

Bachelorarbeit

**Experimentelle Bestimmung
der Wasserdurchlässigkeit eines systematisch
entmischten, weitgestuften Bodens**

Bearbeiter

Katrin Faulstich

**Bauhaus - Universität
Weimar**



Bauhaus-Universität Weimar · Fakultät Bauingenieurwesen · Professur Grundbau

Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt

I Aufgabenstellung

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
Professur Grundbau

Aufgabenstellung zur Bachelorarbeit

für cand. B.Sc. Katrin Faulstich
Reg.-Nr. BB/2011/7

Thema: Experimentelle Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit eines systematisch entmischten, weitgestuften Bodens.

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. K.J. Witt
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

Zweitprüfer: MSc. M.R. Salehi Sadaghiani
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

Arbeitsbeginn: 20.06.2011

Abgabetermin: 20.08.2011

Weimar, 20.06.2011



Prof. Dr.-Ing. Timon Rabczuk
Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Aufgabenstellung

Die Neigung körniger Schüttstoffe zur Entmischung ist eine im Erdbau bekannte Erscheinung. Sie gewinnt überall dort an Bedeutung, wo es auf die Homogenität eines Erdkörpers ankommt, am auffälligsten bei Fragen der Durchlässigkeit und inneren Stabilität (Suffosionsanfälligkeit) eines weitgestuften Bodens.

In der Geotechnik wird ein Schüttstoff u. a. durch seine Korngrößenverteilung und seinen Durchlässigkeitsbeiwert klassifiziert. Bei der Korngrößenverteilung wird die Homogenität des betreffenden Materials indirekt impliziert, ohne dass sie in quantitativer Weise bestimmt wird. Der Durchlässigkeitsbeiwert oder die hydraulische Leitfähigkeit von Schüttstoffen beschreibt den Fließwiderstand einer Sickerströmung. Der Durchlässigkeitsbeiwert hängt in erster Linie von der Korngrößenverteilung, der Kornform und der Porosität ab. Die Reproduzierbarkeit des Laborversuches wird bei einem weitgestuften Boden wesentlich von der Qualität der Probenherstellung, ihrer Homogenität, beeinflusst. Aufgrund der unerwünschten Entmischungen ist ein solcher Versuch schlecht reproduzierbar.

In dieser experimentell betonten Bachelorarbeit soll der Einfluss der Entmischung auf den Durchlässigkeitsbeiwert untersucht werden. Die Versuche zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit sollen bei zufällig eingebauten unterschiedlichen Kornfraktionen eines weitgestuften Bodens durchgeführt werden. Im Detail soll der Einfluss der Entmischung auf die Streuung der Wasserdurchlässigkeit eines weitgestuften Bodens experimentell bestimmt und bewertet werden.

Arbeitsschwerpunkte

- Literaturrecherche zu unterschiedlichen Methoden der experimentellen Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwerts
- Durchführung von Versuchen zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit an einem weitgestuften Erdstoff mit systematischer Entmischung
- Auswertung der Versuche und Darstellung der Ergebnisse (Bestimmung des relativen Durchlässigkeitsbeiwerts)
- Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Arbeit ist in enger Abstimmung mit den Betreuern durchzuführen. Nach einer Bearbeitungszeit von ca. 2 Wochen ist ein Arbeitsplan vorzulegen, der fortzuschreiben ist. Es sind 3 Pflichtkonsultationen mit Bericht über die Ergebnisse und den Arbeitsfortschritt vorgesehen.

Für das Bachelorverfahren gilt die Prüfungsordnung der Fakultät Bauingenieurwesen. An der Professur Grundbau sind 2 Exemplare der Arbeit (physisch auf Papier) eine digitale Ausführung sowie eine internetfähige digitale Kurzfassung (im html- oder pdf-Format) abzugeben.



Prof. Dr.-Ing. K. J. Witt (Erstprüfer)

II Inhaltsverzeichnis

I Aufgabenstellung.....	II
II Inhaltsverzeichnis.....	IV
III Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Durchlässigkeitsbeiwert	3
2.2 Gültigkeitsgrenzen des Gesetzes von Darcy	5
2.3 Der Boden als poröses Medium.....	8
2.4 Einflussfaktoren auf den Durchlässigkeitsbeiwert	12
3 Labormethoden zur Bestimmung des k-Wertes und deren Auswertung nach DIN 18130-1	15
3.1 Kompressions-Durchlässigkeitsgerät.....	15
3.2 Untersuchung im Versuchszylinder.....	17
3.2.1 mit Standrohren.....	17
3.2.2 ohne Standrohre.....	19
3.3 Untersuchung mit Hilfe der Triaxialzelle.....	20
4 Material und Methode.....	23
4.1 Beschreibung des untersuchten Bodens	23
4.2 Versuchsaufbau.....	25
4.3 Versuchsvorbereitung.....	28
5 Versuchsdurchführung	30
5.1 Entmischung des Bodens	30
5.2 Zusammensetzung der Proben.....	32
5.3 Beschreibung des Versuchsablaufes.....	35
6 Versuchsergebnisse.....	39
6.1 Darstellung der Ergebnisse	39
6.2 Diskussion der Ergebnisse	44
7 Zusammenfassung.....	50
IV Literaturverzeichnis	VI
V Abbildungsverzeichnis	VIII
VI Tabellenverzeichnis	IX
VII Anhang	X
VIII Selbstständigkeitserklärung	XVI

III Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Beschreibung
k	m/s	Durchlässigkeitsbeiwert oder k-Wert
$v (v_a)$	m/s	Filtergeschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit)
i	-	Hydraulisches Gefälle
Q	m ³ /s	Durchfluss
$A (a)$	m ²	Grundfläche (des Überlaufgefäßes)
V	cm ³ /m ³	Volumen
$\Delta h (h_{1/2})$	cm/m	Hydraulischer Höhenunterschied (Höhe 1/2)
l	cm/m	Durchströmte Länge der Probe
$t/\Delta t$	s	Zeit / Zeitänderung
d_w	mm	Wirksamer Korndurchmesser
d_x	mm	Korndurchmesser d, den x % der Körner unterschreiten
$n (n_f)$	-	Porosität (effektive Porosität)
e	-	Hohlraum
Re	-	Reynoldszahl
ρ	kg/m ³	Dichte
η	m ² /s	Dynamische Viskosität
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität
γ_w	kg/m ² s ²	Wichte
C_U	-	Ungleichförmigkeitszahl
C_C	-	Krümmungszahl
T	°C	Temperatur
$m/\Delta m_i$	g/kg	Masse / Massenänderung innerhalb i
w_L	-	Fließgrenze
I_P	-	Plastizitätszahl
$C/C_1/\chi_{25}$	-	Korrekturfaktoren

1 Einleitung

Zur Ermittlung Durchlässigkeitsbeiwertes gibt es heute zahlreiche Tabellen und Formeln, jedoch kann solch ein empirisch ermittelter Wert stark von dem Wert des in der Natur vorkommenden Bodens abweichen. Insbesondere bei weitgestuften Böden ist die Vorhersage über dessen Durchlässigkeit nicht exakt genug. Erschwerend kommt hinzu, dass der Durchlässigkeitsbeiwert von zahlreichen Faktoren abhängig ist, wie der Porosität oder der Korngrößenverteilung. Da Böden, wie ein Kies-Sand-Gemisch, in denen viele Kornfraktionen vertreten sind zur Entmischung neigen, bildet die Homogenität hier eine ebenso wichtige Einflussgröße. Besonders bei Erdbauwerken wie Dämmen wird eine Homogenität angenommen, kann aber nicht an jeder beliebigen Stelle nachgewiesen werden. Vor allem durch die Bewegung bei Transport und Einbau des trockenen Bodenmaterials lässt sich deren Entmischung nicht vermeiden. Die korrekte Einschätzung der Durchlässigkeit solcher Bauwerke und damit deren Funktionalität und Sicherheit wird damit umso schwieriger. Ziel dieser Arbeit ist es, aufzuzeigen in welchem Zusammenhang der Durchlässigkeitsbeiwert mit der Homogenität eines weitgestuften Bodenmaterials steht. Die Experimente, die dafür notwendig sind, werden mit einem speziellen Versuchsaufbau durchgeführt. Die Versuchszelle ist demzufolge größer als bei einem standardisierten Durchlässigkeitsversuch, um den Boden mit all seinen Kornfraktionen ausreichend zu repräsentieren. Im Gegensatz zu einer Computersimulation kann bei der Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwertes im Labor keine hundertprozentige Homogenität gewährleistet werden. Doch gerade eine experimentelle Bestimmung liefert greifbare Ergebnisse, die im Bauwesen Anwendung finden. Die versuchsweise bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerte eines unterschiedlich entmischten Bodens sollen zur besseren Abschätzung der Eigenschaften künstlich angelegter Erdbauwerke dienen. Im Anschluss an diese Einleitung werden im zweiten Kapitel zunächst die wichtigsten Begriffe geklärt und der Boden als poröses System genauer beschrieben. Es enthält zudem eine Darstellung der Zusammenhänge der einzelnen Bodenparameter und dessen Einfluss auf den Durchlässigkeitsbeiwert. Die Arbeit geht im dritten Kapitel näher auf die einzelnen Labormethoden zu Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes nach DIN 18130-1 ein. Die wichtigsten Versuche werden in deren Aufbau, Durchführung und Auswertung erläutert. Das vierte Kapitel befasst sich mit den für diese Arbeit durchgeführten Versuchen. Als erstes werden die Kenngrößen und Eigenschaften des verwendeten Bodenmaterials erörtert. Der Aufbau der Versuchsgeräte sowie die Vorbereitungen für den Versuch werden dann näher beschrieben. Im inhaltlich anknüpfenden fünften Kapitel wird erklärt, wie die Proben für den Versuch zusammengesetzt werden und das Experiment durchgeführt wird. Die Darstellung

und Auswertung der Ergebnisse des Versuchs runden im sechsten Kapitel diese Arbeit ab, bevor die sie mit einer Zusammenfassung endet.

2 Grundlagen

2.1 Durchlässigkeitsbeiwert

Der Durchlässigkeitsbeiwert k oder kurz der k -Wert ist ein Maß für den Widerstand, der dem Wasser, das durch ein poröses Medium fließt, entgegengesetzt wird. Er wird durch das Gesetz von Darcy wie folgt definiert.

$$k = \frac{v}{i} \quad (1)$$

Dabei ist v die Filtergeschwindigkeit und i das hydraulische Gefälle. Die Filtergeschwindigkeit v kann durch die Gleichung

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

ausgedrückt werden, wobei der Durchfluss Q das Wasservolumen V angibt, welches in der Zeiteinheit t senkrecht eine Querschnittsfläche A durchfließt. Das hydraulische Gefälle i entspricht der Potentialdifferenz, das heißt der Änderung der Standrohrspiegelhöhen in Strömungsrichtung, geteilt durch die Länge des Sickerweges.

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

Der k -Wert in der Einheit m/s stellt den Durchfluss Q in m^3/s dar, welcher durch ein poröses Medium mit der Durchflussfläche A in m^2 und einem hydraulischen Gradienten i fließt. Da das Wasser nicht einfach in einer Geraden durch den Boden fließt, sondern durch ein verzweigtes System von Gängen und Röhren, welche von den Hohlräumen im Boden gebildet werden, ist die Filtergeschwindigkeit v eine fiktive Größe. Die realere Abstandsgeschwindigkeit v_a ist größer als die Filtergeschwindigkeit v , da sie die Porenzahl n mit einbezieht.

Mit Hilfe der oben genannten Gleichung von Darcy kann der k -Wert von ungestörten oder gestörten Bodenproben im Labor mittels geeigneter Experimente bestimmt werden (vgl. Kapitel 3). Desweiteren gibt es indirekte Näherungsmethoden um den k -Wert anhand der Korngrößenverteilung, Kornform und Porosität zu bestimmen. Diese sind im Vergleich zu einem Durchlässigkeitsversuch im Labor weitaus weniger aufwändig, da sie auf der Auswertung der Korngrößenverteilung basieren. Alle Verfahren beruhen auf der gleichen Grundgleichung.

$$k = C \cdot d_w \quad (4)$$

Hierbei stellt d_w den wirksamen Korndurchmesser dar, der stellvertretend für alle anderen Korndurchmesser eingesetzt wird. Die empirisch ermittelte Konstante C ist bei jeder Näherungsmethode anders definiert. Da es sich in der vorliegenden Arbeit um die experimentelle Ermittlung des k -Wertes handelt, wird auf die verschiedenen theoretischen

Berechnungsmethoden nur in Abschnitt 6.1 zum Vergleich mit den aus dem Experiment hervorgegangenen Werten kurz eingegangen.

Der k-Wert ist von Bodenart zu Bodenart verschieden und bewegt sich innerhalb weiter Grenzen. Nach DIN 18130-1 „Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes“ lassen sich Böden für bautechnische Zwecke in fünf Durchlässigkeitsbereiche unterteilen:

k in 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

Tabelle 1: Durchlässigkeitsbereiche in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert nach DIN 18130-1

Für die überschlägliche Ermittlung des k-Wertes je nach Bodenart gibt es darüber hinaus verschiedene Tabellen.

Im Bauwesen und besonders in der Geotechnik spielt der k-Wert eine große Rolle. Er findet zum Beispiel Anwendung beim Brunnenbau, der Grundwasserabsenkung oder bei der Bauwerksabdichtung bzw. Drainage. Er dient als Grundlage zur rechnerischen Erfassung von Strömungsvorgängen im Boden. Mit Hilfe des k-Wertes lassen sich Rückschlüsse auf das Deformationsverhalten ziehen, denn je geringer die Durchlässigkeit, desto länger dauern durch Spannungsänderungen verursachte Formänderungen an.

Der k-Wert ist sowohl von den Eigenschaften des Bodens als auch des Wassers, welches den Boden durchfließt, abhängig. Diese Einflussfaktoren werden in Kapitel 2.4 genauer beschrieben. [1] [2] [3] [4] [5]

2.2 Gültigkeitsgrenzen des Gesetzes von Darcy

Das Gesetz des französischen Ingenieurs Henry Darcy aus dem Jahr 1856 beruht auf einem Durchlässigkeitsversuch von Grob- und Mittelsanden in Glasrohren. Dabei fand Darcy den oben genannten linearen Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit v und hydraulischem Gefälle i , der nochmals wie folgt zusammengefasst werden kann.

$$v = k \cdot i = k \cdot \frac{\Delta h}{l} = k \cdot \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Diese Gleichung gilt als Grundgesetz der eindimensionalen Strömung in nichtbindigen Böden infolge der Gravitation und ist Grundlage für alle in der Ingenieurpraxis angewandten Berechnungsverfahren für Sickerströmungen. Der Versuch von Darcy entspricht dem nachfolgenden Aufbau. [6]

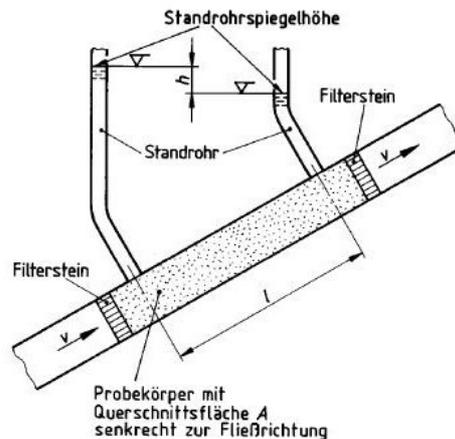


Abbildung 1: Wasserströmung in einer Bodenprobe nach DIN 18130-1

Die Bodenprobe mit der Querschnittsfläche A wird nach dem Gesetz von Darcy mit der Filtergeschwindigkeit v durchströmt. Dabei ist v wie oben genannt eine fiktive Größe, da nicht einfach eine Röhre mit der Grundfläche A durchströmt wird, sondern ein poröses Medium mit zahlreichen kleinen Hohlräumen und Gängen. Die Fließlänge des Wassers ist daher sehr viel größer als die Probenlänge l . Die wirkliche Geschwindigkeit v_a wird durch folgende Gleichung definiert.

$$v_a = \frac{v}{n_f} \quad (6)$$

Dabei ist n_f die effektive Porosität des Bodens, die von der Lagerungsdichte der Bodenprobe abhängt. Bei kompakterster Lagerung kann n_f einen Wert von 0,259, bei symmetrisch quadratischer Lagerung von 0,476 erreichen. Die Abstandsgeschwindigkeit v_a wird demnach größer als die Filtergeschwindigkeit v . Außerdem bildet das Wasser im Boden durch Adhäsionskräfte eine Art Film um die Körner, welcher die Porosität weiter vermindert. Die

effektive Porosität wird deshalb an einer gesättigten Probe bestimmt, um diesen Effekt zu berücksichtigen. [7]

Das Gesetz von Darcy ist nur für einen Idealfall der Strömung des Wassers in porösen Medien aufgestellt. Es beschreibt die eindimensionale stationäre Strömung im homogenen, isotropen, gesättigten und unbewegten Boden. Die Formel verliert daher ihre Gültigkeit, sobald die Voraussetzungen für die Herleitung nicht mehr zutreffen. Dabei gibt es aber keine exakten Gültigkeitsgrenzen, sondern einen linearen, prälinearen und postlinearen Bereich, die mehr oder weniger fließend ineinander übergehen. Im linearen Bereich unterliegt der k-Wert unter einem geeigneten hydraulischen Gradienten keinen Schwankungen. Durch den hydraulischen Gradienten i spielen somit die Strömungsgeschwindigkeit und die Druckverhältnisse bei dem Versuch eine große Rolle.

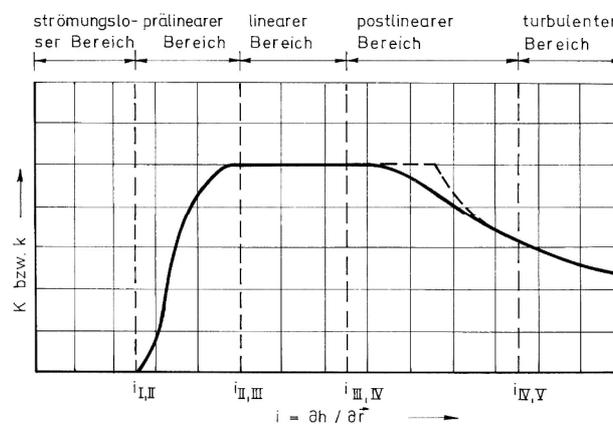


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Strömungsbereiche [1]

Eine Voraussetzung für die Anwendbarkeit des Gesetzes ist eine wirbelfreie bzw. laminare Strömung des Wassers durch den Boden. Der Einfluss von Turbulenzen und turbulenten Reibungen muss verhindert werden. Diese sind allerdings nur in mikroskopischen Bereichen des Bodens von Bedeutung und die turbulenten Bewegungen gleichen sich in einer ausreichend großen Bodenprobe wieder aus. Eine laminare Strömung und infolgedessen auch die Anwendbarkeit des Gesetzes sind für den makroskopischen Bereich gegeben. Für kleine Strömungsgeschwindigkeiten in Sanden und Kiesen, die auch im ursprünglichen Versuch von Darcy verwendet wurden, bleibt das Gesetz demzufolge gültig. [1] [8] [9]

Sobald die Strömung in den turbulenten Bereich übergeht, also sich die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers und der hydraulische Gradient erhöhen, werden der Einfluss von Trägheits-, Reibungs- und Oberflächenkräften und damit auch mögliche Fehlerabweichungen immer größer. Außerdem kann eine Kornumlagerung stattfinden, da kleinere Bodenpartikel vom Wasser mit getragen werden können und so möglicherweise Hohlräume füllen. Dadurch verringert sich der k-Wert. Ob eine laminare oder turbulente

Strömung vorliegt, kann mit Hilfe der Reynoldszahl, einem Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskräften, bestimmt werden.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d_w}{\eta} \quad (7)$$

Dabei ist ρ die Dichte und η die dynamische Viskosität der Flüssigkeit, die beide temperaturabhängig sind. Ab einer Reynoldszahl von zehn liegt eine turbulente Strömung vor. Dieser Wert legt die Obergrenze des linearen zum postlinearen Strömungsbereich fest. Mit wachsender Filtergeschwindigkeit v steigt der Einfluss von Trägheitskräften in Form von Zentrifugalkräften, Stoßverlusten durch Querschnittsänderungen der Porenkanäle sowie Abzweigverlusten in den Porenkanälen. Dies kann durch einen reduzierten Durchlässigkeitskoeffizienten k^* berücksichtigt werden. Für sehr grobkörniges Material, klüftiges Gestein oder auch Karst ist die Anwendbarkeit des Gesetzes sehr eingeschränkt zu betrachten. Die Untergrenze der Gültigkeit des Gesetzes ist der prälineare Bereich, welcher für Sande und Kiese weniger von Bedeutung ist. In diesem Bereich nimmt bei kleinen Strömungskanalquerschnitten die Wirkung durch Haftkräfte zu. Das bedeutet, dass sich durch die Adsorptionskräfte zwischen Wasser und Tonmineralien Hydratationswasser bildet, welches den Durchfluss von Wasser, das aufgrund der Schwerkraft strömt, verhindert. Ab einem Porendurchmesser von $3 - 8 \cdot 10^{-6}$ m verliert das Gesetz von Darcy daher seine Gültigkeit. [1] [8]

Bei einem Durchlässigkeitsversuch ist zusammenfassend zu beachten, dass die Strömungsgeschwindigkeit im laminaren Bereich bleibt, um störende Einflusskräfte klein zu halten und um das Korngefüge nicht zu verändern. Dafür muss ein geeigneter hydraulischer Gradient gewählt werden. Zudem dürfen sich die Umgebungstemperatur und die Beschaffenheit des Wassers nicht ändern, da die Viskosität und die Dichte temperaturabhängig sind. Die Probe sollte zudem wassergesättigt sein, damit die Porosität und damit die Strömungsgeschwindigkeit annähernd gleich bleiben.

2.3 Der Boden als poröses Medium

Das Wasser im Boden fließt durch die von den Bodenkörnern gebildeten Hohlräume und Gänge. Durch das so gebildete zusammenhängende Porenraumsystem kann die Umgebung durch die das Wasser fließt als poröses Medium oder bei schluffigen und kiesigen Sedimenten auch als Kornhaufwerk bezeichnet werden. Es gibt drei Elemente, welche das Bodenvolumen bilden: Der Feststoff bzw. die festen Bestandteile des Bodens, die Flüssigkeit (Wasser) und das Gas (Luft). Dabei bilden Luft und Wasser das Porenvolumen des Bodens, in dem das Wasser fließen kann. Ist der Boden voll mit Wasser gesättigt, also keine Luft im Boden vorhanden, spricht man statt von einem „Dreiphasensystem“ von einem „Zweiphasensystem“. [6]

Das Netzwerk von Gängen und Hohlräumen, durch das sich das Wasser im Boden bewegt, ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Im Wesentlichen bestimmen die Größen und Formen der Körner, die Kornverteilung, die Porosität und die adhäsiven Kräfte, welche wiederum auch von den chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Körner bestimmt werden, die Ausprägung eines solchen Porenraumsystems. [7]

Um die Größe und Form eines Bodenkorns besser als nur durch den Durchmesser zu definieren, gibt es einen Formfaktor C_F . Dieser beschreibt das reale Korn und nicht lediglich dessen idealen Kreis, der das Korn beim Sieben umgibt. Die dreidimensionale Ausbildung eines Korns hängt von dessen Geologie, d.h. der Entstehung und dem Transport ab. Kies besteht vorwiegend aus Quarz, hat meist eine kubische oder kreisrunde Form und einen Formfaktor C_F von 1,0. Ähnlich wie Kies ist Sand aus Quarz und Glimmer aufgebaut. Jedoch kann dessen C_F je nach Zusammensetzung größer sein. Je ungleicher das Verhältnis von Länge zu Durchmesser des Korns, wie die plattigen oder nagelförmigen Bestandteile von Ton, desto größer wird der Formfaktor (bis zu 1,3). [1]

Neben der geometrischen Ausbildung der einzelnen Körner spielt auch die Kornverteilung eine große Rolle bei der Ausbildung von Porenraumsystemen. Je weitgestufter ein Boden ist, desto besser können die Hohlräume zwischen den großen Körnern durch kleinere gefüllt werden, wodurch sich das Porenvolumen verringert. Nach Hazen wird die Größe der Poren und somit die innere Oberfläche hauptsächlich durch den Höchstdurchmesser der kleinsten zehn Prozent, demnach den feinen Partikeln eines Bodens bestimmt. Desweiteren kann es vorkommen, dass nicht alle Feinanteile eines Bodens in der Kornverteilung erfasst wurden. Oftmals heften diese entweder lose oder unveränderlich an anderen Partikeln. [7]

Die Porosität eines Bodens kann durch die Zahl n ausgedrückt werden und beschreibt das Verhältnis von Porenvolumen V_P zu Gesamtvolumen V_t .

$$n = \frac{V_P}{V_t} \quad (8)$$

Wie bereits erwähnt, gibt es eine effektive Porosität n_f , welche die Porosität einer mit Wasser vollgesättigten Probe angibt. Der Hohlraum e wird durch das Verhältnis des Porenvolumens V_P zum Volumen des Feststoffs V_F definiert.

$$e = \frac{V_P}{V_F} = \frac{n}{1 - n} \quad (9)$$

Die Porosität steht im engen Verhältnis zu der Kornform und -größe sowie der Kornverteilung eines Bodens. Bei Proben gleicher Größe und gleichen Gewichts steigt die Anzahl der Berührungspunkte der Körner je kleiner diese sind. Sind die Partikel zusätzlich noch flach oder plattig erhöht sich die Anzahl der Kontaktflächen noch weiter und die Bildung von Gängen wird gefördert. Außerdem hängt die Porosität homodisperser Proben nicht vom Durchmesser der Körner ab, sobald diese größer als 0,2 mm sind. Unter dieser Grenze steigt die Porosität mit abnehmendem Korndurchmesser. Wie bereits erwähnt ist die Porosität eines gemischtkörnigen Bodens niedriger, als die eines Bodens, der nur aus einer Korngröße zusammengesetzt ist. Die Porosität ist somit abhängig von der Ungleichförmigkeitszahl C_U .

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (10)$$

Die Ungleichförmigkeitszahl stellt das Verhältnis des Durchmessers d_{60} , welches die Korngröße darstellt, die 60% der Körner unterschreiten, zum Durchmesser d_{10} dar. C_U veranschaulicht die Steigung der Kornverteilungslinie zwischen 10 % und 60 % der Siebdurchgänge. Neben der Ungleichförmigkeitszahl gibt es einen weiteren Parameter, den effektiven Korndurchmesser d_w , welcher einen Boden charakterisiert. Dieser wird durch die Aufsummierung der Massen Δm_i der Kornfraktionen mit dem mittleren Korndurchmesser d_i der einzelnen Fraktionen wie folgt ermittelt.

$$d_w = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta m_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\Delta m_i}{d_i}} ; d_i = \sqrt{d_i \cdot d_{i+1}} \quad (11)$$

Der effektive Korndurchmesser liegt meist zwischen d_{10} und d_{25} . [3] [7]

Zwischen der Kornform, dem Ungleichförmigkeitszahl und dem effektiven Durchmesser besteht eine Abhängigkeit in der nachstehenden Abbildung.

$U = d_{60}/d_{10}$	d_w/d_{10}	Kornform (s. Abb. 1.22)	Formfaktor C_f
1,0 bis 1,9	1,0 bis 1,6	kugelig abgerundet	1,0
2,0 bis 2,9	1,6 bis 1,9	plattig abgerundet	1,1
3,0 bis 4,9	1,9 bis 2,2	nadelförmig abgerundet	1,2
5,0 bis 9,9	2,2 bis 2,5	plattig kantig	1,2
> 10	> 2,5	nadelförmig scharfkantig	1,3



Kornformen. a) kugelig, b) plattig, c) nadelförmig, d) abgerundet, e) kantig, f) scharfkantig.

Abbildung 3: Wirksamer Korndurchmesser als Funktion von d_{10} und d_{60} und der Formfaktor in Abhängigkeit der Kornform [1]

Desweiteren kann die Porosität auch bei gleichen Böden variieren. Das liegt ebenso an der Lagerungsdichte sowie an den Druckverhältnissen. Die größte Porosität wird bei lockerster Lagerung und die geringste Porosität bei kompaktester Lagerung erreicht. In wie weit sich Böden verdichten lassen, wird von der Geometrie der Körner und der Kornverteilung beeinflusst. Ist der Boden einem Druck ausgesetzt, wird die totale Spannung durch die Auflast entweder vom Kornskelett aufgenommen oder vom Wasserdruck ausbalanciert. Der Boden konsolidiert langsam und verliert an Porosität. [7]

Auf den Boden wirken jedoch nicht nur Spannungen, die von außen aufgebracht werden, sondern auch Kräfte zwischen Wasser und Bodenfeststoff. Unabhängig vom mineralischen oder chemischen Charakter der Körner existiert eine Adhäsionskraft zwischen Wasser und Korn. Die Partikel werden von einem dünnen Wasserfilm, dem Haftwasser umgeben, der sich umso stärker ausprägt, je höher die spezifische Oberfläche des Bodenteilchens ist. Diese Adhäsionskraft wird als Van-der-Waals-Kraft bezeichnet und übersteigt die Kohäsionskraft des Wassers. Desweiteren kann von den Körnern, vor allem bei bindigen Böden, auch Wasser absorbiert werden. Dieses und das Wasser, welches die Körner umgibt, stehen dann nicht mehr für den Wassertransport zur Verfügung.

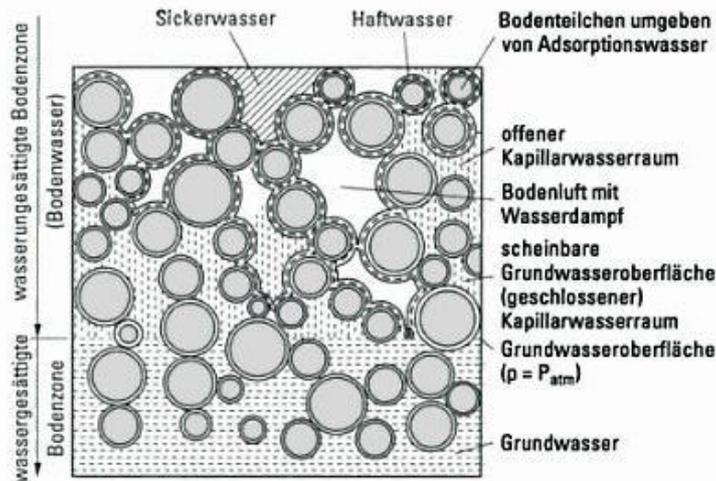


Abbildung 4: Erscheinungsformen und Bezeichnungen des unterirdischen Wassers [10]

Dadurch, dass die Körner vom Wasser umgeben sind, ziehen sie sich an und kleben aneinander fest. Dies hat dann einen Einfluss auf den effektiven Durchmesser des Bodens. So verringert sich die aktive Oberfläche des Bodens (also die Oberfläche aller Bodenpartikel zusammen) und der hydraulische Charakter wird beeinflusst. Abstoßende Kräfte aufgrund des chemischen oder mineralischen Charakters eines Bodens gibt es bei Tonmineralen. Hier können elektrische Felder entstehen und ein Ionenaustausch stattfinden. [7] [11]

Das irreguläre Netzwerk aus Poren und Gängen kann auch durch physikalische Modelle veranschaulicht werden. Ein solches Modell aus Röhrchen, durch die das Wasser fließt, ist jedoch sehr kompliziert. Es muss beachtet werden, dass der Querschnitt nicht konstant bleibt und nicht immer kreisrund ist. Zudem neigen sich die Gänge oft zufällig in verschiedene Richtungen. Die Gänge durch die sich das Wasser bewegt, sind in der Natur eventuell viel länger als in einer Probe und Bereiche in denen sich Röhrchen kreuzen, sind eher chaotisch angeordnet und nicht immer die gleichen. [7]

Die Bewegung des Wassers durch den Porenraum resultiert theoretisch aus den Druck- und Potentialdifferenzen (hydraulisches Gefälle) des Bodens. In der Natur wird diese jedoch noch von Kapillardrücken und Gravitation beeinflusst. Durch den komplexen Aufbau des Bodens als poröses Medium, ist auch der k -Wert von theoretisch gleichen Kornverteilungen in der Natur variabel. [3]

2.4 Einflussfaktoren auf den Durchlässigkeitsbeiwert

Der k-Wert ist keineswegs eine Konstante, die je nach Bodenart immer gleich bleibt. Den größten Einfluss auf die Durchlässigkeit eines Bodens hat dessen Porosität, welche wiederum von Lagerung, Struktur, Korngröße, Kornverteilung und Sättigung beeinflusst wird. Je mehr Hohlräume und Gänge vorhanden sind, d.h. je lockerer die Lagerung, desto größer ist der Porenraum in dem das Wasser fließen kann. In wie weit ein natürlicher Boden verdichtet ist, kann nur durch ungestörte Bodenproben ermittelt werden. Um einen Boden künstlich zu Verdichten und somit die Hohlräume zu minimieren, wird je nach Bodenart ein bestimmter kleiner Prozentsatz Wasser hinzugefügt. Damit wird ein Maximalwert für die erreichbare Trockendichte erzielt, welche als Proctordichte ρ_d bekannt ist. Diese ist beim Einbau von Proben bei Laborversuchen noch weiter von Bedeutung. [4] [12]

Außerdem ist die Struktur und Textur eines Bodens ein wichtiger Einflussfaktor auf den k-Wert. Besitzt ein Boden eher plattige Partikel und somit einen geschichteten Aufbau, fließt das Wasser in Richtung dieser Platten um ein Vielfaches besser, als senkrecht zu den Platten. Damit entsteht ein unterschiedlicher k-Wert in beiden Richtungen. Bei einem solchen Bodenaufbau im Feinkornbereich, also bei Tonen, verschließen oder verengen sich die Gänge allerdings durch Haftwasser, da Tonpartikel eine große spezifische Oberfläche haben, worauf sich Wasser ablagert. So kommt es auch vor, dass Böden mit einem hohen Porenvolumen einen geringen k-Wert besitzen. Bei gröberen und weitgestuften Böden, die gut durchmischt sind, wird die Porosität dadurch reduziert, dass sich kleine Bodenkörner zwischen großen ansammeln und so das Porenvolumen verringern. [4]

Ist ein Boden voll mit Wasser gesättigt und strömt durch diesen Wasser, kann er durch die effektive Porosität beschrieben werden. Gesättigte Böden haben einen höheren k-Wert, da sich Hohlräume schon mit Wasser gefüllt haben und sich an den Bodenpartikeln Haftwasser festgesetzt hat. Überdies ist im gesättigten Boden theoretisch keine Luft mehr vorhanden, welche den Durchflussquerschnitt verringert und die Durchlässigkeit herabsetzt. Untersuchungen des k-Wertes sollten aus diesem Grund, der wie in Abschnitt 2.2. genannt aus einer Voraussetzung der Anwendbarkeit des Gesetzes von Darcy resultiert, an einem Zweiphasensystem durchgeführt werden. [11]

Um die Durchlässigkeit nur in Abhängigkeit der Kornverteilung zu ermitteln, gibt es zahlreiche Formeln und wissenschaftliche Ansätze (Hazen, Beyer, Sichardt, Seiler u. A.). Als weiteres Beispiel kann hier die Gleichung nach Kozeny/Carman genannt werden.

$$k = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot \frac{\gamma_w}{\eta} \cdot d_w^2 \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (12)$$

Sie beinhaltet sowohl die Porosität, den effektiven Korndurchmesser und einen Korrekturfaktor C_1 (180 bis 270) des Bodens als auch die Wichte und die dynamische

Viskosität des Wassers. Die beiden letztgenannten Faktoren und damit auch der k-Wert sind temperaturabhängig. Diesen Zusammenhang hat Poiseuille mit der nachstehenden Gleichung formuliert, wobei der k-Wert auf eine Vergleichstemperatur T von 10°C umgerechnet wird.

$$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \cdot k_T \quad (13)$$

Weitere den k-Wert beeinflussende Eigenschaften des Wassers sind dessen Gassättigung und chemische Zusammensetzung. Neben der Verhinderung des Einflusses von Luftblasen durch die volle Sättigung einer Bodenprobe, kann zusätzlich entlüftetes Wasser für einen Versuch verwendet werden. Dies ist jedoch sehr aufwändig und man kann nicht sicherstellen, dass das Wasser während eines Versuchs entlüftet bleibt. [4] [11] [12]

Einen weiteren Effekt auf den k-Wert haben Suffosion, Erosion und Kolmation während des Fließens des Wassers durch den Boden. Unter Suffosion versteht man die Ausspülung von Feinanteilen. Diese werden vom Wasser mitgetragen und lagern sich zwischen den größeren Körnern, dem Bodenskelett ab. Bei der Erosion werden fast alle Körner, egal welcher Größe, vom Wasser transportiert und umgelagert.

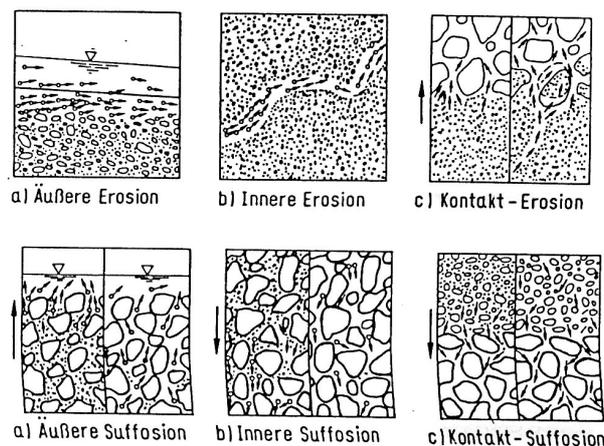


Abbildung 5: Suffosion und Erosion [11]

Die vom Wasser beförderten Teilchen lagern sich an anderer Stelle wieder ab und können so das Netzwerk aus Poren und Gängen teilweise verstopfen. Dieses Phänomen wird als Kolmation bezeichnet. Bei einem ideal abgestuften Boden entsteht keine Suffosion und die Erosion ist eher eine Erscheinung in der Natur als bei Laborversuchen. Suffosion und Erosion sind von den Strömungsverhältnissen und damit auch dem hydraulischen Gradienten abhängig. Allerdings nimmt auch bei konstantem hydraulischem Gefälle die Durchlässigkeit während eines Versuchs ab, da sich feine Partikel in den Filtern oder Filtersteinen sammeln und eine weniger durchlässige Schicht bilden können. [11]

Um ein repräsentatives Ergebnis beim Durchlässigkeitsversuch zu erzielen, darf die minimale Probenabmessung nicht unterschritten werden. Das Verhältnis Größtkorn zu

Probenhöhe bzw. Probendurchmesser sollte nicht weniger betragen als 1:5 bei ungleichförmigen Böden und 1:10 bei gleichförmigen Böden. Eine Probengrundfläche von $A = 10 \text{ cm}^2$ bei bindigen Böden und $A = 20 \text{ cm}^2$ bei nicht bindigen Böden sollte ebenfalls vorhanden sein, damit Inhomogenitäten der Bodenprobe nahezu ausgeschlossen werden können. [13]

Ferner hat auch die Homogenität einer Bodenprobe Einfluss auf den k-Wert. Wie bereits erwähnt kann die Durchlässigkeit in verschiedenen Richtungen des Bodens variieren. In der Natur geschieht dies durch die Kompressionskräfte und den Schichtenaufbau des Bodens vor allem in vertikaler Richtung und bei künstlichen Bodenbauwerken wie Dämmen durch den lagenweisen Einbau des Materials. Im Allgemeinen ist die horizontale Durchlässigkeit größer als die vertikale Durchlässigkeit. Die Variabilität von k ist richtungs- und ortsabhängig. Ist der k-Wert unabhängig vom Ort in einem Boden, der betrachtet wird, kann man von Homogenität, anderenfalls von Heterogenität sprechen. Eine Isotropie ist vorhanden, wenn der k-Wert gleich ist, egal in welcher Richtung der Boden durchströmt wird. Ist dies nicht der Fall, ist der Boden anisotrop. [14]

Um diese Einflussfaktoren so gering wie möglich zu halten, sollte je nach Bodenart eine geeignete Versuchsmethode ausgewählt werden. Hierbei unterscheidet die DIN 18130-1 in Versuche mit gesättigten oder ungesättigten Proben sowie Versuche mit konstantem oder nicht konstanten hydraulischen Gefälle. [13]

3 Labormethoden zur Bestimmung des k-Wertes und deren Auswertung nach DIN 18130-1

3.1 Kompressions-Durchlässigkeitsgerät

Mit Hilfe eines Kompressions-Durchlässigkeitsgerätes wird auf eine Bodenprobe eine statische Belastung aufgebracht. Die Bodenprobe ist vorher nicht wassergesättigt und wird nicht unter einem konstanten hydraulischen Gefälle durchströmt. Besonders für feinkörnige Böden, d.h. für Tone und Schluffe, mit einem Probendurchmesser von mind. 70 mm und einer Höhe von mind. 20 mm eignet sich diese Versuchsanordnung. [13]

Versuchsaufbau

Das KD-Gerät besitzt als wichtigste Bestandteile ein Standrohr, eine Belastungseinrichtung und eine Bodenplatte mit spiralförmiger Rille unter den Filtersteinen. Das Standrohr muss so angeschlossen sein, dass das Wasser die Probe von unten nach oben durchströmen kann. Der Durchmesser des Standrohres sollte der Durchlässigkeit der Probe angepasst werden und auch die Filtersteine müssen ausreichend durchlässig sein. Um den Einfluss durch Luftblasen zu verringern, sollte entlüftetes Wasser verwendet werden. Dieses wird durch eine entsprechende Anlage hergestellt und in einem Vorratsbehälter gesammelt. Es muss darauf geachtet werden, dass der Behälter luftdicht verschlossen ist und ebenfalls ein dichter Anschluss zum Versuchsaufbau gewährleistet ist. Desweiteren werden Ausstech- und Beschneidegeräte sowie ein Abgleichlineal benötigt. [13]

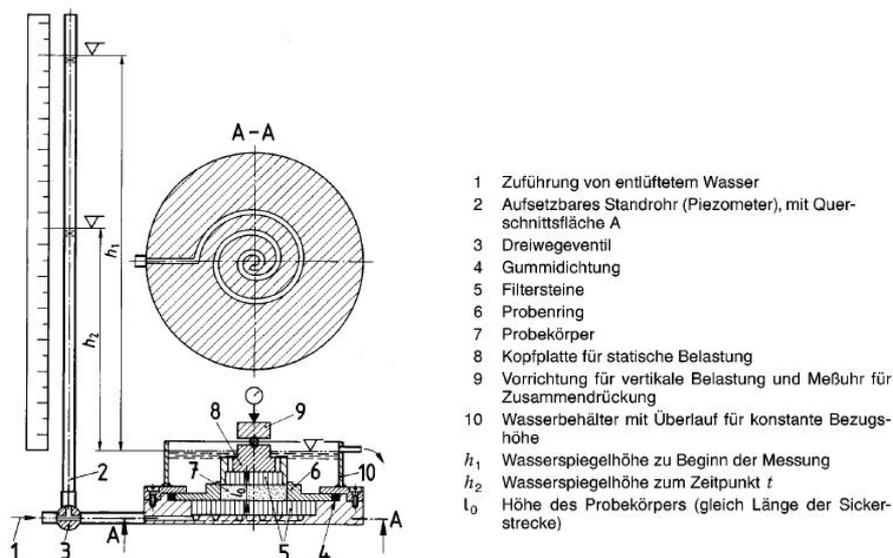


Abbildung 6: Versuchsanordnung für das Kompressions-Durchlässigkeitsgerät [13]

Versuchsvorbereitung

Nachdem genügend entlüftetes Wasser vorbereitet wurde, wird das KD-Gerät bis auf Höhe der unteren Filtersteine mit Wasser gefüllt, um Lufteinschlüsse zu vermeiden. Die Filtersteine können zudem durch Abkochen von Luft befreit werden. Liegt eine ungestörte Bodenprobe vor, wird der Probenkörper durch einen Ausstechring entnommen. Entweder ist dieser gleichzeitig der Probenring oder die Probe wird anschließend in den Probenring des KD-Gerätes gedrückt. Handelt es sich um eine gestörte Bodenprobe, wird diese zunächst ausreichend verdichtet und dann ausgestochen. Um eventuelle Umläufigkeiten zu vermeiden, werden Hohlräume vor allem am Rand mit Hilfe eines Stahlstabs mit dem übrigen Boden verfüllt. Nun werden die Endflächen der Probe sauber abgeglichen, ohne die Probenoberfläche zu verschmieren. Die Probe wird in das Versuchsgerät eingebaut und durch die Filtersteine und die Kopfplatte abgeschlossen. [13]

Versuchsablauf

Das Wasser durchströmt die Probe und diese konsolidiert zunächst aufgrund der senkrecht aufgetragenen statischen Belastung der Kopfplatte. Dabei bleibt die Verbindung zwischen Standrohr und KD-Gerät geschlossen. Der Druck der nun auf der Probe lastet muss größer sein als der spätere hydrostatische Druck, damit ein Gleichgewicht erzielt werden kann. Das in den unteren Filtersteinen gesammelte auskonsolidierte Wasser läuft druckfrei über den Ausguss ab. Es folgt der eigentliche Versuch. Das Ventil wird erst so weit geöffnet, dass sich das Standrohr bis zur oberen Markierung füllt und dann weitergeöffnet, damit die Probe durchströmt werden kann. Um den k-Wert der Probe zu bestimmen, werden die Wasserspiegelstände im Standrohr in regelmäßigen Zeitabständen protokolliert. Ebenfalls sollte die Temperatur des Wassers kontrolliert werden. Ergeben sich aus den Messungen annähernd gleichbleibende Werte, kann der Versuch beendet werden. Die Wasserzuführung wird dafür geschlossen und die Probe ausgebaut. [13]

Auswertung

Der k-Wert in m/s ist nach folgender Gleichung zu bestimmen.

$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (14)$$

Dabei ist:

a	Querschnittsfläche des Standrohrs in m ²
l	Höhe des Probekörpers in m
A	Querschnittsfläche des Probekörpers in m ²
t	Zeitspanne der Messung in s
h ₁ /h ₂	Wasserspiegelhöhe im Standrohr zu Messungsbeginn/-ende in m [13]

3.2 Untersuchung im Versuchszylinder

3.2.1 mit Standrohren

Der Versuch wird unter einem konstanten hydraulischen Gefälle durchgeführt und die eingebaute Probe sollte wassergesättigt sein, dies ist jedoch schwer nachweisbar und kontrollierbar. Für Sande, Kiese und ein Gemisch von Beiden wird durch diesen Versuch der k -Wert bestimmt. In ihren Grundlagen entspricht die Versuchsanordnung dem Versuch, der für die vorliegende Arbeit durchgeführt wurde. [13]

Versuchsaufbau

Der Aufbau des Versuchs besteht aus einem Versuchszylinder mit Anschlüssen für seitliche Standrohre, den Standrohren selbst und zwei Überlaufgefäßen zum Festlegen des Ober- und Unterwasserspiegels. Der Versuchszylinder ist über Schlauchverbindungen, an denen sich Schlauchklemmen zur Regulierung des Wasserflusses befinden, mit den Überlaufgefäßen verbunden. Überdies werden eine Vorrichtung zum Einstampfen des Bodens, Messgefäße, Moosgummi zum Beseitigen der Randumläufigkeiten und wieder eine Anlage zum Entlüften des Wassers benötigt. Die Zufuhr des Wassers erfolgt über das Überlaufgefäß und kann durch eine Schlauchklemme geregelt werden. Durch die Wasserspiegeldifferenz Δh wird die Menge an Wasser, welche durch die Probe fließen soll geregelt. Mit Hilfe der Standrohre, die vom oberen bzw. unteren Rand der Probe einen Abstand von 30 mm haben sollten, kann man dieses hydraulische Gefälle kontrollieren. Um eine günstige Wasserverteilung vom Zu- und Abfluss des Zylinders zu gewährleisten, wird die Probe beidseitig mit Lochplatten abgeschlossen. [13]



Abbildung 7: Versuchsanordnung für den Versuchszylinder mit Standrohren [13]

Versuchsvorbereitung

Wenn alle Schlauchverbindungen dicht angeschlossen sind, werden die Schlauchklemmen zunächst geschlossen. Dann wird die obere Klemme geöffnet und das Überlaufgefäß O füllt sich mit Wasser. Nach dem Öffnen der unteren Klemme ist nun sichergestellt, dass sich keine Luft mehr im Zulaufbereich des Versuchsaufbaus befindet. Anschließend werden die Klemmen wieder geschlossen. Auf die untere Lochplatte wird nun eine Filterschicht aufgebracht. Bei gleichkörnigen Böden sollte ein Moosgummi an der Zylinderwand angebracht werden, damit Randundichtigkeiten vermeiden werden können. Darauf folgt der lagenweise Einbau des getrockneten und homogenisierten Bodens. Die Lagen sollten nicht zu dick sein, damit sich der Boden beim anschließenden Andrücken oder Einstampfen nicht entmischt. Ist genug Material im Zylinder, wird die Probe gerade angeglichen, mit Filtersteinen und der oberen Lochplatte abgeschlossen und die Kopfplatte befestigt. [13]

Versuchsablauf

Zuerst wird die obere Schlauchklemme so weit geöffnet, dass das Wasser über den Überlauf abfließt. Dann wird auch die andere Klemme vorsichtig geöffnet, sodass das Wasser langsam von unten nach oben die Probe durchströmt. Damit werden eventuell eingeschlossene Luftblasen aus dem System geschleust. Wenn das Wasser den Überlauf U erreicht hat, kann die untere Klemme ganz geöffnet werden. Die obere Klemme regelt weiterhin den Zulauf, der so gehalten werden muss, dass ruhig und stetig Wasser in das über den Überlauf fließt. Nach einer kurzen Wartezeit sollte das hydraulische Gefälle konstant sein und die Probe gesättigt, welches sich aber nicht nachweisen lässt. Dabei muss beachtet werden, dass bei grobkörnigen Böden die Wasserspiegeldifferenz Δh kleiner gehalten werden muss, als bei feinkörnigen Böden. Sonst strömt das Wasser turbulent durch die Probe und das Darcy Gesetz ist nicht mehr gültig. Nun können auch die Standrohre seitlich angebracht werden. Sind diese nicht funktionstüchtig, ist eventuell Luft eingeschlossen oder die Rohre sind durch Bodenpartikel verstopft. Es kann jetzt mit der Messung begonnen werden. Dafür wird in regelmäßigen Zeitabständen die am Überlauf U austretende Wassermenge protokolliert. Zusätzlich sollte auch die Temperatur überprüft werden. [13]

Auswertung

Die Auswertung des Versuchs basiert auf folgender Gleichung.

$$k = \frac{Q}{A \cdot i} = \frac{V}{A \cdot i \cdot \Delta t} \quad (15)$$

Mit: Q Durchflussrate in m³/s
 V Wasservolumen in m³
 i hydraulisches Gefälle
 A Querschnittsfläche des Probekörpers
 Δt Zeitspanne der Messung in s [5]

3.2.2 ohne Standrohre

Bei dem Versuch im Versuchszylinder ist keine Sättigung der Probe möglich. Er ist wie der Versuch unter Gliederungspunkt 3.1 gut geeignet für feinkörnige Böden und findet, wenn nicht nachweisbar, unter nicht kontaktierten hydraulischen Verhältnissen statt. [13]

Versuchsaufbau

Für den Versuch werden ein Ausstech- oder Versuchszylinder mit einer Vorrichtung zum Einstampfen, ein Durchlässigkeitsgerät mit gegeneinander verspannter Kopf- und Fußplatte und einliegenden Filterplatten und eine Vorrichtung zur Erzeugung des hydraulischen Gefälles und zur Messung des ein- und ausfließenden Wassers benötigt. Desweiteren braucht man eine Anlage zum Entlüften des Wassers, ein Messer mit gerader Schneide oder ein Stahllineal und einen Messzylinder. [13]

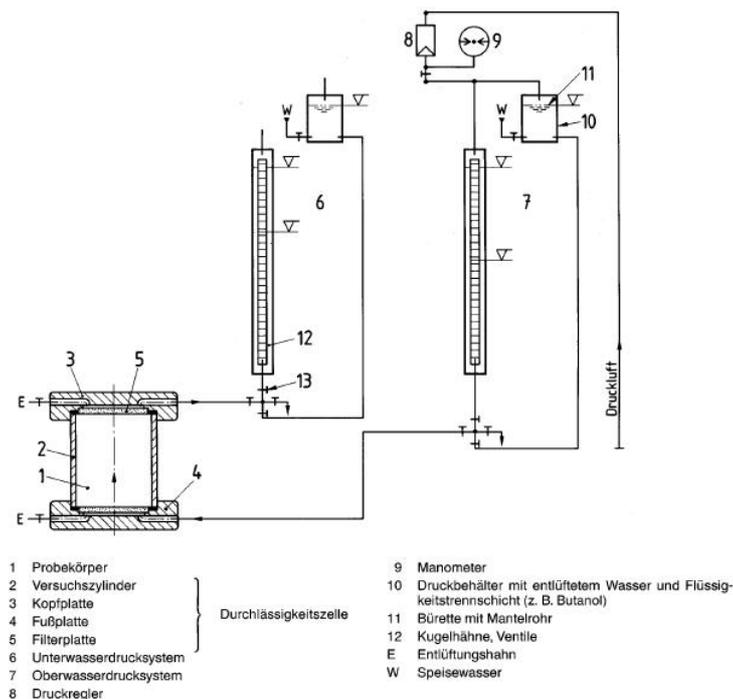


Abbildung 8: Versuchsanordnung für den Versuchszylinder [13]

Versuchsvorbereitung

Die Bodenprobe befindet sich bereits im Ausstechzylinder oder wird in den Versuchszylinder eingestampft und verbleibt dort. Die Oberflächen der Probe werden dem Zylinder angeglichen. Nun werden Vorratsgefäße und Verbindungsleitungen mit entlüftetem Wasser gefüllt. Der Zu- und Ablauf werden mit der Versuchseinheit zur Druckerzeugung und zum Messen des ein- und ausströmenden Wasservolumens verbunden. Nach dem Eindrücken der Filtersteine in Kopf- und Fußplatte wird der Probenzylinder auf die Fußplatte gestellt und mit der Kopfplatte abgedeckt. Danach werden beide Platten gegeneinander verspannt. Diese fertige Prüfzelle wird nun durch die Schlauchverbindungen mit dem restlichen Versuchsaufbau verbunden. [13]

Versuchsablauf

Mit dem Druckregler wird die für den Versuch erforderliche Druckdifferenz auf der Oberwasserseite eingestellt. Dabei sind die Ventile zwischen den Büretten geschlossen. Zwischen den Büretten existiert eine Wassersäulendifferenz deren Höhe berücksichtigt werden muss. Werden nun die Ventile zwischen den Büretten und dem Versuchszylinder geöffnet, kann durch diese die ein- und ausfließende Wassermenge gemessen werden. Bei Böden dessen k-Wert größer ist als 10^{-7} m/s kann das austretende Wasser durch einen Messzylinder aufgefangen werden. Bei der Berechnung des k-Wertes ist dann die an der Bürette gemessene eintretende Wassermenge zu Grunde zu legen. Sobald die ein- und ausströmende Wassermengen gleich sind, kann der Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt werden. In der Berechnung ist zu berücksichtigen, dass sich wegen der veränderlichen Höhen der Wassersäulen in den Büretten auch das hydraulische Gefälle ändert. [13]

Auswertung

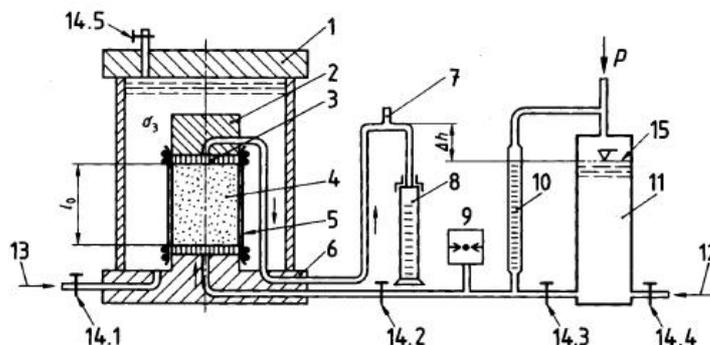
Die Auswertung des Versuchs erfolgt identisch zu derer unter Gliederungspunkt 3.1. [13]

3.3 Untersuchung mit Hilfe der Triaxialzelle

Der Versuch mit einer Triaxialzelle eignet sich für alle Bodenarten mit einem k-Wert kleiner 10^{-5} m/s. Mit einer solchen Zelle kann Druck von allen Seiten auf die Probe aufgebracht werden. Man unterscheidet in den Versuch mit anisotroper und mit isotroper statischer Belastung. Wie im Versuch unter Gliederungspunkt 3.2.1. wird eine nahezu wassergesättigte Probe verwendet, die unter einem um höchstens 1 % abweichendem hydraulischem Gefälle durchströmt wird. Beim Versuch mit anisotroper statischer Belastung ist der Sättigungsgrad nachweisbar. [13]

Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus der Triaxialzelle mit geschlossener Kopfplatte zur Erzeugung isotroper Belastung, einer Vorrichtung zur Erzeugung von konstantem Wasserdruck und einem Druckerzeuger mit Überdruckmessgerät. Desweiteren werden eine Anlage zum Entlüften des Wassers, eine Vorrichtung zum Einstampfen des Bodens und eine Form zur Probenherstellung benötigt. Beim Versuch mit anisotroper statischer Belastung braucht man zusätzlich einen zweiten Druckerzeuger, eine Vorrichtung zur Erzeugung der axialen Belastung und eine Kopfplatte mit Stempel und Messvorrichtung für die Konsolidierungssetzung. Die Triaxialzelle sollte in beiden Fällen auf den Durchmesser des in der Probe vorhandenen Größtkorns abgestimmt sein. Die Probe wird von einer Gummihülle eingefasst und mit ausreichend durchlässigen Filtersteinen begrenzt. Um eine gleichförmige Durchströmung und Entlüftung zu garantieren, sollten die Kopf- und Sockelplatte eine spiralförmige Rille haben. Durch den Druckerzeuger wird kontinuierlich Wasser von unten nach oben durch die Probe geleitet. Die Gummihülle steht so unter einem konstanten Zellulardruck, welcher größer ist als der Oberwasserdruck, jedoch sollte hierbei der Grenzzustand nicht erreicht werden. Der Oberwasserdruck wird durch Druckluft erzeugt. Beim Versuchsaufbau mit anisotroper statischer Belastung wird zudem am Unterlauf der zweite Druckerzeuger angeschlossen. [13]



- | | | |
|---------------|---|---|
| l_0 | Höhe des Probekörpers (gleich Länge der Sickerstrecke) | }
Versucheinheit A
Triaxialzelle

}
Versucheinheit B |
| 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 Zellulardrucks 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 | |
- ANMERKUNG : Versucheinheit A: Triaxial- oder Druckzelle (Prüfzelle)
 Versucheinheit B: Vorrichtung zur Druckerzeugung und zur Messung des zu- und abfließenden Wasservolumens

Abbildung 9: Versuchsanordnung für die Triaxialzelle mit isotroper statischer Belastung [13]

Versuchsvorbereitung

Zunächst werden wie bei den zuvor beschriebenen Versuchen der Druckbehälter sowie die Leitungen bis zur Höhe der unteren Filtersteine mit entlüftetem Wasser gefüllt. Wenn angenommen werden kann, dass alle Lufteinschlüsse beseitigt sind, werden alle Ventile geschlossen und der Oberwasserdruck und der Druckerzeuger abgestellt. Der Einbau der Proben erfolgt wie unter Gliederungspunkt 3.2.1 lagenweise, allerdings vorerst in einer separaten Form. Mit Hilfe einer Vorrichtung zum Ummanteln eines Probekörpers mit einer Gummihülle wird nach dem Angleichen der Enden der Probe diese in die Gummihülle eingesetzt. Der Probekörper kann nun in die Triaxialzelle eingefügt und entsprechend abgeschlossen werden. [13]

Versuchsablauf

Nachdem der Zelldruck aufgebracht wurde, wird das Ventil 14.3 geschlossen und das Ventil 14.2 geöffnet. Die einströmende Wassermenge wird mit der Bürette und die ausströmende Wassermenge mit dem Messzylinder gemessen. Sind beide Wassermengen je Zeiteinheit gleich, kann der k-Wert durch hydraulisches Gefälle und Durchfluss errechnet werden. Der Oberwasserdruck wird mit einem Überdruckmessgerät bestimmt. Beim Versuch mit anisotroper statischer Belastung wird zuerst durch Aufbringen eines gleichgroßen Drucks beider Druckerzeuger die Probe gesättigt. Ein den Sättigungsdruck übersteigender Zelldruck wird erzeugt um eine Konsolidierung der Probe zu bewirken. Die Sättigung ist erreicht, wenn der Anstieg des Zelldrucks einen ebenso großen Anstieg des Porenwasserdrucks (gemessen am Überdruckmessgerät) zur Folge hat. Der eigentliche Versuch entspricht dem mit isotroper Belastung, außer, dass nach Erhöhung des Drucks durch beide Druckventile das Absinken von beiden Druckstempeln in regelmäßigen Zeitabständen protokolliert und daraus die durchströmte Wassermenge bestimmt wird. [13]

Auswertung

Zur Bestimmung des k-Wertes wird folgende Formel verwendet

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h} \quad (16)$$

Dabei ist:

Q	Durchfluss in m ³ /s
A	Querschnittsfläche des Probekörpers in m ²
l	Höhe des Probekörpers in m
$h = \frac{p}{\gamma_w - \Delta h}$	beim Versuch mit isotroper statischer Belastung, wobei p der Wasserdruck im Druckzylinder ist
$h = \frac{p_2 - p_1}{\gamma_w}$	beim Versuch mit anisotroper statischer Belastung, wobei p ₁ der Oberwasser- und p ₂ der Unterwasserdruck ist [13]

4 Material und Methode

4.1 Beschreibung des untersuchten Bodens

Die in Eimern angelieferten gestörten Bodenproben stammen aus einem Dammkern vom Rhein. Das Bodenmaterial wurde an verschiedenen Stellen entlang des Damms entnommen. Die Proben sind Mischproben, um zu garantieren, dass immer mit nahezu dem gleichen Bodenmaterial Versuche durchgeführt werden. Der für die vorliegende Arbeit untersuchte grobkörnige Boden kann nach DIN 18196 klassifiziert werden. Die Werte hierfür lassen sich aus der Korngrößenverteilung des Bodens aus dem Prüfbericht ermitteln.

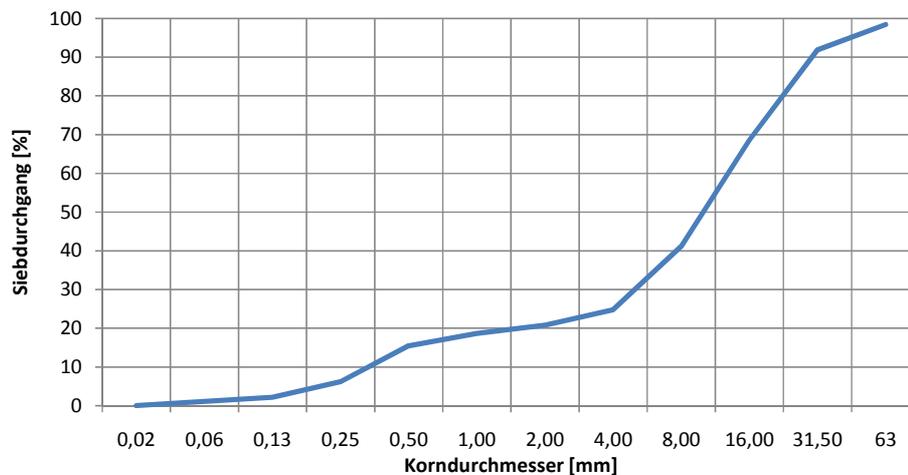


Abbildung 10: Kornverteilungslinie des untersuchten Bodens [15]

Korndurchmesser d [mm]	Massenanteil Δm_i [%]	Massenanteil kumulativ $\sum \Delta m_i$ [%]	mittlere Korndichte ρ_i
0,02	1,05	0	2,65
0,06	1,1	1,05	2,65
0,13	4,09	2,15	2,65
0,25	9,21	6,24	2,65
0,50	3,17	15,45	2,65
1,00	2,15	18,62	2,65
2,00	4,04	20,77	2,65
4,00	16,31	24,81	2,65
8,00	27,48	41,12	2,65
16,00	23,26	68,6	2,65
31,50	6,58	91,86	2,65
63	1,55	98,44	2,65

Tabelle 2: Massenanteile der einzelnen Korndurchmesser des untersuchten Bodens [15]

Der Anteil des Korndurchmessers $\leq 0,063$ mm ist mit weniger als 5 % des Gesamtvolumens des Bodens vertreten. Mehr als 60 % der Körner des Bodens haben einen Durchmesser ≥ 2 mm. Daraus lässt sich schließen, dass es sich um einen Kies handelt. Zur genaueren Bestimmung wird die Ungleichförmigkeitszahl errechnet.

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{13}{0,32} = 40,625$$

Der Kies kann als weitgestuft bezeichnet werden, weil ihr Betrag größer ist als 6. Die Ebenheit der Kornverteilungslinie wird durch die Krümmungszahl C_C wie folgt beschrieben.

$$C_C = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{5^2}{13 \cdot 0,32} = 6,01$$

Der Grenzwert von 3 wird überschritten, was den Boden nun abschließend als intermittierend gestuftes Kies-Sand-Gemisch, kurz GI, benennt. Die treppenartig verlaufende Kornverteilungslinie deutet darauf hin, dass ein Korngrößenbereich, nämlich der zwischen 0,5 und 4 mm nahezu fehlt.

Ein weiterer Parameter, welcher den Boden charakterisiert, ist der effektive Korndurchmesser d_w . Mit der Formel 11 aus Abschnitt 2.3 errechnet sich d_w zu 0,934 mm also rund 1,0 mm (siehe Anhang). Mit diesem und den Durchmessern d_{10} sowie d_{25} lässt sich aus der Korngrößenverteilung der k-Wert ermitteln. Die Formel nach Seiler für Kies-Sande lautet wie folgt.

$$k = \frac{\chi_{25}(C_U)}{1000} \cdot d_{25}^2 \quad (17)$$

Der Korrekturfaktor χ_{25} in Abhängigkeit von C_U kann aus einer Tabelle abgelesen werden und hat einen Wert von 1,44. Aus der Kornverteilungslinie ergibt sich für d_{25} ein Wert von 4,0 mm. Setzt man nun alle Werte in die Formel ein, erhält man eine Durchlässigkeit von $k = 2,304 \cdot 10^{-2}$ m/s. Eine andere Möglichkeit den k-Wert einzuschätzen, ist die Einteilung in Durchlässigkeitsbereiche. Nach Kuntsche wird ein Boden der Gruppe GI in den Bereich von $k = 10^{-4}$ bis 10^{-2} m/s eingestuft und ist damit stark durchlässig.

Zu der Beschreibung eines Bodens gehören auch dessen optische Merkmale. Die einzelnen Körner des Bodens sind gerundet und kugelig, flach oder plattig. Die Oberflächenstruktur des Kies-Sand Gemisches ist glatt, weil die gestörte Probe von einem Flussufer am Rhein entnommen wurde und das Wasser den Körnern dessen Form gab.

Dem Boden können nach dieser Charakterisierung folgende Eigenschaften zugeordnet werden. Er besitzt aufgrund der Varianz der Korndurchmesser eine sehr große Scherfestigkeit und eine gute Verdichtungsfähigkeit. Wegen des geringen Feinkornanteils ist das Kies-Sand-Gemisch durchlässig. Desweiteren lässt es sich wenig zusammendrücken, ist wenig frostempfindlich und mäßig erosionsgefährdet. Aus diesen Eigenschaften lassen sich Einsatzbereiche für den Boden ableiten. Als Baustoff für Straßen- und Bahndämme und Stützkörper und als Baugrund für Gründungen ist er sehr gut geeignet. Möglich wäre es auch, den Boden als Baustoff für Erd- und Baustraßen sowie für Drainagen zu verwenden. Für Dichtungen ist er ungeeignet. [12]

Der vorliegende Boden kann außerdem hinsichtlich seiner Entmischungsneigung bewertet werden. Auf Grundlage von Entmischungsversuchen wurde festgestellt, dass für konvex geformte Körnungslinien die Entmischungsneigung des Bodens zunimmt, je gröber er zusammengesetzt ist. Die oben gezeigte Kornverteilungslinie verläuft zwar treppenartig, insgesamt jedoch konvex. Der geringe Anteil von Körnern zwischen 0,02 und 4 mm Durchmesser sondert sich als erstes vom gröberen Material ab. Dieser Fraktionsbereich ist zudem in sich nicht homogen. [16]

4.2 Versuchsaufbau

Der Versuch wurde in den Räumlichkeiten an der Professur Bodenmechanik und Grundbau im Bodenmechanischen Labor aufgebaut und durchgeführt. Der Versuchszylinder und Überlaufgefäße wurden von der MFPA Weimar, Fachgebiet Geotechnik ausgeliehen. Zusatzteile und weitere für den Versuch benötigte Geräte wurden entweder vom Labor zur Verfügung gestellt oder hinzugekauft.

Der Aufbau des Versuchs entspricht im Prinzip der unter Gliederungspunkt 3.2.1 beschriebenen Versuchsanordnung mit dem Versuchszylinder unter konstantem hydraulischem Gefälle. Hauptsächlich besteht die Versuchsanordnung aus dem großen Versuchszylinder und dem Überlaufgefäß zur Erzeugung des Oberwasserspiegels. Der Versuchszylinder ist aus 5 mm dickem Plexiglas hergestellt, hat einen Innendurchmesser von 29 cm und eine Gesamthöhe von 50 cm. Die Grundfläche der Zylinders ergibt sich zu $A = 660,5 \text{ cm}^2$. Auf zwei gegenüberliegenden senkrechten Geraden auf der Mantelfläche des Zylinders befinden sich Anschlussstellen zur Messung des hydraulischen Gefälles und zum Auslauf des Wassers. Die erste Anschlussstelle liegt 5 cm oberhalb des Bodens des Zylinders und die nächste auf der gegenüberliegenden Seite um 5 cm höher. So ergeben sich fortlaufend fünf Anschlüsse auf der einen und vier auf der anderen Seite. Die Röhren, die durch die Anschlüsse aus dem Zylinder herausführen, haben einen Außendurchmesser von 7 mm und werden mit Schraubverbindungen befestigt. Sie führen dann rechtwinklig nach oben weiter und dienen als Standrohre. Da die Röhren aus durchsichtigem Kunststoff sind, kann man den Wasserspiegel ablesen und gut erkennen, ob sie eventuell durch kleinere Bodenpartikel verstopft sind. Der letzte oder vorletzte Anschluss dient dann als Auslauf und nicht als Standrohr. Der Versuchszylinder ist gleichzeitig auch das Überlaufgefäß für das Unterwasser, da durch die Einstellung des hydraulischen Gefälles nur geringe Mengen an Wasser austreten und so die Öffnung der Anschlussstelle ausreicht.

Oben und unten begrenzt wird der Zylinder von 5 cm starken quadratischen Plexiglasplatten, welche eine Einkerbung für den Zylinder und einen ebenso großen Kreisausschnitt besitzen. In der unteren Platte befinden sich an jeder Seite Anschlüsse für den Zulauf des Wassers.

Davon wird aber nur einer für den Versuch gebraucht und die anderen dicht verschlossen. Damit kein Wasser aus der Plexiglas konstruktion entweichen kann, werden die obere und die untere Platte durch acht Gewindestangen und zugehörigen Muttern fest zusammengehalten. Oben ist der Zylinder offen und unten ist eine Trichterkonstruktion angeschlossen. Diese dient der einfacheren Entwässerung und Reinigung nach einem Versuch und kann bei Bedarf geöffnet werden. Desweiteren gibt es zur Stabilisierung der Probe im Zylinder einen Aufsatz, der auch an Druckluft angeschlossen werden kann. Die daran angebrachte Plexiglasplatte passt genau in den Zylinder und der Aufsatz dient so als geringe Auflast und Begrenzung für die Probe. Der gesamte Aufbau des Versuchszylinders ist in einen fahrbaren Tisch mit einer Höhe von 90,6 cm eingelassen.

Das Überlaufgefäß zur Herstellung des Oberwasserspiegels befindet sich in einem nebenstehenden Metallregal mit höhenverstellbaren Einsatzböden. Für die Versuche wurde die Höhe von 130,8 cm nicht verändert. Es besteht aus einem kleineren Plexiglaszylinder, der auf einem 5 cm hohen Plastikfuß steht. Dieser hat wie der Versuchszylinder eine Einkerbung und mehrere Möglichkeiten für seitliche Anschlüsse. Damit kein Wasser unten am Zylinder austreten kann, wird auch hier mit Gewindestangen gearbeitet. Im Boden des Plastikfußes befinden sich Löcher, die mit den seitlichen Anschlüssen verbunden sind. In die Löcher können nach Bedarf verschieden hohe Schlauchaufsätze eingeschraubt werden, um das Oberwasserpotenzial zu verändern. An dem Überlauf befinden sich ein Anschluss zur Wasserzufuhr, ein anderer für den Überlauf und ein weiterer dient als Zulauf zum Versuchszylinder. Alle Anschlüsse können durch Hähne geöffnet oder geschlossen werden.



Abbildung 11: Versuchsaufbau

Die Verbindungen von Wasserhahn zu Überlaufgefäß und die von Überlaufgefäß zu Versuchszylinder werden durch einen Schlauch mit 20 mm Durchmesser hergestellt. Vom Überlaufgefäß führt zudem ein Schlauch zurück ins Waschbecken, um den Wasserspiegel konstant zu halten. Um die Dichtigkeit des Aufbaus zu gewährleisten, werden die Gewinde von den Hähnen mit Dichtband umwickelt. Die Schläuche werden mit Rohrschellen an den Hähnen und am Wasserhahn befestigt. Außen an den Zylindern werden Maßbänder mit Klebestreifen angebracht, um das hydraulische Gefälle und die Länge der Probe zu messen. Bevor eine Probe eingebaut werden kann, werden ein Dichtungsring und Gitter aus Metall und aus Kunststoff von grob- zu feinmaschig sortiert unten in den Zylinder eingelegt. Die Probe wird dann oben durch den Aufsatz abgeschlossen, dessen Plexiglasplatte ebenfalls Löcher aufweist. Dieser Aufbau garantiert die gleichmäßige Verteilung des Wassers durch die Probe.

Für den Versuch benötigt man außerdem einen Messbecher und eine Waage, um das Wasservolumen zu bestimmen, welches durch die Probe strömt. Die Zeit wird mit einer Stoppuhr gemessen. Zum Mischen und Einbauen des Bodens wird eine Metallschaufel verwendet. Desweiteren werden Schüsseln zum Auffangen von Restwasser und verschiedene Werkzeuge zum Installieren und Reinigen der Apparatur verwendet. Eine kleine Leiter hilft beim Befüllen und Reinigen des Zylinders. (weitere Bilder siehe Anhang)

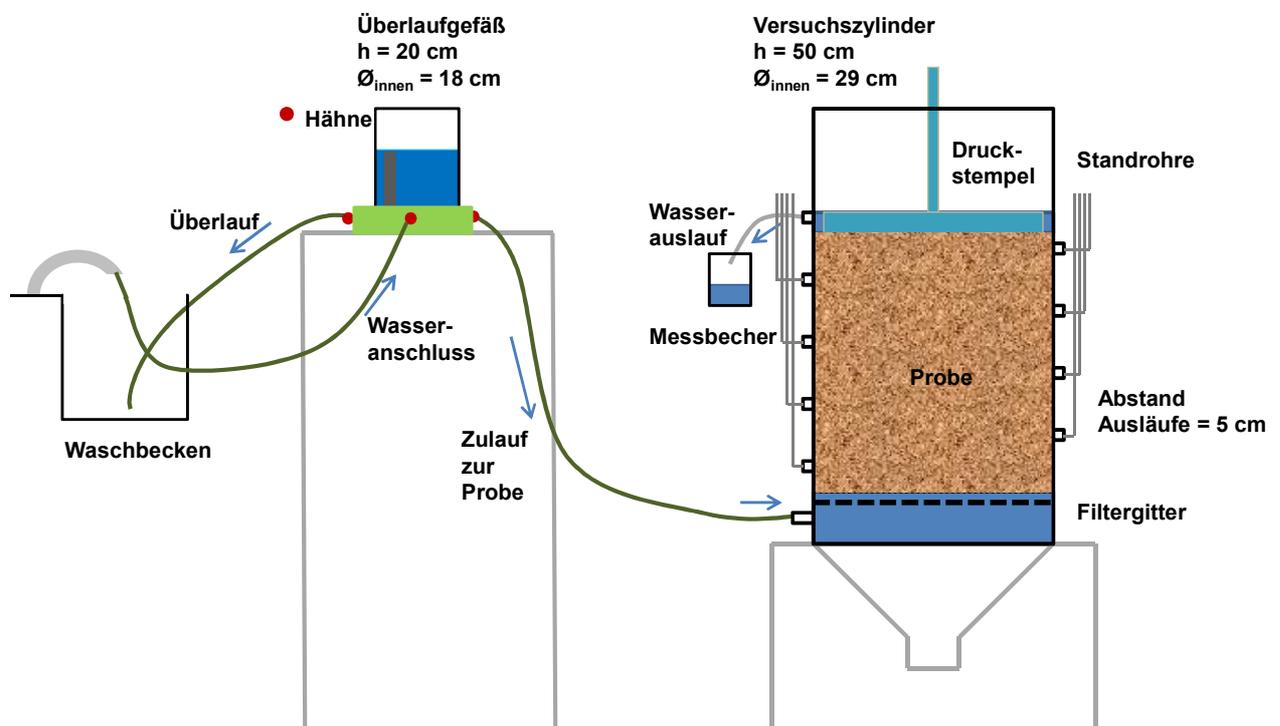


Abbildung 12: Schema des Versuchsaufbaus

4.3 Versuchsvorbereitung

Um den Versuch möglichst störungsfrei durchzuführen und am Ende genaue Ergebnisse zu erzielen, sind verschiedene Vorkehrungen und Überlegungen zu treffen.

Zunächst ist zu entscheiden, in welcher Richtung die Probe durchströmt wird. Bei den meisten Versuchsanordnungen, wie auch in dem für diese Arbeit durchgeführten Versuch sickert das Wasser von unten nach oben durch die Probe. So kann eventuell eingeschlossene Luft zwischen den Körnern besser entweichen und der Boden wird nahezu voll mit Wasser gesättigt, was sich positiv auf die Versuchsergebnisse auswirkt. Um Auflockerungen des Kornsystems am oberen Ende der Probe zu vermeiden, ist die Begrenzung und Auflast durch den Druckstempel unerlässlich.

Eine gleichbleibende Raum- und Wassertemperatur garantiert vergleichbare Versuchsergebnisse, da die Eigenschaften des Wassers temperaturabhängig sind. Die Raumtemperatur liegt konstant bei 22 °C und die Wassertemperatur des Leitungswassers bei 20 °C. Daraus resultieren eine kinematische Viskosität von $\nu = 1,0105 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ und eine Dichte von $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$ des Wassers. Es wird von einer Newton'schen Flüssigkeit ausgegangen, was besagt, dass sich die Viskosität bei gleichbleibender Temperatur nicht verändert. Zudem sollte bei einem Durchlässigkeitsversuch entlüftetes Wasser verwendet werden. Bei dem Versuch kommen große Wassermengen zum Einsatz und der Probendurchmesser ist groß genug, sodass der Einfluss von der Luft im Wasser gering bleibt und normales Leitungswasser verwendet wird. [8] [11]

Um genaue Versuchsergebnisse zu gewinnen, sollte eine voll gesättigte Probe verwendet werden. Dies wird erreicht, indem schon beim schichtenweisen Einbau des Bodens das Wasser von unten nach oben langsam die Probe sättigt. Es kann also auch ohne eine Kontrolle, ob die in die Probe bei konstantem Druck und konstantem hydraulischen Gefälle ein- und ausströmende Wassermenge gleich ist, angenommen werden, dass eine volle Sättigung vorliegt.

Außerdem muss die Probe ausreichend verdichtet werden. Angestrebt wird die Proctordichte ρ_{Pr} , die sich während des Versuchs nicht ändern darf. Der Boden wird in Lagen in den Zylinder eingebracht und mit der Schaufel angedrückt. Da der Versuchszylinder gleichzeitig das Überlaufgefäß ist, übt das Wasser einen Druck zusätzlich zur Auflast durch den Druckstempel aus. Diese Kraft reicht aus, um den Boden zu verdichten. Der Feinkornanteil wird nach dem Wiegen und vor dem Einbau mit Wasser vermengt, damit er sich besser verdichten und einbauen lässt.

Auf eine glatte Oberfläche bzw. einen glatten Abschluss der Probe im Zylinder muss geachtet werden, um Kornumlagerungen zu vermeiden. Eine eventuell auftretende Randumläufigkeit sollte durch Auskleiden des Zylinders mit Moosgummi oder ähnlichem

vermieden werden. Dann gibt es allerdings Einwirkungen von Spannungen auf den Randbereich der Probe. Der Probendurchmesser bei dem Versuch ist so groß, dass der Einfluss von Umläufigkeiten gering ist, und das Moosgummi weggelassen werden kann.

Am wichtigsten von allen Versuchsvorbereitungen ist jedoch die Einhaltung des Gesetzes von Darcy. Dazu zählen die laminare Strömung und damit ein geeignetes hydraulisches Gefälle. Die Querschnittsfläche der durchflossenen Porenkanäle darf sich nicht ändern und Kornumlagerungen sollen verhindert werden. Die Durchströmung darf keine Konsolidierung oder Schwellung der Probe hervorrufen. Vor der Durchführung des Versuchs kann durch Umstellen der Formeln 5 und 7 das einzuhaltende hydraulische Gefälle ermittelt werden.

$$Re \cdot \nu > v \cdot d_w = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot d_w \quad ; \quad \Delta h < \frac{Re \cdot \nu}{k \cdot d_w} \cdot L$$

Hierbei wird für die Reynoldszahl Re der Maximalwert von 10 angenommen. Die Länge L beträgt 32 cm und die kinematische Viskosität hat einen Wert von $\nu = 1,0105 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Der wirksame Korndurchmesser d_w wurde unter Abschnitt 4.1 zu 0,934 mm berechnet. Für den Durchlässigkeitsbeiwert können nun je nach Probeneinbau verschiedene Werte eingesetzt werden. Nimmt man z.B. einen k -Wert von $k = 2,304 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ nach Seiler an, erhält man ein $\Delta h < 15 \text{ cm}$.

Eine weitere Grenze für das hydraulische Gefälle i gibt die Formel nach Ohde für laminare Strömung. Daraus ergibt sich ein maximales Gefälle von 1,228 beim Versuch mit der ursprünglichen Korngrößenverteilung. [3]

$$i < \frac{0,1}{d_w^3} \quad (18)$$

5 Versuchsdurchführung

5.1 Entmischung des Bodens

Bevor der Boden systematisch entmischt in den Versuchszylinder eingebaut werden kann, wird er zunächst durch Sieben in verschiedene Korngruppen eingeteilt. Da es sich um ein Sand-Kies-Gemisch handelt, wird nur eine Siebanalyse und keine Schlämmanalyse durchgeführt. Die Probenmenge von ca. 90 kg reicht vollkommen aus, um den wesentlichen Durchschnitt der Korngrößenverteilung des Bodens zu repräsentieren. Zur Siebung werden nicht alle verfügbaren Siebgrößen verwendet. Vielmehr soll der Boden in vier Gruppen eingeteilt werden. Dies erfolgt durch die Einteilung der Korngrößen in zu ungefähr 25 % des Massenanteils. Körner größer als 31,5 mm werden aussortiert. Warum zusätzlich das 1 mm Sieb verwendet wird, wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben.

Bezeichnung	Massenanteil	Korngröße/Sieb
M1	18,62 %	< 1 mm
M1a	6,19 %	> 1 mm
M2	16,31 %	> 4 mm
M3	27,48 %	> 8 mm
M4	29,84 %	> 16 mm

Tabelle 3: Einteilung des Bodens

Versuchsaufbau

Vor dem Sieben werden die Bodenproben in Emailleschüsseln im Ofen bei 105 °C getrocknet. Zum Sieben werden nun die Siebe mit den Größen 1, 4, 8, 16 und 31,5 mm und ein Siebboden verwendet. Das Sieb 31,5 mm dient nur dazu die größeren Steine auszusortieren. Die Siebe sind quadratisch aus Holz mit einem Metallgitter und lassen sich gut stapeln. Da kein Rütteltisch oder ähnliches zur Verfügung stand, wird mit Hilfe eines Metallrohrs, mit dem der Siebsatz hin und her gerüttelt werden kann, auf dem Fußboden per Hand gesiebt. Als Unterlage zum Schutz und um mögliche Reste aufzufangen wird eine Plane verwendet. Zum Aufbewahren des gesiebten Bodens werden die Eimer, in denen das Material angeliefert wurde, verwendet. Desweiteren werden eine Waage, eine Metallschaufel und andere Gefäße benötigt. Wird drinnen gesiebt, ist eine Atemschutzmaske erforderlich und grundsätzlich ist Arbeitskleidung zu empfehlen.

Versuchsdurchführung

Nachdem die Proben aus dem Trockenofen entnommen und abgekühlt sind, kann mit dem Sieben begonnen werden. Die gereinigten Siebe sind der Größe nach geordnet aufgestapelt. Nun werden einige Schaufeln voll Material auf den Siebsatz gegeben und dieser hin und her

gerüttelt. Nach kurzer Zeit kann das 31,5 mm Sieb abgenommen werden, da sich die großen Steine leicht aussondern lassen und damit das Rütteln leichter fällt. Nach ein bis zwei Minuten kann das Sieben beendet werden und die einzelnen Siebe werden abgenommen und in den entsprechenden Eimern entleert. Danach wird erneut zu Sieben begonnen und solange wiederholt, bis alles Material entmischt ist. Die gesiebten Probenbestandteile werden in den Eimern mit Deckel trocken gelagert.

Auswertung

Zur Auswertung der Siebung werden alle Massenanteile gewogen und auf die Gesamtmasse in Prozent nach folgender Formel umgerechnet.

$$M1(\%) = \frac{m_1}{m_{ges}} \cdot 100 \quad (19)$$

Hierbei ist m_1 die Masse des Siebdurchgangs durch das 1 mm Sieb und m_{ges} die Gesamtmasse aller Siebdurchgänge. Durch diese Auswertung ergeben sich die nachstehenden Ergebnisse.

Bezeichnung	Korngröße [mm]	Masse [g]	Masse aus Korngrößenverteilung [%]	Gewogene Masse [%]
M1	< 1	14.997	18,62	16,10
M1a	> 1	8.278	6,19	8,89
M2	> 4	18.666	16,31	20,04
M3	> 8	27.815	27,48	29,85
M4	> 16	18.823	29,84	20,20
	> 31,5	4.583	1,55	4,92
Gesamt		93.162		

Tabelle 4: Ergebnisse der Siebung

Für die insgesamt 6 Versuche müssen die Bodenproben mehrmals getrocknet und gesiebt werden. [17]



Abbildung 11: Aufbau und Geräte des Siebversuchs

5.2 Zusammensetzung der Proben

Für die vorliegende Arbeit wurden insgesamt sechs Versuche durchgeführt. Für die ersten drei Versuche werden zunächst die Massenanteile M1 - M4 in einzelnen Schichten eingebaut und dann stufenweise homogenisiert. In den letzten drei Versuchen wird nach und nach der Feinkornanteil erhöht.

Versuch 1

Für den ersten Versuch werden die Massenanteile M1 bis M4 zufällig und nacheinander eingebaut. Vorher werden M1 und M1a gemischt um nur noch 4 Teile zu erhalten. Alle Schichten sollen eine Einbauhöhe oder laut Formel 3 eine Länge l von 32 cm haben. Diese Höhe resultiert aus der Geometrie des Versuchszylinders. An dem angebrachten Maßband kann man ablesen, dass die ersten 4 cm Filter und Gitter sind. Die darauffolgenden 32 cm nimmt die Probe ein und es bleiben noch 3 cm bis zum Auslauf des Überlaufs. Um das erforderliche Einbaugewicht der einzelnen Schichten zu bestimmen, wird mit mittleren Proctordichten nach Prinz gearbeitet. Der Massenanteil in Prozent wird auf die Gesamthöhe von 32 cm bezogen. Die so erhaltende Schichtdicke wird mit der Grundfläche des Versuchszylinders von $A = 660,5 \text{ cm}^2$ multipliziert. Das Volumen wird nun mit der geschätzten Dichte multipliziert und man erhält das Einbaugewicht. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle aufgelistet. Es wurden die Massenanteile aus der Siebung und nicht aus der ursprünglichen Korngrößenverteilung verwendet. Dieses Verfahren wird für alle weiteren Versuche angewandt. [12]

	Masse [g]	ρ_{Pr} [g/cm ³]	Masse [%]	Schichtdicke [cm]	Volumen [cm ³]	Einbaugewicht [g]
M1	23.275	1,6	26,28	8,5	5.614,3	8.982,88
M2	18.666	1,6	21,07	6,7	4.425,4	7.080,64
M3	27.815	1,8	31,40	10,0	6.605,0	11.889,00
M4	18.823	1,9	21,25	6,8	4.491,4	8.533,66
			100	32		36.486,18

Tabelle 5: Einbaumengen für Versuch 1

Der Boden ist in diesem Versuch zu 100 % entmischt und zu 0 % homogenisiert. Nach dem Abwiegen der Einbaumengen wird unten M3 in den Zylinder eingefüllt, danach M1, M2 und M4.

Versuch 2

Für diesen Versuch werden die zuvor errechneten Einbaumassen halbiert. Dann werden die Teilproben zufällig miteinander kombiniert und homogenisiert. So entstehen wieder 4 Schichten. Als erstes wird M1 mit M2 gemischt und eingebaut. Es folgen M3 mit M4, M1 mit M3 und als Abschluss bleiben M2 mit M4.

Versuch 3

Im dritten Versuch werden die Ausgangseinbaugewichte geviertelt. Dann werden jeweils ein Viertel von M1, M2, M3 und M4 mit einander vermengt. Es ergeben sich 4 gleiche Schichten, die eingebaut in den Zylinder eingebaut werden. In diesem Versuch ist der Boden zu 100 % homogenisiert und zu 0 % entmischt.



Abbildung 12: Aufbau Versuch 1

Versuch 4

Für diesen und die zwei folgenden Versuche wird der Boden in Skelett und Füllung unterteilt. Der maßgebende Wert hierfür ist der wirksame Korndurchmesser $d_w \approx 1$ mm. Deswegen wurde bei der Siebung das 1 mm Sieb verwendet. Alle Korngrößen über einem Korndurchmesser von 1 mm bilden das Kornskelett und alle Korngrößen kleiner d_w bilden die Füllung bzw. den Feinkornanteil. Damit sind 16,1 % des Originalbodens Feinanteil und 83,9 % das Skelett. Die Menge an Feinkornmaterial würde für diese drei Versuche nicht ausreichen. Daher wurde zusätzlich noch Kernmaterial des Damms, welches einen sehr viel höheren Feinkornanteil besitzt, getrocknet und für die Versuche verwendet. Für den vierten Versuch wird der Feinkornanteil von 16,1 % auf 25 % erhöht und somit der Skelettanteil verringert. Dazu werden die Prozentsätze mit denen aus der Siebung ermittelten Massen ins

Verhältnis gesetzt und das neue Einbaugewicht mit Hilfe der folgenden Tabelle, die schon im ersten Versuch verwendet wurde, errechnet.

	Masse gesamt [g]	Masse [%]	P_{Pr} [g/cm ³]	Masse [%]	Schichtdic ke [cm]	Volumen [cm ³]	Einbaugewicht [g]
	4.097	4,40	aussortiert				
M4	16.826	18,06	1,9	18,89	6,05	3993,10	7586,88
M3	24.864	26,69	1,8	27,92	8,93	5900,65	10621,17
M2	16.686	17,91	1,6	18,73	6,00	3959,79	6335,66
M1 a	7.400	7,94	1,6	8,31	2,66	1756,09	2809,74
M1	23.287	25,00	1,6	26,15	8,37	5526,37	8842,20
	93.162	100,00		100	32		36.195,66

Tabelle 6: Einbaumengen für Versuch 4

Um den Einbau so homogen wie möglich zu gestalten, werden die errechneten Massen in vier Teilen abgewogen und anschließend homogenisiert.

Die Veränderung der Massenanteile bringt auch eine Änderung der Korngrößenverteilung mit sich. Die neuen Proben können nach DIN18196 in Bodenklassen eingeteilt werden.

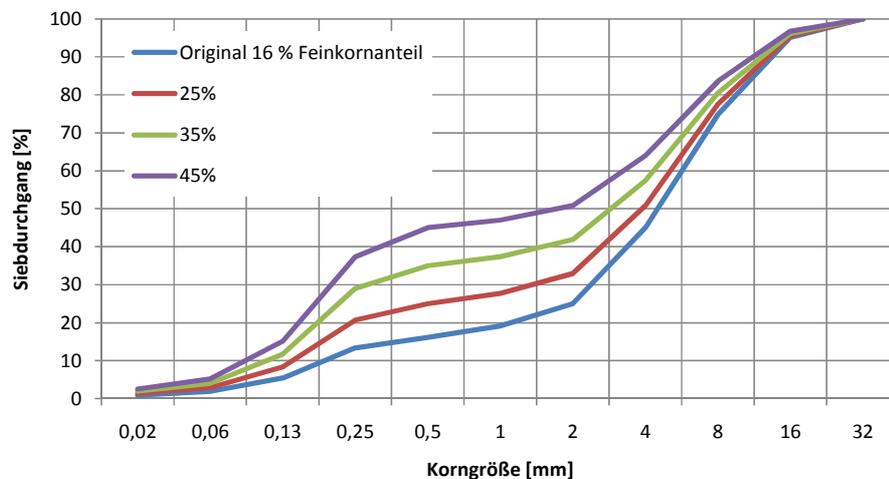


Abbildung 13: Körnungslinien der Proben für Versuche 4-6

Bei dem Originalboden handelt es sich um einen weitgestuften Kies G1. Erhöht man den Feinkornanteil um 25 %, kann die Bezeichnung G1 erhalten bleiben.

Versuch 5

Für den Versuch 5 wird der Feinkornanteil auf 35 % erhöht (Tabelle siehe Anhang). Beim Einbau von 32 cm des Materials kam es bei der Sättigung der Probe zur Entmischung und Grundbruch. Deshalb wurden nur ca. 20 cm der Probe eingebaut. Die Probe kann ebenfalls

als intermittierend gestuftes Sand-Kies-Gemisch bezeichnet werden, da sich der Anteil von Körnern über 1 mm verringert anstatt erhöht.

Versuch 6

Beim sechsten und letzten Versuch liegt der Feinkornanteil bei 45 %. Die Probe wird auch hier nur über eine Länge von 20 cm eingebaut (Tabelle siehe Anhang). Da sich der Anteil von Körnern kleiner 0,063 mm auf über 5 % erhöht hat, aber der Anteil der Körner kleiner als 2 mm noch unter 60 % liegt, kann man die Probe als Kies-Schluff-Gemisch GU bezeichnen.

5.3 Beschreibung des Versuchsablaufes

Bevor mit den Versuchen begonnen werden kann, wird zuerst die Durchlässigkeit der Versuchsanordnung überprüft, um mögliche Fehler auszuschließen. Der k-Wert des Versuchsaufbaus muss in jedem Fall größer sein, als der k-Wert des Bodens. Für diesen Versuch wird der leere Aufbau mit Wasser durchströmt. Der Ablauf ähnelt der folgenden Versuchsbeschreibung und es wurde ein Durchlässigkeitsbeiwert von $1,15 \cdot 10^{-1}$ m/s ermittelt, welcher größer ist als der mit der Formel von Seiler unter Abschnitt 4.2 errechnete k-Wert des Kies-Sand Gemisches.

Es wurden für diese Arbeit sechs Versuche durchgeführt. Der Versuchsaufbau bleibt immer gleich, jedoch wurden jeweils die Probenzusammensetzung und auch das hydraulische Gefälle verändert. Bevor ein Versuch beginnen kann, werden die Proben bereitgestellt. Dafür wiegt man die erforderlichen Massen der Teilproben und vermischt diese je nach Versuch in einem großen Gefäß. Zur besseren Homogenisierung mit den Feinkornanteilen wird etwas Wasser hinzugegeben. Ehe die Proben in den Versuchszylinder eingebracht werden, wird sichergestellt, dass sich keine Luft im Versuchsaufbau befindet. Dafür wird der Wasserzufluss zum Überlaufgefäß geöffnet und Wasser strömt in dieses hinein. Überschüssiges Wasser fließt durch den Überlauf, dessen Höhe individuell eingestellt werden kann ab. Das restliche Wasser strömt bei geöffnetem Hahn durch den Schlauch in den Versuchszylinder. Nun dauert es eine Weile bis der unten am Zylinder angeschlossene Trichter voll Wasser läuft. Sobald der Wasserspiegel die Höhe der Zuflussöffnung erreicht hat, wird eventuell im Schlauch eingeschlossene Luft herausgedrückt. Der Wasserspiegel im Zylinder sollte die Höhe der Gitter und Filtermatten erreicht haben. Dann wird vorerst der Wasserzufluss sowohl am Wasserhahn als auch am Hahn des Überlaufgefäßes geschlossen.

Nun kann mit dem Einbau der Probe in den Versuchszylinder begonnen werden. Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, erfolgt dies in Schichten. Mit der Metallschaufel werden einige Schaufelladungen in den Zylinder gegeben und möglichst gut angedrückt und

horizontal glatt gestrichen. Damit sich der Boden gut verteilt und nicht entmischt, wird vom Rand des Zylinders zur Mitte hin gearbeitet. Wenn der Inhalt des Gefäßes mit der ersten Teilprobe in den Zylinder gegeben wurde, kann nun mit der Sättigung der ersten Schicht begonnen werden. Da das hydraulische Gefälle am Anfang noch zu hoch ist, wird der Wasserzufluss durch den Hahn am Überlaufgefäß reguliert. Das Wasser sollte langsam von unten nach oben durch den Boden strömen. Besteht die erste Schicht aus größerem Kies, kann dies auch schneller geschehen. Befindet sich der Wasserspiegel im Zylinder auf gleicher Höhe wie das Probenende, kann der Wasserzufluss gestoppt werden und mit dem Einbau der folgenden Schichten und deren Sättigung begonnen werden. Wenn alles Bodenmaterial eingebaut ist, wird die Oberfläche der Probe glattgestrichen und die Länge der Probe kann an dem an der Seite des Zylinders befestigten Maßband abgelesen und notiert werden. Danach kommen eine feinmaschige Lage und mehrere Kunststoffgitter oben auf die Probe und der Druckstempel wird aufgesetzt. Jetzt wird die Probe noch solange langsam von Wasser durchströmt, bis das Wasser auf der Höhe des Auslaufes angekommen ist. Dies wird wieder durch leichtes Öffnen des Hahns am Überlaufgefäß eingestellt. Der Schlauch am Auslauf hat denselben Durchmesser wie die Schläuche, die seitlich als Standrohre aus dem Zylinder führen. Falls das Wasser also nicht sofort austritt, muss am Auslaufschlauch gesogen werden, damit das Wasser fließt. Es wird zunächst in einem Eimer oder in ein anderes Auffanggefäß geleitet und noch nicht gemessen. Die Wasserzufuhr wird vorerst abgestellt und der eigentliche Versuch wird gestartet.

Zu Beginn sind die Hähne für die Wasserzufuhr und den Überlauf geöffnet und der Hahn für den Zufluss zur Probe geschlossen. Für den Überlauf wird ein entsprechend kurzes Stück Schlauch abgeschnitten und auf dem Aufsatz zum Einschrauben in das Überlaufgefäß befestigt. Wenn der Aufsatz eingeschraubt ist, wird der Wasserhahn aufgedreht und das Überlaufgefäß füllt sich bis zur Höhe des Überlaufschlauchs mit Wasser. Somit wurde das hydraulische Gefälle schon eingestellt und nach Ablesen an den Maßbändern werden die Höhen notiert. Der Hahn am Zufluss zum Versuchszylinder wird geöffnet. Damit der Oberwasserspiegel konstant bleibt, wird der Wasserhahn entsprechend auf- oder zuge dreht. Das Wasser strömt nun durch die Probe. An den Standrohren kann zusätzlich das hydraulische Gefälle kontrolliert werden. Falls der k-Wert der Probe durch vorheriges Abschätzen als sehr gering einzustufen ist, muss das hydraulische Gefälle erhöht werden. Dies geschieht entweder durch Erhöhung des Oberwasserspiegels mit Hilfe anderer Schlauchaufsätze oder wie bei Versuch 5 und 6 durch Verringerung der Probenlänge. Dafür werden 10 cm der Probe abgetragen und der Druckstempel wieder eingebaut. Dann wird der Auslauf am Versuchszylinder tiefer gesetzt. Aufgrund der Schraubverbindungen ist das ganz einfach. Im Falle eines kleinen Durchlässigkeitsbeiwertes wird der Auslauf weiter nach oben verschoben und mit den Schlauchaufsätzen für das Überlaufgefäß ein geringes Δh

eingestellt. Der Wasserspiegel darf nie über die Höhe des Auslaufs hinausgehen oder sich verändern. Der Auslaufschlauch ist durchsichtig und es sollte auch immer Luft zwischen dem austretenden Wasser sein. Nur so ist garantiert, dass die Durchlässigkeit der Probe und nicht des Schlauches gemessen wird.

Wenn das hydraulische Gefälle optimal eingestellt wurde, kann mit der Messung begonnen werden. Dazu wird gleichzeitig die Stoppuhr gestartet und das Röhrchen, welches am Ausfluss des Zylinders angebracht ist, in einen Messbecher gehalten. Nach 60 s oder bei Versuch 5 und 6 auch längerer Zeit wird der Schlauch zurück in das Auffanggefäß gelegt und die Wassermenge abzüglich Messbecher gemessen. Auf der Anzeige kann man nun die durch die Probe geflossene Wassermenge ablesen. Die Zeit und die Wassermenge werden notiert. Der Versuch wird einige Male wiederholt wobei die Wassermenge ungefähr gleich bleiben sollte. Ist dies nicht der Fall, ist die Strömung nicht im laminaren Bereich oder die Durchflussgrenze des Röhrchens am Auslauf ist erreicht. Um diesen Fehler zu beheben, muss das hydraulische Gefälle verändert werden. In bestimmten Zeitabständen sollte auch die Wassertemperatur gemessen werden. Sie bleibt aber bei allen Versuchen gleich, da das Wasser aus der Leitung immer die gleiche Temperatur hat. Der Versuch ist nun eigentlich beendet. Zur Kontrolle der laminaren Strömung und zur genaueren Feststellung des k-Wertes wird der Versuch jedoch mit geringer Änderung des hydraulischen Gefälles wiederholt. Dafür verwendet man verschieden lange Schlauchaufsätze am Überlauf.

Beendet wird der Versuch, indem der Wasserhahn zuge dreht und der Hahn am Überlauf zur Probe hin geschlossen wird. Das Wasser wird aus dem Überlaufgefäß gelassen, indem die Schlauchschelle mit der der Zulaufschlauch zum Gefäß am Wasserhahn befestigt ist, ausgeschraubt wird. Um das Wasser aus dem Versuchszylinder zu leiten, wird der Schlauch vom Überlaufgefäß abgenommen und in einen Eimer gelegt. Nachdem der Druckstempel und die Gitter aus dem Zylinder genommen wurden, schaufelt man das Bodenmaterial wieder in die Emailleschüsseln. Es wird anschließend im Ofen getrocknet und wiederverwendet. Dann werden die Schraubverbindungen der seitlichen Standrohre geöffnet und die Röhrchen zur Reinigung aus dem Zylinder gezogen. Die unteren Filtermatten und Gitter können nun entnommen und gereinigt werden. Das Wasser, welches sich noch im Trichter befindet, wird nach dem Öffnen des Hahns am Trichter in einem Eimer aufgefangen. Es enthält auch Feinanteile und kleine Sandkörner, die mit getrocknet werden sollten. Der Versuchszylinder wird gereinigt und die sauberen Gitter werden wieder hineingelegt. Nach dem Schließen des Hahns am Trichter werden auch die Standrohre wieder angeschraubt. Der Versuchsaufbau steht für den nächsten Versuch bereit.

Beim Versuch 6 wurde nicht mit einem konstanten hydraulischen Gefälle gearbeitet. Die Probe mit 45 % Feinkornanteil ist dafür zu undurchlässig und schon bei Versuch 5 wurde ein Teil der Probe abgetragen, da es zu Grundbrucherscheinungen kam. Deshalb wurden nach

Einstellen eines großen hydraulischen Gefälles die Wasserspiegelhöhen abgelesen und nach 30 bzw. 60 min Wartezeit erneut bestimmt. Durch diese Änderung kann dann der k-Wert errechnet werden. Zusätzlich zur Auflast durch den Druckstempel werden die aussortieren Steine, die größer als 31,5 mm sind, auf die oberen Filtermatten gelegt.

6 Versuchsergebnisse

6.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Versuche 1 bis 5 wurden alle nach der Gleichung 15 aus Abschnitt 3.2.1 ausgewertet. Dabei wurde die gewogene Durchflussmenge in das Volumen umgerechnet, wofür man die gewogene Masse des Wassers durch dessen Dichte, die wiederum von der Temperatur abhängt teilt. Die Wassertemperatur blieb bei allen Versuchen konstant bei 20 °C. Der letzte Versuch wurde mit fallendem hydraulischem Gefälle durchgeführt. Daher wird der k-Wert nach der Gleichung 14 aus dem Abschnitt 3.1 berechnet. Für die Auswertung wurde aus den verschiedenen Messungen pro Versuch mit unterschiedlichem hydraulischen Gradienten ein Mittelwert gebildet. Beispielhaft wird die Auswertung am ersten Versuch erklärt. Bei dem ersten Versuchsabschnitt von Versuch 1 wurde sechs Mal gemessen. Die k-Werte befinden sich im selben Bereich. Die Probe ist über eine Höhe von 32,5 cm im Versuchszylinder eingebaut. Der Durchlässigkeitsbeiwert wurde mit Hilfe einer Grundfläche des Zylinders von $A = 660,5 \text{ cm}^2$ berechnet.

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm^3	k in m/s
1	136,4	145,5	9,1	0,262	120	83	83,17	4,012E-05
2	136,4	145,5	9,1	0,262	120	83	83,17	4,012E-05
3	136,4	145,5	9,1	0,262	120	80	80,16	3,867E-05
4	136,4	145,5	9,1	0,262	120	80	80,16	3,867E-05
5	136,4	145,5	9,1	0,262	120	80	80,16	3,867E-05
6	136,4	145,5	9,1	0,262	180	120	120,24	3,867E-05
							\bar{k}	3,915E-05

Tabelle 7: Ergebnisse Versuch 1 - erster Versuchsabschnitt

Für diesen ersten Versuch wurde noch zwei Mal mit einem anderen hydraulischen Gradienten gearbeitet. Hier ergaben sich die k-Werte zu $3,756 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und zu $3,644 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. Die Ergebnisse aus diesen drei Versuchsteilen kann durch ein Diagramm mit dem hydraulischen Gradienten i in Verbindung gebracht werden, um zu überprüfen ob sich die Strömungsverhältnisse im laminaren Bereich befinden. Liegen die Werte annähernd auf einer Geraden, ist dies der Fall. Damit wird sichergestellt, dass der Versuch sichere und verwendbare Ergebnisse liefert. Aus den drei bestimmten Durchlässigkeitsbeiwerten kann nun ein Mittelwert gebildet werden.

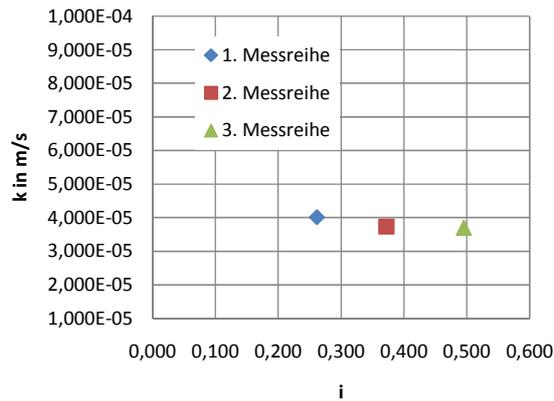


Abbildung 14: Überprüfung der laminaren Strömung

Bei allen anderen Versuchen erfolgt die Auswertung analog zu diesem ersten Versuch. Die einzelnen Daten dazu befinden sich im Anhang.

Es ergeben sich so für die sechs Versuche die folgenden k-Werte.

Versuch	k	k-Wert in m/s
1	k_1	$3,772 \cdot 10^{-5}$
2	k_2	$2,254 \cdot 10^{-4}$
3	k_3	$1,207 \cdot 10^{-3}$
4	k_4	$1,511 \cdot 10^{-4}$
5	k_5	$4,880 \cdot 10^{-6}$
6	k_6	$6,889 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 8: Versuchsergebnisse

Zur Auswertung der Versuche wurden nur die Messungen verwendet, bei denen keine Störungen auftraten. Bei Versuch 1 und 2, die jeweils drei Mal durchgeführt wurden, gab es keine Komplikationen. Jedoch wurde bei der letzten Messreihe des Versuchs 2 der Grenzwert des Durchflusses des Auslauffröhrchens erreicht, was dazu führte, dass der Wasserspiegel im Versuchszylinder anstieg und die Überlauffunktion nicht mehr gegeben war. Der eingebaute Boden im Versuchszylinder hatte eine Höhe von 30 cm. Der dritte Versuch mit einer Einbauhöhe von 28,5 cm musste insgesamt sieben Mal durchgeführt werden, um zu einem annehmbaren Ergebnis zu führen. Der hydraulische Gradient war am Anfang zu hoch und der Auslaufschlauch wurde etwas höher auf der anderen Seite des Versuchszylinders angebracht. Im nächsten Versuchsabschnitt stellte sich heraus, dass Δh immer noch zu groß war. Da der dritte Versuch an ein einem anderen Tag weitergeführt wurde, sammelte sich in der Zwischenzeit Luft im Schlauchsystem, welches die nächsten zwei Versuchsmessungen ebenfalls ungünstig macht. Nach bestmöglicher Beseitigung der Luft wurde noch drei Mal mit unterschiedlichem hydraulischen Gradienten gemessen. Die Ergebnisse der Messungen liegen im gleichen und somit laminaren Bereich und der dritte Versuch konnte beendet werden. Für den vierten Versuch wurde die 26,5 cm hohe Probe

unter vier unterschiedlichen hydraulischen Gradienten durchströmt. Alle Versuche liefen einwandfrei, bis auf den dritten, bei dem die Strömung in den turbulenten Bereich überging. Bei Versuch Nummer fünf mit einem erhöhten Feinkornanteil reichte zunächst das hydraulische Gefälle nicht aus. Dieses wurde dann zu drastisch erhöht, so dass es zu hydraulischem Grundbruch an einer Seite des Zylinders kam und das Wasser viel zu schnell durch diesen Teil der Probe hindurch strömte. Die Durchflussmenge pro Minute nahm zwar ab und der Boden verfestigte sich langsam wieder, die Probe war aber dennoch für den Versuch in einem ungeeigneten Zustand. Der Bodens wurde dann zur Hälfte ausgebaut und zum Teil wieder eingebaut um nun eine Höhe von 21 cm anstatt vorher 28 cm zu erreichen. Die weiteren zwei Versuche mit dieser Probe ergaben korrekte Ergebnisse. Die Probe für den letzten Versuch wurde von Anfang an nur über eine Höhe von 18 cm eingebaut. Die Zusammensetzung mit 45 % Feinkornanteil war so dicht, dass der Versuch mit fallendem hydraulischem Gradienten durchgeführt wurde. Die erste Messung dauerte 30 min und die zweite 60 min. Aus beiden ergaben sich annähernd die gleichen Ergebnisse, sodass der letzte Versuch abgeschlossen werden konnte.

Zur Auswertung gehört auch ein Vergleich mit empirisch ermittelten k-Werten. Bei der Berechnung der Durchlässigkeit mit Hilfe der Körnungslinie wird immer eine Homogenität des Bodens impliziert. Ob diese auch den realen Boden, von dem ja nur einzelne Stichproben entnommen wurden, repräsentiert, ist unsicher. Selbst beim Sieben der Probe für die Versuche stellte sich heraus, dass es Abweichungen zwischen dem Siebergebnis und der vorgegebenen Körnungslinie gibt. Die verwendeten Formeln entsprechen dem Grundprinzip der Gleichung 4 aus Abschnitt 2.1 und richten sich nach der Ungleichförmigkeitszahl C_U .

Beim ersten Versuch wird die undurchlässigste Schicht maßgebend sein. Sie besteht aus Körnern kleiner 4 mm und kann durch folgende Kornverteilungslinie dargestellt werden.

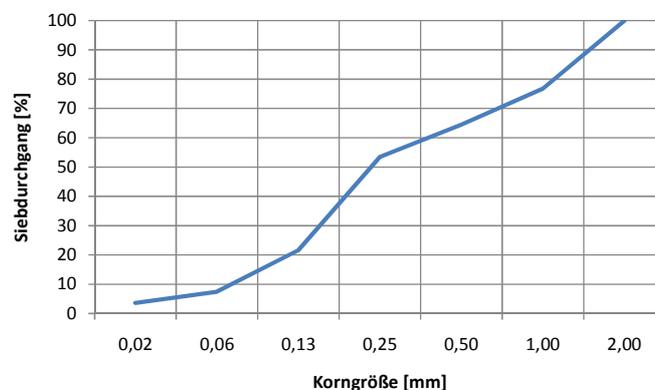


Abbildung 15: Kornverteilungslinie Versuch 1, M1

Mit Hilfe der Plastizitätszahl I_P und der Fließgrenze w_L kann für feinkörnige Böden der k-Wert durch folgende Formel bestimmt werden.

$$\left(\frac{k}{10^{-10} \text{ m/s}} \right) \approx 0,027 \cdot w_L^{6,94} \cdot I_P^{-6,44} \quad (20)$$

Die Werte von $I_P = 12 \%$ und $w_L = 33,1 \%$ sind Eigenschaften des Dammkernmaterials und wurden aus dem Prüfbericht [15] entnommen. Für das Dammkernmaterial ergibt sich so ein k-Wert von $1,069 \cdot 10^{-9}$ m/s. Dieses Material besteht jedoch zu 95 % aus Körnern kleiner 0,2 mm wohingegen die Schicht M1 aus Körnern kleiner 4 mm besteht. Klassifiziert man den Boden nach DIN 18196 mit Hilfe der Körnungslinie, kann man die Schicht M1 der Gruppe Sand-Schluff-Gemische zuordnen. Der Durchlässigkeitsbeiwert eines schluffigen Sandes bewegt sich zwischen den Grenzen von 10^{-7} bis 10^{-4} m/s. Der zu erwartende k-Wert der Schicht M1 und somit der Probe des Versuchs 1 liegt also irgendwo dazwischen. Ein weitgestufter Sand, der sich vom Sand-Schluff-Gemisch nur durch die 5 % Grenze des Korndurchmessers von 0,063 mm unterscheidet, kann nach Kuntsche in den Bereich durchlässiger Böden eingeordnet werden und besitzt einen k-Wert von 10^{-6} bis 10^{-4} m/s. Ein k-Wert von 10^{-5} m/s scheint für die Schicht M1 realistisch.

Beim zweiten Versuch wird ebenfalls die undurchlässigste Schicht den k-Wert bestimmen. Diese wird aus M1 und M2 gebildet und kann durch folgende Kornverteilungslinie veranschaulicht werden.

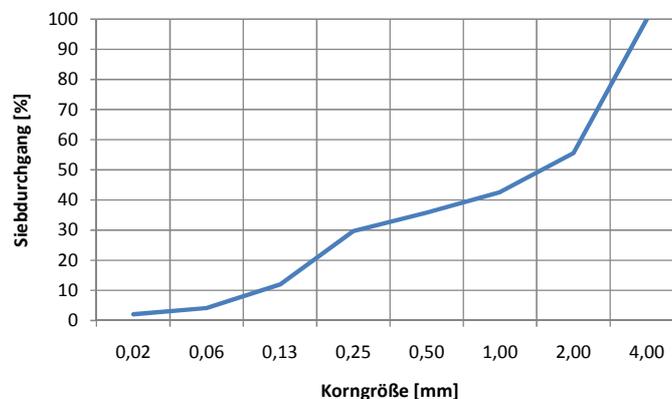


Abbildung 16: Kornverteilungslinie Versuch 2, M1 + M2

Die Ungleichförmigkeitszahl C_U erreicht einen Wert von 18,3 und die Formel nach Beyer kann angewendet werden. Der k-Wert kann durch die nachstehende Formel berechnet werden.

$$k = c(C_U) \cdot d_{10}^2 \quad (21)$$

Der Korrekturfaktor $c(C_U)$ wird aus einer Tabelle abgelesen und beträgt 0,007. Damit erhält man für die Probe des zweiten Versuchs $k = 1,008 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Im dritten Versuch wurden alle Gruppen von M1 bis M4 miteinander vermengt und für den Einbau homogenisiert. Der k-Wert wurde dafür bereits unter Abschnitt 4.1 mit $k = 2,304 \cdot 10^{-2}$ m/s berechnet.

Beim vierten Versuch kann der k-Wert wieder mit der Formel von Seiler bestimmt werden, da der Feinkornanteil mit 25 % noch relativ gering ist. Hierfür wird die Ungleichförmigkeitszahl C_U und der Durchmesser d_{25} aus der Kornverteilungslinie (siehe Abschnitt 5.2) ermittelt und der Hilfswert χ_{25} aus einer Tabelle entnommen. Es ergibt sich ein k-Wert von $3,125 \cdot 10^{-4}$ m/s. Bei den letzten zwei Versuchen ist der Feinkornanteil zu hoch und die Formel ist nicht mehr gültig. Der k-Wert zu Versuch 5 kann mit der Formel von Sichardt berechnet werden.

$$k = 0,006 \cdot d_k^2 \quad , \quad d_k = \frac{1}{100} \cdot \sum_1^n \frac{d}{\Delta m_i} \quad (22)$$

Der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens des fünften Versuchs beträgt $2,868 \cdot 10^{-6}$ m/s. Für den letzten Versuch mit 45 % Feinkornanteil unter Verwendung von Dammkernmaterial kann der k-Wert nur abgeschätzt werden. Die Probe muss in jedem Fall undurchlässiger sein als die Schicht M1 aus dem ersten Versuch. Dabei spielt die größere Länge der Probe aus Versuch 6 im Vergleich zur Schicht M1 weniger eine Rolle. Vielmehr hat der Feinkornanteil die Rolle des Bodenskeletts übernommen, da größere Körner in dem Feinkornanteil eingelagert sind und darin „schwimmen“. Die Durchlässigkeit wird also hauptsächlich durch das Dammkernmaterial bestimmt. Außerdem befinden sich im berechneten Feinkornanteil des sechsten Versuchs keine Körner zwischen 1 und 4 mm Durchmesser wieder, woraus man schließen kann, dass es undurchlässiger ist, als die Schicht M1. Der k-Wert von Schluff liegt im Bereich von 10^{-8} bis 10^{-6} m/s. Für den letzten Durchlässigkeitsversuch kann also geschätzt werden, dass $k = 10^{-7}$ m/s beträgt. Alle empirisch ermittelten Werte sind in folgender Tabelle zusammengefasst. [3] [12]

Versuch	k	k-Wert in m/s
1	k_1	10^{-5}
2	k_2	$1,008 \cdot 10^{-4}$
3	k_3	$2,304 \cdot 10^{-2}$
4	k_4	$3,125 \cdot 10^{-4}$
5	k_5	$2,868 \cdot 10^{-6}$
6	k_6	10^{-7}

Tabelle 9: Empirisch ermittelte k-Werte

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Beim Vergleich der experimentell bestimmten Werte mit den empirisch ermittelten Werten fällt auf, dass sich die Durchlässigkeit zwar im selben Bereich der Zehnerpotenz bewegt, es jedoch Unterschiede hinsichtlich der genauen Zahlenwerte gibt. Der Zusammenhang ist im nach stehenden Diagramm dargestellt.

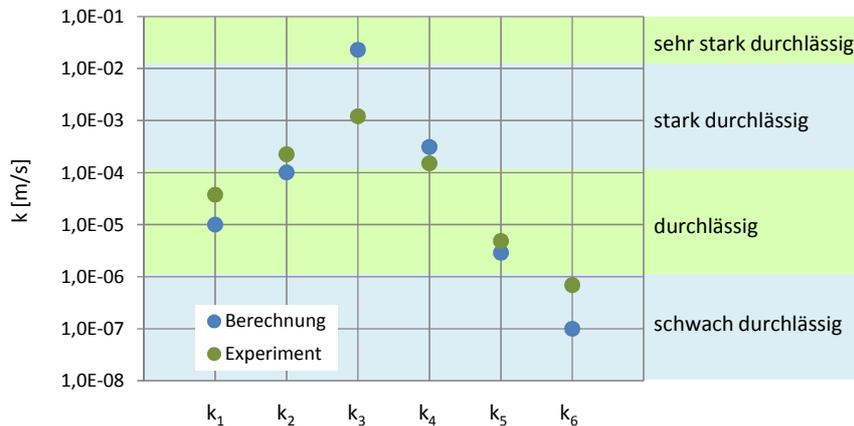


Abbildung 17: Vergleich der Werte aus Berechnung und aus Experiment

Vor allem bei der Berechnung des k-Wertes der Probe aus Versuch 3 gibt es eine starke Abweichung zum Ergebnis aus dem Experiment. Dies liegt zum einen daran, dass die Formeln keine exakten Ergebnisse liefern, da z.B. die Korrekturfaktoren aus Tabellen abgelesen werden und nicht ausreichend genau bestimmt werden können. Die durch Siebung ermittelte Kornverteilungslinie entspricht auch nicht genau der vorgegebenen Kornverteilungslinie und die Werte zum Berechnen des k-Wertes, die aus der Verteilungslinie abgelesen werden, können nicht genau bestimmt werden. Die Berechnung legt auch eine homogene Verteilung des Bodens zu Grunde, die nicht garantiert werden kann. Zum anderen können Fehler beim Versuchsaufbau und der Durchführung zu Abweichungen führen.

Die systematischen Fehler, die durch Mängel an den Geräten auftreten können, beeinflussen die Ergebnisse am meisten. Da kein entlüftetes Wasser verwendet wurde, konnten Luftbläschen in die Probe gelangen und verfälschen so das Porenvolumen des Bodens. Außerdem sammelten sich Luftbläschen während des Einbaus der Probe obwohl schon währenddessen mit der Sättigung begonnen wurde. Desweiteren kam es auch einige Male dazu, dass sich trotz sorgfältiger Entlüftung der Apparatur vor Versuchsbeginn Luftblasen am Einlauf des Zylinders sammelten. Der Probendurchmesser und die Einbauhöhe garantieren aber, dass daraus entstandene Fehler ignoriert werden können. Zudem konnte die Dichtheit des Systems nicht immer hergestellt werden. Trotz der Verwendung von Dichtband an allen Schraubverbindungen traten sehr kleine Mengen Wasser an den Anschlüssen für die

Standrohre und auch am Wasserhahn aus. Das liegt u.a. daran, dass der Versuchsaufbau zum Reinigen teilweise wieder auseinandgebaut werden musste. Da der Versuchsaufbau in seinen Maßen nicht mit dem nach DIN 18130-1 übereinstimmt, wurden einige Teile speziell für den Versuch angefertigt. Leider hatte dies auch zur Folge, dass sich der Rohrdurchmesser bei den Schlauchverbindungen änderte und das Wasser daher durch die Querschnittsänderungen dem Einfluss der Reibung unterlag. Überdies ließen sich Knicke in den Schläuchen nicht ganz vermeiden. Da kein separates Überlaufgefäß verwendet wurde, musste die Durchflussmenge immer durch Einstellen des hydraulischen Gefälles reguliert werden. Der Durchmesser des Auslaufschlauches war zu gering um größere Mengen Wasser durch ihn hindurch abfließen zu lassen. Diese Fehler wurden hingegen bei jedem Versuch gemacht, sodass die Versuchsergebnisse untereinander vergleichbar bleiben. Es wurde außerdem beobachtet, dass einige Feinkörner am unteren Abschluss der Probe herausgerieselt sind. Das feinmaschige Sieb, das als Filter diente, hat nicht exakt denselben Durchmesser wie der Zylinder und es ließ sich nicht vermeiden, dass sich feine Partikel an der Seite des Zylinders von der eigentlichen Probe absonderten. Aufgrund der Größe der Probe wurde auf ein Moosgummi zur Beseitigung der Randumläufigkeiten verzichtet. So konnte zwar besser beobachtet werden, wie das Wasser durch die Probe strömt, jedoch auch, dass einige Bodenpartikel am oberen Ende der Probe aufgewirbelt wurden.

Neben den Fehlern, die aus dem Versuchsaufbau resultieren, gibt es auch zufällige Fehler bei der Versuchsdurchführung. Durch die Verzögerung zwischen dem Einschalten der Stoppuhr und dem Zeitpunkt, in dem der Auslaufschlauch in den Messbecher gehalten wird, kann es zu Messungenauigkeiten kommen. Bei einer Zeit von 60 s und mehreren Messungen sowie ausreichend großen Durchflussmengen ist der Fehler aber minimal. Wassertropfen, die sich manchmal außen am Messbecher sammelten, wurden zudem vor dem Wiegen entfernt. Beim sechsten Versuch wurde mit fallendem hydraulischem Gefälle gearbeitet. Das Überlaufgefäß hat zum Ablesen der Wasserspiegeländerung einen zu großen Durchmesser. Die Versuchsergebnisse liegen zwar im selben Bereich der Zehnerpotenz, jedoch ist der erste Wert dreimal größer als der zweite. Für eine Auswertung im Rahmen dieser Arbeit reicht es dagegen aus. Weitere Ungenauigkeiten bei der Auswertung könnten ausgeschlossen werden, indem das Volumen der in den Zylinder ragenden Standröhrchen vom Volumen der Probe abgezogen werden. Dieses ist aber so groß, dass der Unterschied sehr gering wäre. Durch die gelbliche Verfärbung des austretenden Wassers kann angenommen werden, dass feine Partikel aus der Probe heraus gespült wurden. Dies ließ sich leider nicht vermeiden.

Um den Durchlässigkeitsbeiwert eines weitgestuften Bodens mit dessen Homogenität in einen Zusammenhang zu bringen, muss zunächst definiert werden, inwieweit Homogenität in Böden erreicht werden kann. Homogenität bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit eine gleiche Kornverteilung vorzufinden in jedem Bereich der Probe gleich ist. Eine ideale Homogenität gibt es jedoch in keinem Boden, lediglich eine stochastische Homogenität kann erreicht werden. Das bedeutet, dass es in jedem Bereich zwar die gleiche Zusammensetzung an Bodenpartikeln gibt, wo sich diese befinden ist dann aber unerheblich, solange sie sich nur in diesem Bereich befinden. Analog zu diesem Zusammenhang kann die Entmischung beschrieben werden. Im Boden gibt es keine völlige Entmischung, es sei denn die Schichten sind mit Hilfe von undurchlässigen Folien o.Ä. voneinander getrennt. Sobald Wasser durch den Boden strömt, werden immer feinste Partikel mittransportiert und woanders abgelagert. Anstatt einer völligen Entmischung ist auch bei den durchgeführten Versuchen nur eine reale Entmischung möglich. [16]

Die Versuche 1 bis 3 können hinsichtlich der Homogenität bewertet werden. Jeder Schicht kann dabei eine Zahl zugeordnet werden. Liegt nur eine Korngruppe z.B. M1 in einer Schicht vor, so wird diese mit 1 bewertet. Sind in einer Schicht zwei Korngruppen gemischt, wird sie durch die Zahl 2 charakterisiert. Treten wie beim dritten Versuch alle Korngruppen in einer Schicht auf, bekommt sie die Wertung 4. Der erste Versuch, indem die Korngruppen M1 bis M4 schichtenweise eingebaut wurden, entspricht damit einer realen Entmischung und zu 0 % der stochastischen Homogenität. Im dritten Versuch wurden alle Gruppen miteinander vermengt. Die Probe ist also nicht entmischt und zu 100 % stochastisch homogen. Diese totale Homogenität kann nur angenommen und nicht nachgewiesen werden. Die einzelnen Teilproben wurden zwar bestmöglich miteinander vermengt, nur kann es beim Einbau und während der Durchströmung mit Wasser wieder zur Entmischung kommen.

Die durch die Experimente ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte können nun mit dem Homogenitätsgrad in Verbindung gebracht werden.

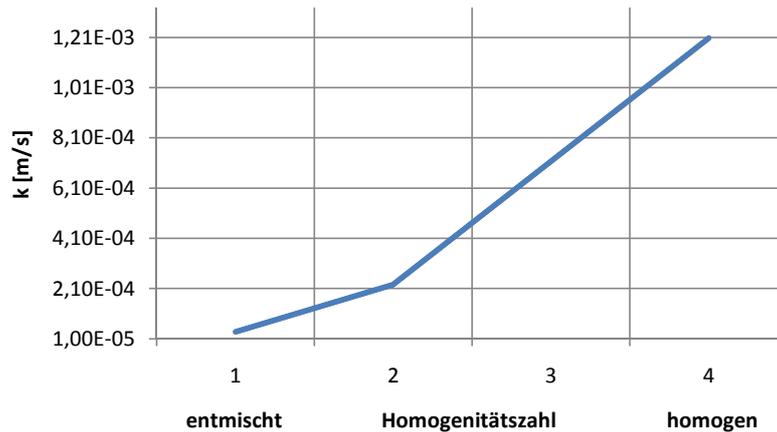


Abbildung 18: Zusammenhang k-Wert – Homogenität

Das Diagramm zeigt, dass der weitgestufte Boden umso durchlässiger wird, je homogener er ist. Wie schon unter Abschnitt 6.1 erklärt, bestimmt im entmischten Boden die undurchlässigste Schicht den k-Wert der gesamten Probe. Im homogenen Boden ist der Feinkornanteil verteilt zwischen dem Bodenskelett und das Bodensystem wird poröser. Der Zusammenhang zwischen k-Wert und Homogenität ist nicht linear. Ein Versuch, in dem drei Korngruppen eine Schicht bilden, wurde nicht durchgeführt, sodass zwischen Homogenitätszahl 2 und 4 linear interpoliert wurde. Dem Verlauf der Kurve nach zu urteilen, könnte die Durchlässigkeit für Homogenitätszahl 3 undurchlässiger sein und es würde sich ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen k-Wert und Homogenität bilden. Die Homogenitätszahl 2 steht also für ein Drittel stochastischer Homogenität, da noch die Möglichkeit besteht eine Schicht aus drei Korngruppen zusammenzusetzen. Zudem muss beachtet werden, dass die Zusammensetzung jedes Versuchs zufällig war. Für den ersten Versuch gibt es noch 23 weitere Möglichkeiten die Schichten im Versuchszylinder anzuordnen. Auf das Versuchsergebnis wird dies aber keinen Einfluss haben, da egal wo die Schicht M1 angeordnet ist, diese den k-Wert am meisten beeinflusst. Würde jedoch M4 mit den größten Korndurchmessern auf den Feinkornanteil des Bodens M1 folgen, könnte sich M1 an der Grenze zu M4 mehr entmischen. Im durchgeführten Versuch war dies aber nicht der Fall und es kann von einer realen Entmischung an den Übergängen von Schicht zu Schicht ausgegangen werden. Beim zweiten Versuch hätten sich auch andere Zusammensetzungen angeboten. Dann hätten z.B. M1 und M4 eine Schicht gebildet. Den Feinkornanteil mit dem größten Fraktionen der Gesamtverteilung zu mischen wäre aber weniger sinnvoll, da auch hier das Feinkornmaterial weggespült werden würde. Die Beziehung zwischen Bodenskelett und Füllung wurde dann in den letzten drei Experimenten untersucht. Für den dritten Versuch gab es keine andere Möglichkeit der Zusammensetzung

der Korngruppen M1 bis M4. Das Mischen und Einbauen in vier Schritten bzw. Schichten hatte nur zur Folge, dass ein möglichst homogener Aufbau der Gesamtprobe erreicht wird. In der zweiten Versuchsreihe wurde der Feinkornanteil in 10 % Schritten erhöht. Die Ergebnisse der Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit des Feinkornanteils sind im nachstehenden Diagramm zusammengefasst.

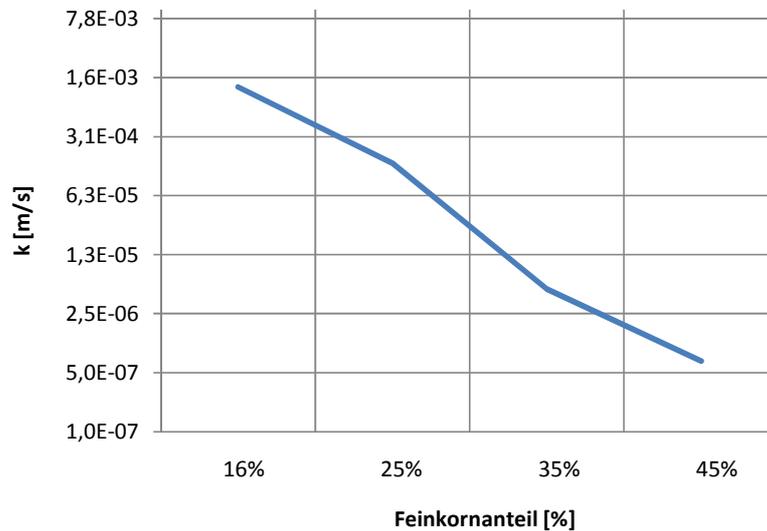


Abbildung 19: Zusammenhang k-Wert - Feinkornanteil

Das Diagramm zeigt, dass sich durch kontinuierliche Erhöhung des Feinkornanteils der Durchlässigkeitsbeiwert verringert. Die stochastische Homogenität ist bei allen drei Versuchen durch den Einbau von Teilproben mit der gleichen Kornverteilung ähnlich dem dritten Versuch gegeben. Zwischen dem dritten und dem vierten Versuch sowie zwischen dem fünften und sechsten Versuch verringert sich die Durchlässigkeit um fast exakt eine Zehnerpotenz. Zwischen der Probe mit dem Feinkornanteil von 25 % und der mit 35 % ist der Unterschied der k-Werte doppelt so groß. Würde man weitere Versuche durchführen und den Prozentsatz des Feinkornanteils weiter erhöhen, wäre bald eine Grenze erreicht. Diese wird durch den k-Wert des Dammkernmaterials von $1,069 \cdot 10^{-9}$ m/s gebildet. Die weitere Erhöhung der Feinkornanteils hätte also einen allmählich sinkenden k-Wert bis zu diesem Grenzwert zur Folge. Die noch in der Probe enthaltenden größeren Körner hätten keinen Einfluss mehr auf die Durchlässigkeit. Sie würden dann nicht mehr die Funktion als Skelett, sondern die als Füllung übernehmen und sind vom Feinkorn umgeben. Wird dieses vom Wasser durchströmt, kann das größere Material seinen Ort nur schwer verändern. Zwischen dem Ergebnis aus Versuch 4 und 5 befindet sich ein deutlicher Sprung. Man kann also schlussfolgern, dass sich beim Anstieg des Feinkornanteils von 16 % auf 25 % der k-Wert um ein Drittel verringert. Wird der prozentuale Feinkornanteil verdoppelt, verdoppelt sich auch die Zehnerpotenz der Durchlässigkeit des weitgestuften Bodens. Ab einer

Verdreifachung des ursprünglichen Feinkornanteils nimmt die Durchlässigkeit nur noch langsam ab.

Der ermittelte k-Wert aus dem ersten Versuch liegt genau zwischen dem des vierten und fünften Versuchs. Eine Schicht des Feinmaterials M1 in Mitten der anderen Korngrößen ist also genauso undurchlässig wie eine komplette Probe mit doppelt so viel Feinkornanteil. Das zeigt welchen großen Einfluss die Homogenität auf den Durchlässigkeitsbeiwert hat.

7 Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung eine Verbindung zwischen Entmischungsgrad und Durchlässigkeitsbeiwert herzustellen wurde in vier Schritten bearbeitet. Dafür wurde zunächst die Durchlässigkeit definiert und der Boden als poröses Medium beschrieben. Die Abhängigkeiten zwischen den Bodenkenngrößen und dem Durchlässigkeitsbeiwert wurden anschließend erläutert. Nach der Beschreibung dieser Zusammenhänge wurden die verschiedenen Methoden zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes vorgestellt. Daraus wurde eine Versuchsanordnung im Grundprinzip für diese Arbeit ausgesucht und im Labor durchgeführt. Der Aufbau und die Durchführung des Versuchs sowie das verwendete Material wurden eingehend beschrieben. Die aus dem Experiment gewonnenen Werte konnten dann ausgewertet werden. Sie wurden untereinander in eine Beziehung gebracht und mit empirisch ermittelten Werten verglichen. Die Resultate werden nun im Folgenden zusammengefasst.

Als Ergebnis aus den ersten drei Versuchen geht hervor, dass ein weitgestufter Boden umso durchlässiger ist, je homogener dessen Kornfraktionen verteilt sind. Es existiert ein leicht antiproportionaler Zusammenhang zwischen dem k -Wert und dem Homogenitätsgrad. Ist der gleiche Boden systematisch entmischt, bestimmt immer die undurchlässigste Schicht den Durchlässigkeitsbeiwert.

Eine stufenweise Erhöhung des Feinkornanteils weitgestufter Böden hat eine Verringerung des k -Wertes zur Folge. Dies geht aus den letzten drei Versuchen hervor. Bei dem untersuchten Boden bewirkt die Steigerung des Feinkornanteils um zehn Prozent eine Minderung des k -Wertes um ein Drittel des Ursprungswertes. Wird der Feinkornanteil verdoppelt, nimmt die Durchlässigkeit des Bodens um drei Zehnerpotenzen ab. Bis hierhin besteht also wieder ein antiproportionaler Zusammenhang. Dieser kehrt sich mit weiterer Zunahme des Feinkornanteils wieder um, denn ab einer Verdreifachung des Prozentsatzes nimmt die Durchlässigkeit nur noch allmählich ab, bis der Grenzwert der Durchlässigkeit des reinen Feinkornmaterials erreicht ist.

Eine Schicht des Feinmaterials in Mitten der anderen Kornfraktionen ist genauso durchlässig wie ein Boden mit doppelt so viel Feinkornanteil. Dies ist besonders wichtig z.B. für einen Übergangsbereich zwischen Dammschüttung und -kern. Ab einer Verdopplung des Feinkornanteils ist es demnach unwesentlich, ob es eine Schicht aus undurchlässigerem Material gibt, oder diese verteilt im Boden vorliegt.

Der Vergleich zwischen den experimentell bestimmten Werten und denen, die durch die Bodenkennwerte errechnet wurden, zeigt, dass zwar ungefähr vorausgesagt werden kann wie durchlässig ein Boden ist, sobald es sich aber um weitgestufte homogene Korngrößenverteilungen handelt, die Abweichungen größer werden. Der nicht entmischte

Boden war undurchlässiger als berechnet und der entmischte Boden durchlässiger. Die Streuung der empirischen Werte ist größer, als die der experimentell ermittelten Werte. In Abhängigkeit des Entmischungsgrades ist der Einfluss der Homogenität in der Natur nicht so hoch, als empirisch prognostiziert. Das liegt daran, dass durch die Berechnung mit Hilfe der Korngrößenverteilung eine Homogenität vorausgesetzt wird, die in der Realität nie vorkommen würde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Homogenität eines weitgestuften Erdstoffs einen großen Einfluss auf deren Durchlässigkeit hat. Der Boden ist im Zustand der stochastischen Homogenität um ein Hundertfaches durchlässiger als bei nahezu völliger Entmischung. Der Feinkornanteil bestimmt zudem hauptsächlich die Durchlässigkeit der gesamten Kornverteilung. Liegt ein erhöhter Anteil von diesem Material verteilt in einem Boden vor, verringert er im gleichen Maße die Durchlässigkeit des Bodens wie eine separate Schicht des Feinmaterials inmitten der anderen Kornfraktionen. Die angestrebte Homogenität eines Erdstoffs ist schwer zu realisieren, dennoch sollte sie weiterhin bei Erdbauwerken angestrebt werden um deren Sicherheit und Funktionalität hinsichtlich der Durchlässigkeit nicht einzuschränken.

IV Literaturverzeichnis

- [1] Busch, Luckner, Tiemer
Geohydraulik
Gebrüder Bornträger Berlin, Stuttgart; 3. neubearbeitete Auflage
- [2] Lang, Huder, Amann
Bodenmechanik und Grundbau
Springer; 7. Auflage
- [3] Karl Josef Witt
Grundbau-Taschenbuch: Teil 1 Geotechnische Grundlagen
Ernst & Sohn; 7. Auflage
- [4] Daniel Lang
Durchlässigkeit von Böden
Diplomica Verlag GmbH
- [5] Richwien, Lesny
Bodenmechanisches Praktikum
Verlag Glückauf GmbH, 11. Auflage
- [6] Ulrich Smolczyk
Grundbau-Taschenbuch: Teil 2 Geotechnische Verfahren
Ernst & Sohn; 6. Auflage
- [7] György Kovács
Seepage Hydraulics
Elsevier Scientific Publishing Company
- [8] Langguth, Voigt
Hydrogeologische Methoden
Springer; 2. Auflage
- [9] Ekkehard Holzbecher
Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie
Springer

- [10] Karl Höll
Wasser: Nutzung im Kreislauf, Hygiene, Analyse und Bewertung
de Gruyter, 8. Auflage
- [11] Matthias Horst
Wasserdurchlässigkeitsbestimmungen zur Qualitätssicherung mineralischer Abdichtungen
Techn. Univ. Braunschweig, Dissertation 1997
- [12] Detlef Rütz, Karl-Josef Witt
Wissenspeicher Geotechnik
17. Auflage, Weimar 2010
- [13] DIN e.V.
DIN 18130-1
Beuth Verlag GmbH, Mai 1998
- [14] Reddi, Lakshmi
Seepage in soils
Wiley, 2003
- [15] MFPA Weimar
Prüfbericht 50 10 090 01
Forschungsnummer 215 125 75, 2009
- [16] DGGT
Geotechnik
1999, Nr. 4
- [17] DIN e.V.
DIN 18123
Beuth Verlag GmbH, April 2011

V Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserströmung in einer Bodenprobe nach DIN 18130-1	5
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Strömungsbereiche [1].....	6
Abbildung 3: Wirksamer Korndurchmesser als Funktion von d_{10} und d_{60} und der Formfaktor in Abhängigkeit der Kornform [1].....	10
Abbildung 4: Erscheinungsformen und Bezeichnungen des unterirdischen Wassers [10]	11
Abbildung 5: Suffosion und Erosion [11].....	13
Abbildung 6: Versuchsanordnung für das Kompressions-Durchlässigkeitsgerät [13].....	15
Abbildung 7: Versuchsanordnung für den Versuchszylinder mit Standrohren [13].....	17
Abbildung 8: Versuchsanordnung für den Versuchszylinder [13].....	19
Abbildung 9: Versuchsanordnung für die Triaxialzelle mit isotroper statischer Belastung [13].....	21
Abbildung 10: Kornverteilungslinie des untersuchten Bodens [15].....	23
Abbildung 13: Aufbau und Geräte des Siebversuchs.....	31
Abbildung 14: Aufbau Versuch 1	33
Abbildung 15: Körnungslinien der Proben für Versuche 4-6	34
Abbildung 16: Überprüfung der laminaren Strömung	40
Abbildung 17: Kornverteilungslinie Versuch 1, M1	41
Abbildung 18: Kornverteilungslinie Versuch 2, M1 + M2	42
Abbildung 20: Vergleich der Werte aus Berechnung und aus Experiment	44
Abbildung 21: Zusammenhang k-Wert - Homogenität	47
Abbildung 22: Zusammenhang k-Wert - Feinkornanteil	48

VI Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchlässigkeitsbereiche in Abhängigkeit vom Durchlässigkeitsbeiwert nach DIN 18130-1.....	4
Tabelle 2: Massenanteile der einzelnen Korndurchmesser des untersuchten Bodens [15]...	23
Tabelle 3: Einteilung des Bodens	30
Tabelle 4: Ergebnisse der Siebung.....	31
Tabelle 5: Einbaumengen für Versuch 1.....	32
Tabelle 6: Einbaumengen für Versuch 4.....	34
Tabelle 7: Ergebnisse Versuch 1 - erster Versuchsabschnitt.....	39
Tabelle 8: Versuchsergebnisse	40
Tabelle 9: Empirisch ermittelte k-Werte	43

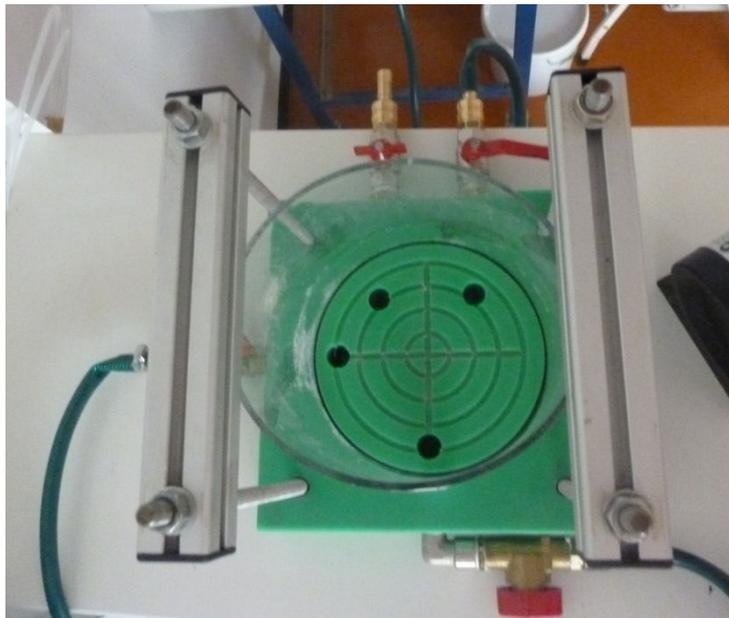
VII Anhang

Anhang zu 4.1

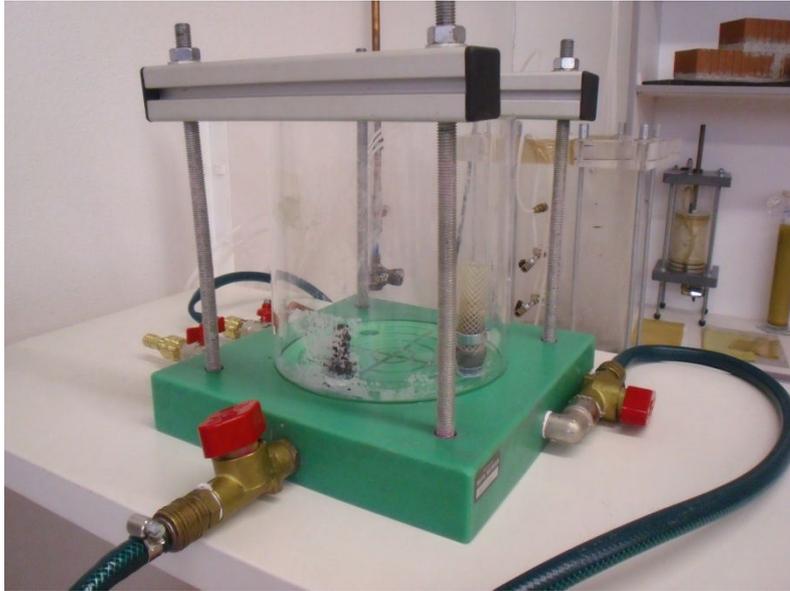
Berechnung des wirksamen Korndurchmessers: $d_w = 0,93369468 \text{ mm}$

Δm_i in%	d_i in mm	d_i quer in mm
	0,02	0,03464102
1,05	0,06	0,08831761
1,1	0,13	0,18027756
4,09	0,25	0,35355339
9,21	0,5	0,70710678
3,17	1	1,41421356
2,15	2	2,82842712
4,04	4	5,65685425
16,31	8	11,3137085
27,48	16	22,4499443
23,26	31,5	44,5477272
6,58	63	0

Anhang zu 4.2



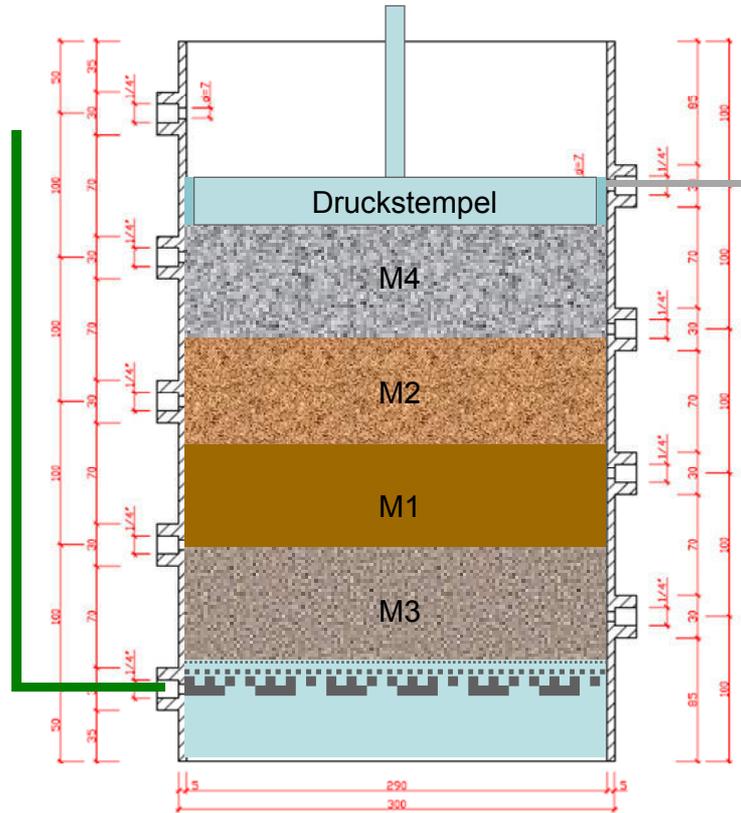
Überlaufgefäß Draufsicht



Überlaufgefäß



Versuchszylinder



Versuchszylinder mit Einbau der Probe nach Versuch 1

Anhang zu 5.2

	Masse gesamt[g]	Masse [%]	P_{Pr} [g/cm ³]	Masse [%]	Schichtdicke [cm]	Volumen [cm ³]	Einbaugewicht [g]
	3.551	3,81					
M4	14.583	15,65	1,9	16,27	3,25	2149,78	4084,58
M3	21.549	23,13	1,8	24,05	4,81	3176,76	5718,16
M2	14.461	15,52	1,6	16,14	3,23	2131,85	3410,96
M1a	6.413	6,88	1,6	7,16	1,43	945,43	1512,69
M1	32.602	35,00	1,6	36,38	7,28	4806,18	7689,89
	93.159	100,00		100	20		22.416,29

	Masse gesamt [g]	Masse [%]	P_{Pr} [g/cm ³]	Masse [%]	Schichtdicke [cm]	Volumen [cm ³]	Einbaugewicht [g]
	3.004	3,23					
M4	12.339	13,25	1,9	13,69	2,74	1808,05	3435,30
M3	18.234	19,57	1,8	20,23	4,05	2671,78	4809,21
M2	12.236	13,14	1,6	13,57	2,71	1792,97	2868,76
M1a	5.427	5,83	1,6	6,02	1,20	795,15	1272,24
M1	41.917	45,00	1,6	46,50	9,30	6142,04	9827,27
	93.158	100,00		100	20		22.212,77

Anhang zu 6.1

Versuch 1

Messung 2

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,4	148,5	12,1	0,372	120	110	110,22	3,735E-05
2	136,4	148,5	12,1	0,372	120	111	111,22	3,769E-05
3	136,4	148,5	12,1	0,372	60	55	55,11	3,735E-05
4	136,4	148,5	12,1	0,372	120	110	110,22	3,735E-05
5	136,4	148,5	12,1	0,372	60	56	56,11	3,803E-05
								3,756E-05

Messung 3

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,4	152,5	16,1	0,495	120	145	145,29	3,700E-05
2	136,4	152,5	16,1	0,495	120	143	143,29	3,649E-05
3	136,4	152,5	16,1	0,495	105	126	126,25	3,675E-05
4	136,4	152,5	16,1	0,495	120	141	141,28	3,598E-05
5	136,4	152,5	16,1	0,495	120	141	141,28	3,598E-05
								3,644E-05

Versuch 2

Messung 1

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,7	145	8,3	0,277	30	218	218,44	3,985E-04
2	136,7	145	8,3	0,277	30	223	223,45	4,076E-04
3	136,7	145	8,3	0,277	30	220	220,44	4,021E-04
4	136,7	145	8,3	0,277	30	217	217,44	3,966E-04
5	136,7	145	8,3	0,277	30	198	198,40	3,619E-04
6	136,7	145	8,3	0,277	30	212	212,43	3,875E-04
7	136,7	145	8,3	0,277	30	210	210,42	3,838E-04
8	136,7	145	8,3	0,277	60	389	389,78	3,555E-04
9	136,7	145	8,3	0,277	60	409	409,82	3,738E-04
10	136,7	145	8,3	0,277	60	401	401,81	3,665E-04
11	136,7	145	8,3	0,277	60	386	386,78	3,528E-04
12	136,7	145	8,3	0,277	60	387	387,78	3,537E-04
								3,783E-04

Messung 2

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,7	148,7	12	0,400	30	231	231,47	2,920E-04
2	136,7	148,7	12	0,400	30	233	233,47	2,946E-04
3	136,7	148,7	12	0,400	30	236	236,48	2,984E-04
4	136,7	148,7	12	0,400	30	244	244,49	3,085E-04
5	136,7	148,7	12	0,400	30	233	233,47	2,946E-04
6	136,7	148,7	12	0,400	30	237	237,48	2,996E-04
7	136,7	148,7	12	0,400	30	236	236,48	2,984E-04
								2,980E-04

Versuch 3

Messung 5

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	142	143,9	1,9	0,067	60	361	361,73	1,369E-03
2	142	143,9	1,9	0,067	60	313	313,63	1,187E-03
3	142	143,9	1,9	0,067	60	306	306,62	1,161E-03
4	142	143,9	1,9	0,067	60	306	306,62	1,161E-03
5	142	143,9	1,9	0,067	60	306	306,62	1,161E-03
6	142	143,9	1,9	0,067	60	304	304,61	1,153E-03
								1,198E-03

Messung 6

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	142	143,4	1,4	0,049	60	233	233,47	1,199E-03
2	142	143,4	1,4	0,049	60	216	216,44	1,112E-03
3	142	143,4	1,4	0,049	60	220	220,44	1,132E-03
4	142	143,4	1,4	0,049	60	213	213,43	1,096E-03
5	142	143,4	1,4	0,049	60	215	215,43	1,107E-03
6	142	143,4	1,4	0,049	60	212	212,43	1,091E-03
								1,123E-03

Messung 7

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	142	143	1	0,035	60	185	185,37	1,333E-03
2	142	143	1	0,035	60	181	181,36	1,304E-03
3	142	143	1	0,035	60	178	178,36	1,283E-03
4	142	143	1	0,035	60	178	178,36	1,283E-03
5	142	143	1	0,035	60	180	180,36	1,297E-03
								1,300E-03

Versuch 4

Messung 1

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,5	142,6	6,1	0,230	120	225	225,45	1,236E-04
2	136,5	142,6	6,1	0,230	60	109	109,22	1,197E-04
3	136,5	142,6	6,1	0,230	60	110	110,22	1,208E-04
4	136,5	142,6	6,1	0,230	60	112	112,23	1,230E-04
5	136,5	142,6	6,1	0,230	60	112	112,23	1,230E-04
6	136,5	142,6	6,1	0,230	60	112	112,23	1,230E-04
								1,222E-04

Messung 2

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,7	145,3	8,6	0,325	60	192	192,39	1,496E-04
2	136,7	145,3	8,6	0,325	60	195	195,39	1,519E-04
3	136,7	145,3	8,6	0,325	60	194	194,39	1,511E-04
4	136,7	145,3	8,6	0,325	30	101	101,20	1,574E-04
5	136,7	145,3	8,6	0,325	30	99	99,20	1,543E-04
6	136,7	145,3	8,6	0,325	60	194	194,39	1,511E-04
								1,526E-04

Messung 4

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	136,8	147	10,2	0,385	60	271	271,55	1,780E-04
2	136,8	147	10,2	0,385	30	140	140,28	1,839E-04
3	136,8	147	10,2	0,385	30	135	135,27	1,774E-04
4	136,8	147	10,2	0,385	30	135	135,27	1,774E-04
5	136,8	147	10,2	0,385	30	135	135,27	1,774E-04
6	136,8	147	10,2	0,385	30	135	135,27	1,774E-04
								1,786E-04

Versuch 5

Messung 2

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	126,5	154,7	28,2	1,343	60	26	26,05	4,895E-06
2	126,5	154,7	28,2	1,343	60	24	24,05	4,519E-06
3	126,5	154,7	28,2	1,343	120	49	49,10	4,613E-06
4	126,5	154,7	28,2	1,343	120	50	50,10	4,707E-06
5	126,5	154,7	28,2	1,343	120	50	50,10	4,707E-06
								4,688E-06

Messung 3

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	i	Δt in s	Q in g	V in cm ³	k in m/s
1	126,5	151,1	24,6	1,171	120	46	46,09	4,964E-06
2	126,5	151,1	24,6	1,171	120	52	52,10	5,612E-06
3	126,5	151,1	24,6	1,171	120	42	42,08	4,533E-06
4	126,5	151,1	24,6	1,171	120	48	48,10	5,180E-06
								5,072E-06

Versuch 6

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	a Überlauf	Δt in s	k in m/s
1	18,6	18,15	0,45	265,904	1800	9,860E-07

Messung	H1 in cm	H2 in cm	Δh in cm	a Überlauf	Δt in s	k in m/s
2	18,15	17,8	0,35	265,904	3600	3,920E-07

VIII Selbstständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung die angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Weimar, den _____

Ort, Datum

Unterschrift

Thesen

- 1 Ein weitgestufter Boden ist umso durchlässiger, je homogener dessen Kornfraktionen verteilt sind. Es existiert ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen dem k-Wert und dem Homogenitätsgrad. Ist der gleiche Boden systematisch entmischt, bestimmt immer die undurchlässigste Schicht den Durchlässigkeitsbeiwert.
- 2 Eine Erhöhung des Feinkornanteils weitgestufter Böden hat eine Verringerung des k-Wertes zur Folge. Eine Steigerung des Feinkornanteils um zehn Prozent bewirkt eine Minderung des k-Wertes um ein Drittel des Ursprungswertes. Wird der Feinkornanteil verdoppelt, nimmt die Durchlässigkeit des Bodens um drei Zehnerpotenzen ab. Bei weiterer Zunahme des Feinkornanteils reduziert sich die Durchlässigkeit nur noch allmählich, bis der Grenzwert der Durchlässigkeit des reinen Feinkornmaterials erreicht ist.
- 3 Eine Schicht des Feinmaterials in Mitten der anderen Kornfraktionen ist genauso durchlässig wie ein Boden mit doppelt so viel Feinkornanteil. Ab einer Verdopplung des Feinkornanteils ist es demnach unwesentlich, ob es eine Schicht aus undurchlässigerem Material gibt, oder diese verteilt im Boden vorliegt.
- 4 Die Berechnung mit Hilfe der Korngrößenverteilung setzt eine Homogenität voraus, die in der Natur nie vorkommen würde. Die Streuung der empirischen Werte ist größer, als die der experimentell ermittelten Werte. Sobald es sich um weitgestufte homogene Korngrößenverteilungen handelt, werden die Abweichungen zwischen experimentell und empirisch ermittelten Werten größer. Das Experiment zeigt, dass der nicht entmischte Boden undurchlässiger und der entmischte Boden durchlässiger ist als durch die Berechnung prognostiziert wurde.
- 5 Die Homogenität eines weitgestuften Erdstoffs hat einen großen Einfluss auf deren Durchlässigkeit. Der Boden ist im Zustand der stochastischen Homogenität um ein Hundertfaches durchlässiger als bei nahezu völliger Entmischung. Der Feinkornanteil bestimmt zudem hauptsächlich die Durchlässigkeit der gesamten Kornverteilung.