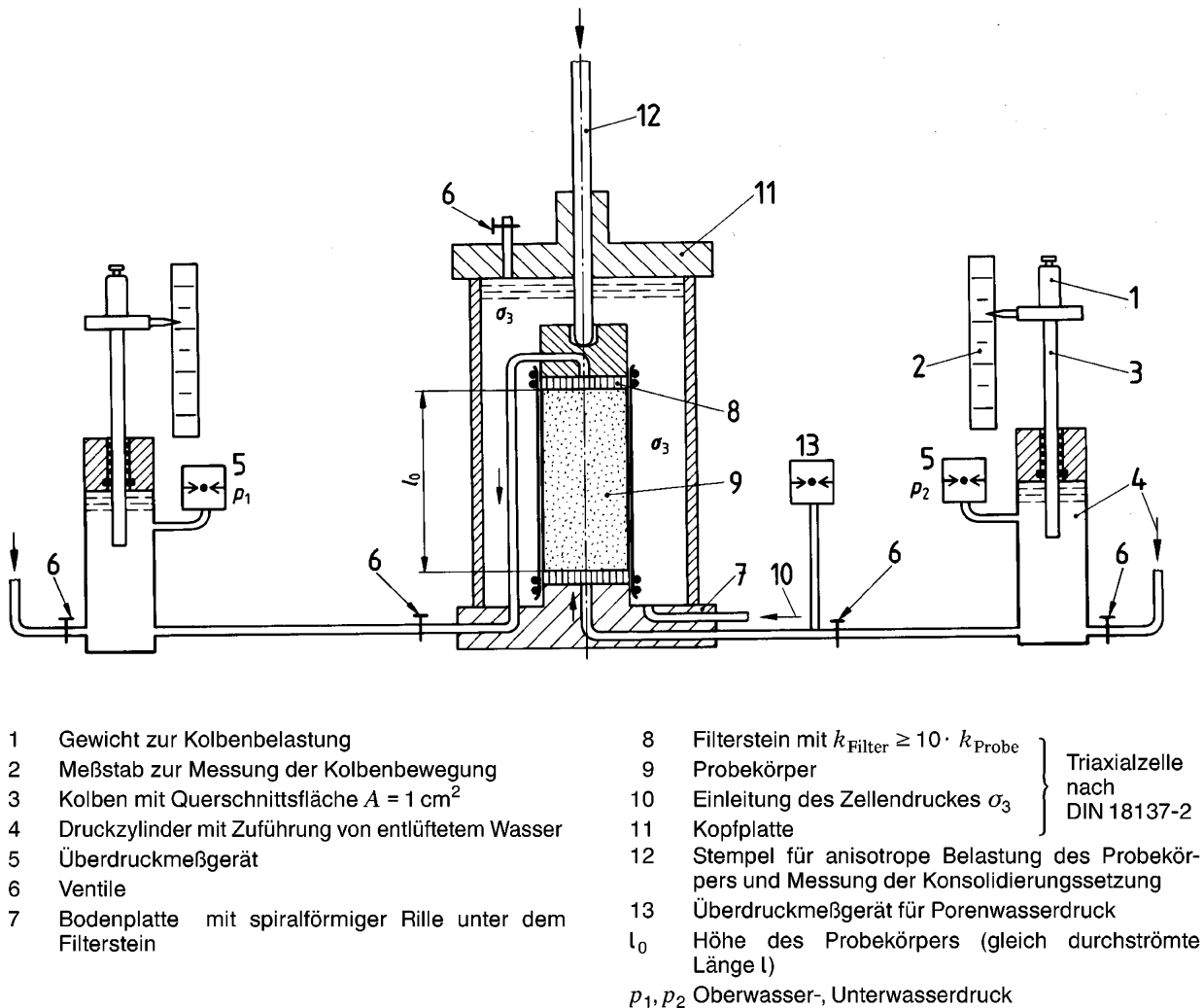
Es werden die in 7.3.2.1 aufgeführten Geräte verwendet.

Zusätzlich werden benötigt:

- zweiter Druckerzeuger mit Überdruckmeßgerät;
- Kopfplatte der Triaxialzelle mit Stempel für anisotrope Belastung des Probekörpers und Meßvorrichtung für die Konsolidierungssetzung;
- Vorrichtung zur Erzeugung der axialen Belastung.

7.3.3.2 Anordnung

Der Versuch wird mit der Anordnung nach Bild 9 durchgeführt. Sie entspricht der in 7.3.2.2 beschriebenen Anordnung mit den dort aufgeführten Geräten und Einrichtungen, benötigt aber eine Triaxialzelle nach DIN 18137-2. Zusätzlich wird an das Versuchsggerät unterwasserseitig ein zweiter Druckerzeuger angeschlossen, der ebenfalls mit entlüftetem Wasser beschickt wird.



ANMERKUNG: Versuchsablauf: Durchströmung von unten nach oben $p_1 < p_2 < \sigma_3$

Bild 9: Versuchsanordnung für Versuch in der Triaxialzelle mit anisotroper statischer Belastung, Versuchsklasse 1
Versuch DIN 18130 — TX — DE — MZ — UO — 1

7.3.3.3 Durchführung

Der Probekörper wird nach 7.3.2.3.2 hergestellt. Bei der Vorbereitung des Versuchs wird zunächst wie nach 7.3.2.3.1 verfahren. Zur Sättigung des Probekörpers wird in beiden Druckzylindern ein gleich hoher Druck u_0 erzeugt, der nach Tabelle 2 zur Beseitigung der in den Poren eingeschlossenen Luftblasen erforderlich ist. Zur Konsolidierung des Probekörpers werden vorher ein den Sättigungsdruck übersteigender Zelldruck und gegebenenfalls eine zusätzliche Axialbelastung aufgebracht. Die Sättigung ist dann erreicht, wenn eine Steigerung des Zellendrucks bei geschlossenen Ventilen (siehe Pos. Nr 6 in Bild 9) eine gleichgroße Zunahme des Porenwasserdrucks (gemessen am Überdruckmeßgerät Pos. Nr 3 in Bild 9) zur Folge hat (siehe DIN 18137-2).

Nach beendeter Konsolidierung des Probekörpers wird in einem der beiden Druckzylinder der Druck erhöht. Die Differenz der Standrohrspiegelhöhen ist gleich der Differenz der an den Überdruckmeßvorrichtungen der beiden

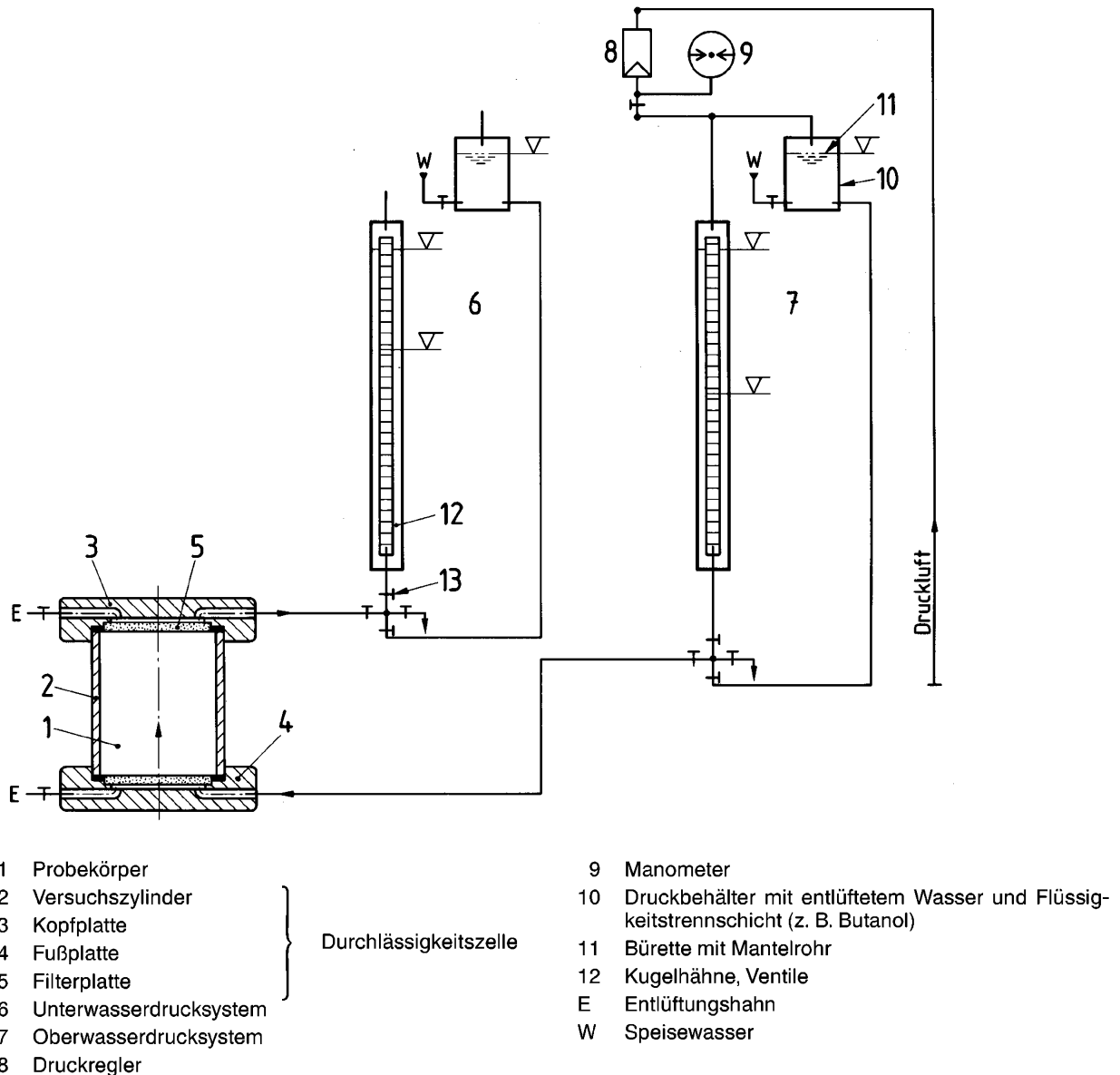
Druckzylinder gemessenen Drücke, dividiert durch die Wichte des Wassers. Das Absinken der Stempel in den Druckzylindern wird in bestimmten Zeitabständen gemessen und daraus die durchströmende Wassermenge bestimmt. Der weitere Verlauf des Versuchs entspricht den Angaben in 7.3.2.3.

7.4 Untersuchung im Versuchszylinder

7.4.1 Bodenarten

Der Versuch eignet sich für feinkörnige Böden (Tone, Schluffe) (Mindestprobenabmessungen siehe 5.8).

ANMERKUNG: Bei diesem Versuch ist keine Sättigung der Probe möglich. Eine randliche Umströmung zwischen Versuchszylinder und Probekörper ist nicht zu kontrollieren. Eine eventuell vorhandene Umströmung führt immer zu einer Vergrößerung der gemessenen Wassermengen und damit des errechneten k -Wertes.



ANMERKUNG: Bei Nachweis stationärer Strömung darf der Versuch der Versuchsklasse 2 zugeordnet werden.

Bild 10: Versuchsanordnung für die Bestimmung der Durchlässigkeit mit Probekörper im Versuchszylinder, Versuchsklasse 3

7.4.2 Geräte siehe Bild 10

- Anlage zum Entlüften von Wasser
- Ausstechzylinder nach DIN 18125-2, wobei die Zylinderhöhe abweichend von DIN 18125-2 sein darf, aber $h \geq 5$ cm sein muß oder Versuchszylinder nach DIN 18127 und Vorrichtung zum Einstampfen des Bodens
- Stahllineal mit Fase oder Messer mit gerader Schneide
- Durchlässigkeitsgerät bestehend aus Kopf- und Fußplatten, gegenseitig verspannbar mit Flachdichtungen und einliegenden Filterplatten
- Vorrichtung zur Erzeugung des hydraulischen Gefälles und zur Messung des ein- und ausfließenden Wasservolumens
- Meßzylinder mit gelochtem Deckel

7.4.3 Anordnung

Der Versuch wird mit der Anordnung nach Bild 10 durchgeführt.

Die zu untersuchende Bodenprobe verbleibt in dem Ausstechzylinder, mit dem sie entnommen worden ist, bzw. in dem Versuchszylinder, in dem sie eingebaut worden ist.

Hinsichtlich der Endflächenbearbeitung ist 6.2.3 von DIN 18125-2 : 1986-05, zu beachten. Die Oberfläche darf beim Abgleichen nicht verschmiert werden.

Ausstechzylinder bzw. der Versuchszylinder werden mit der Kopf- und Fußplatte abgedeckt. Die Platten werden gegeneinander verspannt.

Die Kopf- und Fußplatten erhalten Filterplatten, durch die das Wasser in die Probe ein- bzw. aus der Probe austritt.

Die Durchlässigkeit der Filtersteine ist auf den zu prüfenden Boden abzustimmen (siehe 4.11.2 von DIN 18137-2 : 1990-12).

Die Prü fzelle wird an die Vorrichtung zur Erzeugung des hydraulischen Gefälles und zum Messen des ein- und ausfließenden Wasservolumens angeschlossen (siehe Pos. Nr 6 und Pos. Nr 7 in Bild 10). Es kann auch z. B. eine Vorrichtung nach Bild 8 (Versuchseinheit B) Anwendung finden.

7.4.4 Durchführung

7.4.4.1 Vorbereitung der Versuchsgeräte

Vorratsgefä ße und Verbindungsleitungen der Versuchseinheit zur Messung des zu- und abfließenden Wasservolumens, eventuell einschließlich der Vorrichtung zur Erzeugung des hydraulischen Drucks, werden mit entlüftetem Wasser gefüllt. Luft einschlu ße sind zu beseitigen.

Zu- und Ablauf des Versuchsgerä tes werden mit der Versuchseinheit zur Druckerzeugung und zum Messen des zu- und abfließenden Wasservolumens verbunden.

Die Filtersteine, die in die Kopf- und Fußplatte eingelegt werden, müssen vollständig, z. B. durch Kochen in Wasser, entlüftet werden. Sie werden in die wassergefüllten Kammern der Kopf- bzw. Fußplatte gedrückt.

Auf die Fußplatte wird der zu untersuchende Probekörper im Versuchszylinder gestellt, die Kopfplatte wird aufgesetzt und Kopf- und Fußplatte werden gegenseitig verspannt.

7.4.4.2 Bestimmung der Durchlässigkeit

Bei geschlossenen Ventilen zwischen den Büretten (siehe Pos. Nr 11 in Bild 10) wird mit dem Druckregler (siehe Pos. Nr 8) der Druck auf die Oberwasserseite so eingestellt, daß sich die versuchstechnisch erforderliche Druckdifferenz ergibt. Die Höhe der Wassersäulendifferenz zwischen den Büretten muß berücksichtigt werden.

Der Durchlässigkeitsversuch beginnt, indem die Ventile zwischen den Büretten und dem Versuchszylinder geöffnet werden. Durch Ablesen der Büretten wird die ein- und ausfließende Wassermenge gemessen.

Die Versuchseinrichtung darf bei Böden mit $k \geq 1 \times 10^{-7}$ m/s dahingehend geändert werden, daß das ausfließende Wasservolumen durch einen Me ßzylinder gemessen wird (siehe Bild 8). Der Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwerts ist in diesem Fall die mit der Bürette gemessene einströmende Wassermenge zugrunde zu legen.

ANMERKUNG 1: Bei schwach und sehr schwach durchlässigen Böden durchfließen je nach hydraulischen Gradienten gegebenenfalls sehr kleine Wassermengen die Probe je Zeiteinheit. Diese Wassermengen sind mit dem Me ßzylinder nicht mehr ausreichend genau zu messen und sie unterliegen zudem Verfälschungen z. B. durch Verdunstung.

Sind zu- und abfließendes Wasservolumen in der Zeiteinheit gleich, wird der Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt. Für die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes muß berücksichtigt werden, daß sich das hydraulische Gefälle im Versuchszeitintervall ändert, weil sich die Höhen der Wassersäulen in den Büretten ändern.

ANMERKUNG 2: Die Büretten (siehe Pos. Nr 11 in Bild 10) können mit einem Mantelrohr umgeben werden, das bei Glasbüretten als Berstschutz wirkt. Ferner kann in das Mantelrohr Wasser eingefüllt werden, so daß die Luft oberhalb der Bürettenöffnung weitgehend wasserdampfgesättigt ist und Verdunstungen des Wassers in der Bürette minimiert werden.

8 Auswertung der Versuche

8.1 Versuch mit konstantem hydraulischen Gefälle

Der Durchlässigkeitsbeiwert ergibt sich aus den Gleichungen (1) bis (4) zu

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h} \quad (8)$$

Dabei ist:

- Q der Durchfluß, in m^3/s ;
- l die durchströmte Länge, in m;
- A die Querschnittsfläche des Probekörpers, in m^2 ;
- h der hydraulische Höhenunterschied, in m.

h und l haben für die dargestellten Versuchsanlagen folgende Bedeutung:

- 1) Versuchsanordnung nach Bild 6:
 h die Differenz der Standrohrspiegelhöhen;
 l der Abstand der Ansatzpunkte der beiden Standrohre.
- 2) Anordnung nach Bild 8 und Bild 9:
 $h = (p/\gamma_w - \Delta h)$, wobei p Wasserdruck im Druckzylinder, (siehe Bild 8);
 l die Höhe des Probekörpers l_0 ;
 $h = (p_2 - p_1)/\gamma_w$ (siehe Bild 9).
- 3) Anordnung nach Bild 3A:
 $h = h_0 (\gamma_w - \gamma_{\text{org}})/\gamma_w$ (siehe Gleichung (7));
 l die Höhe des Probekörpers l_0 .

8.2 Versuch mit veränderlichem hydraulischen Gefälle

Der Durchlässigkeitsbeiwert errechnet sich bei Versuchen nach Bild 5 und Bild 10 zu

$$k = \frac{a \cdot l_0}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (9)$$

Dabei ist:

- a die Querschnittsfläche des Standrohrs, in m^2 ;
- l_0 die Höhe des Probekörpers, in m;
- A die Querschnittsfläche des Probekörpers, in m^2 ;
- t die Me ßzeitspanne, in s;
- h_1 die auf den Unterwasserspiegel bezogene Wasserhöhe im Standrohr bei Versuchsbeginn, in m;
- h_2 die auf den Unterwasserspiegel bezogene Wasserhöhe im Standrohr bei Versuchsende, in m.

8.3 Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts von der Porenzahl

Zur Darstellung der Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwerts k von der Porenzahl e werden k und e im doppelt logarithmischen Maßstab aufgetragen (siehe 5.3). Es ergibt sich eine Gerade, aus der eine zahlenmäßige Beziehung für die gesuchte Abhängigkeit ermittelt werden kann.

8.4 Angabe der Versuchsergebnisse

Als Versuchsergebnis sind der Durchlässigkeitsbeiwert k , umgerechnet auf die Temperatur von 10°C und das

hydraulische Gefälle i anzugeben. Bei Versuchen mit veränderlichem hydraulischen Gefälle ist dessen Bereich (größtes und kleinstes hydraulisches Gefälle) anzugeben. Ferner sind mit dem Versuchsergebnis mitzuteilen:

- 1) Angaben zum Versuch
 - Bezeichnung nach Abschnitt 4
 - Versuchsdauer t
 - Sättigungsdruck u_0
 - Raumtemperatur T
 - Durchströmungsrichtung
 - 2) Angaben zur Probe
 - Bodenart nach DIN 4022-1
 - Bodengruppe nach DIN 18196
 - Größtkorn max. d
 - Trockendichte ρ_d
 - Porenzahl bzw. Porenanteil e bzw. n
 - Wassergehalt vor und nach dem Versuch w_a und w_e
 - Sättigungszahl vor und nach dem Versuch (falls kein Sättigungsdruck aufgebracht) S_{ra} und S_{re}
 - Art der Probe (Sonderprobe, aufbereitet usw.)
 - Maße des Probekörpers
- ANMERKUNG: Der k -Wert sollte als ein Vielfaches eines Exponentialfaktors zur Basis 10 angegeben werden.

Wassergehalt, als Massenanteil:	Versuch 1	Versuch 2
— vor dem Versuch	$w_a = 14,4\%$	$w_a = 14,6\%$
— nach dem Versuch	$w_e = 15,6\%$	$w_e = 15,0\%$

Versuchsart:
Im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit veränderlichem hydraulischen Gefälle, statische Belastung $12,7 \text{ kN/m}^2$

Durchströmung: von unten nach oben
Grenzfälle: max. $i = 33$; min. $i = 25$ bzw. 27

Sättigungsdruck: 0		
Sättigungszahl:	Versuch 1	Versuch 2
— vor dem Versuch	$S_{ra} = 0,92$	$S_{ra} = 0,94$
— nach dem Versuch	$S_{re} = 1,00$	$S_{re} = 0,96$

Raumtemperatur: $T = 21^\circ\text{C}$

Berechnung von k nach Gleichung (9):

$$k = \frac{1}{c \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Querschnittsfläche des Standrohres $\alpha = 2,43 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

$$c = \frac{A}{l_0 \cdot a} = \frac{7,85 \cdot 10^{-3}}{1,985 \cdot 2,43 \cdot 10^{-7}} = 1,627 \cdot 10^4 \text{ m}^{-1}$$

$$k \cdot c \cdot t = \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Bestimmung von $k \cdot c$ durch lineare Ausgleichsrechnung.

Versuchsergebnisse siehe Bild 11 und Tabelle 7.

9 Anwendungsbeispiele

9.1 Bestimmung der Durchlässigkeit im Kompressions-Durchlässigkeitsgerät mit statischer Belastung des Probekörpers nach 7.1

Versuch DIN 18130 — KD — ES — ST — SB — 3

Versuchsdauer:	
Bodenart nach DIN 4022-1:	Schluff, sandig, tonig
Bodengruppe nach DIN 18196:	SÜ
Größtkorn:	max. $d = 1,8 \text{ mm}$
Maße des Probekörpers:	Länge $l_0 = l = 0,01985 \text{ m}$ Querschnittsfläche $A = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
Probenart:	Sonderprobe, ungestört eingebaut
Dichte des Probekörpers:	siehe Tabelle 6

Tabelle 6: Dichte, Porenanteil und Porenzahl der Probekörper im Anwendungsbeispiel 9.1

Formelzeichen	Versuch 1	Versuch 2
ρ	$2,17 \text{ g/cm}^3$	$2,20 \text{ g/cm}^3$
ρ_d	$1,90 \text{ g/cm}^3$	$1,92 \text{ g/cm}^3$
ρ_s	$2,70 \text{ g/cm}^3$	$2,70 \text{ g/cm}^3$
n	29,8 %	28,9 %
e	0,424	0,406

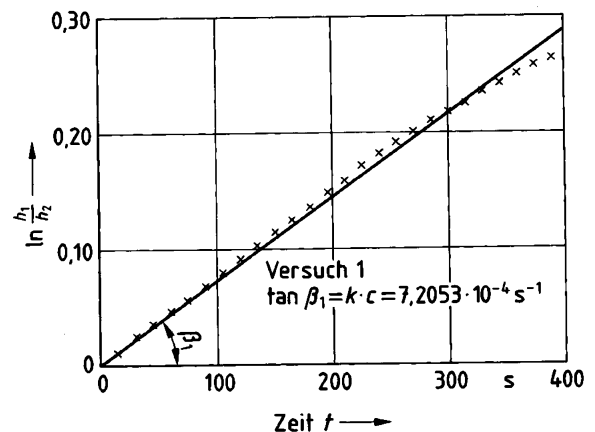


Bild 11: Auftragung der Versuchsergebnisse zu 9.1, Versuch 1

Versuch 1
 $k \cdot c = 7,2053 \cdot 10^{-4} \pm 0,01 \cdot 10^{-4}$
 $k_T = 4,43 \cdot 10^{-8} \pm 0,06 \cdot 10^{-8}$
 umgerechnet auf 10°C
 $\alpha = 0,754$ für $T = 21^\circ$
 $k_{10} = (3,34 \pm 0,05) \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

Versuch 2
 $k \cdot c = 5,84 \cdot 10^{-4} \pm 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$
 $k_T = (3,59 \pm 0,10) \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$
 $k_{10} = (2,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$

Tabelle 7: Versuchsergebnisse Anwendungsbeispiel 9.1 mit einer Wassersäule $h_1 = 0,655$ m

t s	Versuch 1		Versuch 2	
	h_2 m	$\ln \frac{h_1}{h_2}$	h_2 m	$\ln \frac{h_1}{h_2}$
0				
15	0,648	0,0107	0,649	0,0092
30	0,639	0,0247	0,641	0,0216
45	0,632	0,0357	0,634	0,0326
60	0,625	0,0469	0,627	0,0437
75	0,619	0,0565	0,620	0,0549
90	0,612	0,0679	0,614	0,0646
105	0,605	0,0794	0,608	0,0745
120	0,598	0,0901	0,602	0,0844
135	0,591	0,1028	0,597	0,0927
150	0,584	0,1147	0,592	0,1011
165	0,578	0,1251	0,587	0,1096
180	0,571	0,1372	0,582	0,1182
195	0,565	0,1478	0,577	0,1268
210	0,559	0,1585	0,572	0,1355
225	0,552	0,1711	0,568	0,1425
240	0,546	0,1820	0,564	0,1496
255	0,541	0,1912	0,560	0,1567
270	0,536	0,2005	0,556	0,1639
285	0,531	0,2099	0,552	0,1711
300	0,527	0,2174	0,549	0,1765
315	0,523	0,2250	0,546	0,1820
330	0,518	0,2346	0,543	0,1875
345	0,514	0,2424	0,540	0,1931
360	0,510	0,2502	0,538	0,1968
375	0,506	0,2581	0,536	0,2005
390	0,503	0,2640	0,534	0,2042

9.2 Bestimmung der Durchlässigkeit im Versuchszylinder mit Standrohren nach 7.2

Versuch DIN 18130 – ZY – MS – MZ – 2

Versuchsdauer: 5 min
Bodenart nach DIN 4022-1: Kies und Sand, schwach schluffig
Bodengruppe nach DIN 18196: GW
Größtkorn: max. $d = 16$ mm
Maße des Probekörpers: Länge $l_0 = 0,272$ m
Standrohrabstand $l = 0,20$ m
Querschnittsfläche $A = 1,54 \times 10^{-2}$ m²

Probenart: Sonderprobe, gestört und trocken eingebaut

$$\rho = 1,93 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_d = 1,93 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = 2,65 \text{ g/cm}^3$$

$$n = 27,2\%$$

$$e = 0,373$$

Wassergehalt (als Massenanteil) vor dem Versuch:

$$w_a = 0\%$$

Wassergehalt nach dem Versuch:

$$w_e = 13,5\%$$

Versuchsart:

konstantes hydraulisches Gefälle

Sättigungsdruck:

$$u_o = 0$$

Sättigungszahl vor dem Versuch:

$$S_{ra} = 0$$

Sättigungszahl nach dem Versuch:

$$S_{re} = \rho_s \frac{W_e}{e} = 0,96$$

Raumtemperatur:

$$T = 20,0^\circ\text{C}$$

Durchströmung:

von unten nach oben

Versuchsparameter und -ergebnisse siehe Tabellen 8 und 9.

Tabelle 8: Versuchsparameter Anwendungsbeispiel 9.2

Versuchsparameter	Versuch 1	Versuch 2
Differenz zwischen Ober- und Unterwasserspiegel h_w m	0,270	0,270
Standrohrspiegelhöhen		
Oberstrom h_o m	0,268	0,268
Unterstrom h_u m	0,186	0,186
hydraulischer Höhenunterschied $h = h_o - h_u$ m	0,082	0,082
Meßzeitspanne t s	300	300
Wasservolumen V_w m ³	520×10^{-6}	510×10^{-6}

Tabelle 9: Versuchsergebnisse Anwendungsbeispiel 9.2

Gleichung	Versuch 1	Versuch 2
$k = \frac{V_w \cdot l}{A \cdot h \cdot t}$ m/s	$2,745 \times 10^{-4}$	$2,693 \times 10^{-4}$
$k_{10} = k_T - \alpha$ m/s	$2,12 \times 10^{-4}$	$2,08 \times 10^{-4}$

Durchlässigkeitsbeiwert $k_{10} = 2,1 \times 10^{-4}$ m/s

9.3 Bestimmung der Durchlässigkeit in der Triaxialzelle nach 7.3

Versuch DIN 18130 – TX – DE – MZ – UO – 1

Versuchsdauer:

4 Tage

Bodenart:

Geschiebelehm (15 % Tonkorn, 35 % Schluffkorn, 42 % Sandkorn, 8 % Kieskorn)

Tabelle 10: Versuchsparameter und -ergebnisse Anwendungsbeispiel 9.3

Versuchsparameter und -ergebnisse		Versuch 1	Versuch 2	Versuch 3
Meßzeitspanne t	s	7200	7200	7200
Wasservolumen V_w	m ³	$7,3 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-6}$	$7,1 \times 10^{-6}$
$k_T = \frac{V_w \cdot l}{A \cdot h \cdot t}$	m/s	$5,13 \times 10^{-9}$	$4,99 \times 10^{-9}$	$4,99 \times 10^{-9}$
α für $T = 0,5 \times (20,5 + 22,0)$	°C	0,7485	0,7485	0,7485
$k_{10} = k_T \cdot \alpha$	m/s	$3,84 \times 10^{-9}$	$3,74 \times 10^{-9}$	$3,74 \times 10^{-9}$
Durchlässigkeitsbeiwert $k_{10} = 3,77 \times 10^{-9}$ m/s				

Bodenart nach DIN 4022-1:

T, u, \bar{s} , g

Bodengruppe nach DIN 18196:

TL

Größtkorn:

max. $d = 12$ mm

Maße des Probekörpers:

Länge $l_0 = l = 0,1192$ m

Querschnittsfläche:

$A = 7,85 \times 10^{-3}$ m²

Probenart:

Sonderprobe, ungestört

Dichte:

$\rho = 2,10$ g/cm³

Trockendichte:

$\rho_d = 1,82$ g/cm³

Korndichte:

$\rho_s = 2,67$ g/cm³

Porenanteil:

$n = 31,8\%$

Porenzahl:

$e = 0,467$

Wassergehalt vor dem Versuch:

$w_a = 15,4\%$

Wassergehalt nach dem Versuch:

$w_e = 17,5\%$

Raumtemperatur:

$T = 20,5^\circ\text{C}$ bis 22°C

Sättigungszahl vor dem Versuch:

$S_{ra} = 0,88$

Sättigungszahl nach dem Versuch:

$S_{re} = 1,00$

Sättigungsdruck:

$u_o = 720$ kN/m²

Durchströmung von unten nach oben

Versuchsergebnisse und Auswertung:

Oberwasserdruck $p_2 = 750$ kN/m²

Unterwasserdruck $p_1 = 720$ kN/m²

Druckdifferenz $p_2 - p_1 = 30$ kN/m²

hydraulischer Höhenunterschied h

$= (p_2 - p_1) / \gamma_w = 3,0$ m

Versuchsparameter und -ergebnisse siehe Tabelle 10.

9.4 Bestimmung der Durchlässigkeit im Versuchszyylinder nach 7.4

Versuch DIN 18130 – ZY – DE – ST – 3

Versuchsdauer:

3 Tage

Bodenart nach DIN 4022-1:

Ton

Bodengruppe nach DIN 18196:

TA

Größtkorn:

max. $d = 0,10$ mm

Maße des Probekörpers:

Länge $l_0 = l = 0,05$ m

Querschnittsfläche $A = 7,238 \times 10^{-3}$ m²

Probenart:

Sonderprobe im Entnahmezylinder nach DIN 4021

Bodenmechanische Kenngrößen

Dichte:

$\rho = 1,965$ g/cm³

Trockendichte:

$\rho_d = 1,583$ g/cm³

Korndichte:

$\rho_s = 2,69$ g/cm³

Porenanteil:

$n = 0,411$

Porenzahl:

$e = 0,699$

Wassergehalt vor dem Versuch:

$w_a = 24,1\%$

Wassergehalt nach dem Versuch:

$w_e = 25,2\%$

Sättigungszahl vor dem Versuch:

$S_{ra} = 0,93$

Sättigungszahl nach dem Versuch:

$S_{re} = 0,97$

Raumtemperatur:

$T = 19$ bis 22°C

Durchströmung:

von unten nach oben

Versuchsparameter und -ergebnisse siehe Tabelle 11.

Tabelle 11: Versuchsparameter und -ergebnisse Anwendungsbeispiel 9.4

Versuchsparameter und -ergebnisse			Versuchs- beginn	Ablesung 1	Ablesung 2	Ablesung 3
Meßzeitspanne t	s		0	76.800	86.400	259.200
Höhe der Wassersäule über Oberkante Probe	Oberwasser h_o	m	0,635	0,510	0,504	0,277
	Unterwasser h_u	m	0,0	0,189	0,192	0,257
	Differenz Wassersäule $h_o - h_u$	m	0,635	0,321	0,312	0,020
Oberwasserdruck p_o	kN/m ²		20,0	20,0	20,0	20,0
Druckhöhe p_o/γ_w	m		2,0	2,0	2,0	2,0
Unterwasserdruck p_u	kN/m ²		0,0	0,0	0,0	0,0
Druckhöhe p_u/γ_w	m		—	—	—	—
Hydraulischer Höhenunterschied $h = h_o - h_u + (p_o - p_u)/\gamma_w$	m		—	2,321	2,312	2,020
Hydraulisches Gefälle i	1		—	46,4	46,2	40,4
Wasservolumen V_w	m ³		—	$1,25 \times 10^{-5}$	$1,31 \times 10^{-5}$	$3,35 \times 10^{-5}$
Durchlässigkeitsbeiwert k_T $k_T = \frac{V_w \cdot l}{A \cdot h \cdot t}$ α für $T = 0,5 \times (19,0 + 22,0)$ k_{10}	m/s		—	$4,8 \times 10^{-10}$ 0,762 $3,66 \times 10^{-10}$	$4,5 \times 10^{-10}$ 0,762 $3,43 \times 10^{-10}$	$4,4 \times 10^{-10}$ 0,762 $3,35 \times 10^{-10}$
Durchlässigkeitsbeiwert $k_{10} = 3,48 \times 10^{-10}$ m/s						