

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

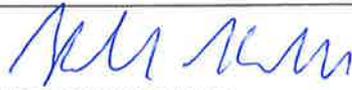
Unterschrift

MASTERARBEIT-AUSGABEPROTOKOLL
an der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der TU Graz

KANDIDAT: GRUBER Patrick (Name)	1130580 F 066 466 (Mat.Nr.)/(Studienrichtung)
 (Unterschrift)	
THEMA der Masterarbeit: Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik Zielsetzung (stichwortartig): <ul style="list-style-type: none">- Literatursuche und -studium- Grundlagen der Bodenmechanik von teilgesättigten Böden- Stoffgesetze von teilgesättigten Böden (Bezug auf Störungszonen und Massenbewegungen)- Laborversuche mit geschichteten (schwache bis starke Struktur, ein paar bis viele Schichten) Proben (separate Schichten mit feinerem und gröberem Material)- Messung der Wasserrückhaltekurven unter Verwendung von stationären Drucktechniken und dem vereinfachten Verdampfungsverfahren mit Tensiometern- Numerische Modellierung- Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick- Die Ergebnisse sollen einen Vergleich und eine Beschreibung der Auswirkungen der Heterogenität auf das hydraulische Verhalten ermöglichen.	
FACHGEBIET: Bodenmechanik und Grundbau ggf. 2. FACHGEBIET:	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roman Marte (Name) ggf. 2. BETREUER: Ass.-Prof. Mag. Dr.rer.nat. Gerfried Winkler (Name) mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz (Name)	
 (Unterschrift)  (Unterschrift) 	
AUSGABEDATUM:	14.03.2017
SPÄTESTER ABGABETERMIN: 31.08.2017	

Beurteilung:

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

18.7.2017 

.....
Datum und Unterschrift des Studiendekans

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik untersucht. Dabei wurden die Wasserdurchlässigkeit und das Wasserrückhaltevermögen für gesättigte als auch für teilgesättigte Böden anhand des HYPROP[®]-Versuches bestimmt.

Bei der ungesättigten Bodenhydraulik führt die Kapillarität des Wassers zu Saugspannungen zwischen den Wassermolekülen und den Bodenteilchen. Die Höhe der Saugspannung unterscheidet sich je nach Bodenart und Trockendichte, weshalb in dieser Arbeit unterschiedliche Böden untersucht wurden. Insgesamt wurden fünf Versuchsreihen mit fünf unterschiedlichen Bodenproben durchgeführt. Diese unterscheiden sich in deren Korngrößenverteilung, dem Korngefüge und dem Verdichtungszustand. Um den Einfluss der ungesättigten Bodenhydraulik auf unterschiedliche Bodenschichten zu untersuchen, wurden zwei Bodenproben mit schichtweisem Aufbau erstellt und mit den ungeschichteten Bodenproben verglichen.

Das Wasserrückhaltevermögen der Bodenproben wird anhand der Wasserretentionskurven bestimmt. Die Wasserretentionskurve kennzeichnet die Wasserspeichereigenschaften des Bodens und spiegelt die Porengrößenverteilung wider. Sie stellt die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung dar.

Die Saugspannung hat auch großen Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit von teilgesättigten Böden. Je größer die Saugspannung ist, desto größer ist die Bindungsenergie mit der das Porenwasser an den Boden gebunden ist. Bodenproben mit einem geringen Sättigungsgrad weisen eine hohe Saugspannung auf, so dass ein Teil des eingeströmten Porenwassers zur Sättigung der Poren dient. Dies führt zu einer Reduktion der Wasserdurchlässigkeit.

Anhand des HYPROP[®]-Versuches wurde festgestellt, dass das Wasserrückhaltevermögen und die Wasserdurchlässigkeit der Bodenproben von der Saugspannung zwischen den Wassermolekülen und den Bodenteilchen abhängig ist. Je kleiner die Poren des Bodens sind, desto größer ist die Saugspannung mit der die Bodenteilchen das gespeicherte Porenwasser zurückhalten. Eine Erhöhung der Trockendichte führt zu geringeren Porengrößen in den Bodenproben und somit zu einer Erhöhung der Saugspannung. Den größten Einfluss auf die Höhe der Saugspannung hat jedoch der Sättigungsgrad der Bodenproben. Ein sinkender Sättigungsgrad führt zur Erhöhung der Saugspannung und umgekehrt. Je höher die Saugspannung und somit das Wasserrückhaltevermögen ist, desto geringer ist die Wasserdurchlässigkeit der Bodenproben.

Abstract

In this master thesis, the impact of soil heterogeneity on unsaturated soil hydraulic was analyzed. For this purpose, the water permeability and water retention have been determined for saturated as well as partially saturated soil with HYPROP[®]-experiments.

In unsaturated soil hydraulic, the capillary attraction causes soil moisture tension between water molecules and soil particles. Different soils were analyzed, because the intensity of soil moisture tension is different for soils of different kind and compactness. Five experiments with five different soil samples were carried out. These five samples differ in grain-size distribution, grain structure and compactness. In order to analyze the impact of unsaturated soil hydraulic together with different soil layers, two soil samples with layered structure were produced and compared with non-layered soil samples.

The water retentivity of soil samples is determined with the help of water retention curves. The water retention curve indicates the water storage properties of soil and provides information about the pore size distribution. It relates water saturation and soil moisture tension.

Soil moisture tension also has a big impact on the water permeability properties of partially saturated soil. The higher the tension, the bigger the binding energy that binds the interstitial water to the soil. Soil samples with a low degree of saturation show a high soil moisture tension, therefore, a part of the in streaming water is used to saturate the interstices. This leads to a reduction of water permeability.

The HYPROP[®]-experiment showed that water retentivity and water permeability depend on the soil moisture tension between water molecules and soil particles. The smaller the interstices of the soil, the higher the soil moisture tension which holds back the interstitial water. A higher soil compactness also leads to smaller interstices in the soil, and therefore to higher soil moisture tension. The biggest impact on soil moisture tension can be observed from the degree of saturation of the soil sample. A low degree of saturation leads to higher soil moisture tension and vice versa. The higher the soil moisture tension and the resulting higher water retentivity, the lower the water permeability of the soil sample.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Teilgesättigte Böden	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Wasser im Boden	6
2.2.1	Gesetz von Darcy	8
2.2.2	Porenraum	10
2.2.3	Wassergehalt	11
2.2.4	Sättigungsgrad	11
2.2.5	Dichteabhängigkeit infolge der Sättigung	12
2.3	Kapillarität	13
2.4	Saugspannung	15
2.5	Wasserdurchlässigkeit	17
2.5.1	Relative Durchlässigkeit	18
2.6	Wasserretentionskurve	19
3	Untersuchte Böden	21
3.1	Allgemeines	21
3.2	Schluffiger Sand (si Sa)	22

3.3	Toniger Schluff (cl Si)	24
3.4	Toniger Schluff-Sand (cl Si-Sa)	26
4	Bodenphysikalische Versuche	28
4.1	Bestimmung der Korngrößenverteilung (EN ISO 17892-4:2017)	29
4.1.1	Nasssiebung	30
4.1.2	Korngrößenverteilung durch Siebung	30
4.1.3	Korngrößenverteilung durch Sedimentation	31
4.2	Bestimmung der Korndichte (EN ISO 17892-3:2016)	32
4.2.1	Versuchsdurchführung	32
4.2.2	Auswertung der Korndichte	33
4.3	Ermittlung der Standard-Proctorkurve 34 (ÖNORM EN 13286-2:2012)	34
4.3.1	Versuchsdurchführung	34
4.3.2	Auswertung Proctorversuch	35
4.4	Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle (ÖNORM B 4422-1:1992)	37
4.4.1	Versuchsdurchführung	38
4.4.2	Auswertung der Wasserdurchlässigkeit	39

4.5	Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter (ÖNORM L 1065:2006)	40
4.5.1	Vorbereitung	41
4.5.2	Versuchsdurchführung	42
4.5.3	Auswertung der Wasserdurchlässigkeit	43
4.6	Drucktopfversuch (ÖNORM L 1063:2006)	45
4.6.1	Probenherstellung	46
4.6.2	Versuchsdurchführung	46
4.6.3	Auswertung Drucktopfversuch	48
5	HYPROP[®]-Versuch (UMS 2015)	49
5.1	Herstellung der Bodenproben	50
5.1.1	Bodenprobe Sa	51
5.1.2	Bodenprobe Si	51
5.1.3	Bodenprobe Sa/Si	51
5.1.4	Bodenprobe Si/Sa	52
5.1.5	Bodenprobe Sa&Si	52
5.2	Versuchsdurchführung HYPROP [®] -Versuch	52
5.2.1	Aufsättigung der Bodenproben	53

5.2.2	Entlüften des Messsystems	53
5.2.3	Montage der Bodenproben am Messsystem	55
5.2.4	Start der HYPROP [®] Messkampagne	55
5.2.5	Bestimmung der Trockenmasse der Bodenproben	57
5.2.6	Auswertung der Messergebnisse mittels HYPROP-FIT [®]	58
5.2.7	Constrained van Genuchten-Mualem Modell	59
6	Ergebnisse der Versuche	61
6.1	Bodenprobe Sa (Versuchsreihe 1)	62
6.2	Bodenprobe Si (Versuchsreihe 2)	66
6.3	Bodenprobe Sa/Si (Versuchsreihe 3)	70
6.4	Bodenprobe Si/Sa (Versuchsreihe 4)	74
6.5	Bodenprobe Sa&Si (Versuchsreihe 5)	78
7	Gegenüberstellung der Ergebnisse	82
8	Schlussfolgerung und Ausblick	90
9	Literaturverzeichnis	92

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

HYPROP [®]	Hydraulic Property Analyser
STZ	Stechzylinder

Kleine Buchstaben

a	[-]	Formfaktor zur Bestimmung der spezifische Kornoberfläche
e	[-]	Porenzahl
d	[μm]	Korngröße
h	[m]	hydraulische Druckhöhe
h	[1/hPa]	Saugspannung bzw. Matrixpotential
h_k	[m]	kapillare Steighöhe
i	[-]	hydraulischer Gradient
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert (gesättigte Durchlässigkeit)
k_{10}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Temperatur von 10 °C
$k_{(h)}$	[-]	ungesättigte Durchlässigkeit
$k_{r(h)}$	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit
k_T	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchstemperatur
k_w	[m/s]	Wasserdurchlässigkeitsbeiwert
l	[m]	durchströmte Länge
m	[-]	zusätzlicher Kurvenparameter der Retentionskurve
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
m_i	[g]	Trockenmasse der Korngruppe i
m_w	[g]	Masse des Porenwassers
n	[-]	Porenanteil, Porosität
n	[-]	Parameter, bestimmt die Steilheit der Retentionskurve
r	[m]	Radius der Kapillare
t	[s]	Durchflussdauer
u	[KN/m ²]	Porenwasserdruck
u_a	[KN/m ²]	Luftdruck
u_w	[KN/m ²]	Wasserdruck
v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit, Strömungsgeschwindigkeit
w	[M-%]	gravimetrischer Wassergehalt
w_r	[M-%]	residualer Wassergehalt in Masseprozent
w_s	[M-%]	Wassergehalt bei Sättigung in Masseprozent

Große Buchstaben

A	[m ²]	durchflossene Querschnittsfläche
A_s	[cm ²]	spezifische Kornoberfläche
Q	[m ³ /s]	Durchflussmenge (Volumenstrom)
Re	[-]	Reynolds-Zahl
S_e	[-]	effektiver Sättigungsgrad
S_r	[-]	Sättigungsgrad
T_S	[KN/m]	Oberflächenkraft
V	[cm ³]	Gesamtvolumen
V_0	[cm ³]	Porenvolumen
V_s	[cm ³]	Feststoffvolumen
V_w	[cm ³]	Porenwasservolumen als auch Durchflussmenge

Griechische Buchstaben

α	[°]	Kontaktwinkel der Oberflächenkraft
α	[1/cm]	Parameter, bestimmt den Wendepunkt der Retentionskurve
γ_w	[KN/m ³]	Wichte von Wasser
θ	[Vol.-%]	volumetrischer Wassergehalt
θ_r	[Vol.-%]	residualer Wassergehalt in Volumsprozent
θ_s	[Vol.-%]	Wassergehalt bei Sättigung in Volumsprozent
ϑ	[m ² /s]	kinematische Viskosität der Flüssigkeit
ϑ_T	[m ² /s]	kinematische Viskosität von Wasser bei Versuchstemperatur
ϑ_{10}	[m ² /s]	kinematische Viskosität von Wasser bei 10 °C
ρ	[g/cm ³]	Feuchtdichte
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_{sat}	[g/cm ³]	gesättigte Dichte
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wassers
σ	[KN/m ²]	totale Spannungen
σ'	[KN/m ²]	effektive Spannungen
Ψ	[KN/m ²]	Saugspannung (Kapillarspannung)
χ	[-]	Saugspannungskoeffizient (Bishop Parameter)

1 Einleitung

In dieser Masterarbeit werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik untersucht. Dabei wurden die Wasserdurchlässigkeit und das Wasserrückhaltevermögen für gesättigte, als auch teilgesättigte Böden anhand des HYPROP[®]-Versuches bestimmt. Die Versuchsdurchführung erfolgte in Kooperation mit der Technischen Universität Graz, dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau (Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz) und der Karl-Franzens Universität Graz, dem Institut für Erdwissenschaften (Ass.-Prof.Mag. Dr.rer.nat Gerfried Winkler).

Bei der ungesättigten Bodenhydraulik führt die Kapillarität des Wassers zu Saugspannungen zwischen den einzelnen Bodenteilchen. Diese unterscheiden sich je nach Bodenart und Lagerungsdichte, weshalb in dieser Arbeit unterschiedliche Böden untersucht wurden. Die Höhe der Saugspannungen in teilgesättigten Böden ist abhängig von deren Korngröße und Korngrößenverteilung, dem Korngefüge, dem Verdichtungszustand, sowie dem Wassersättigungsgrad.

Anhand der Wasserretentionskurve (auch pF-Kurve genannt), wird die Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Saugspannung dargestellt. Sie ist eine bodenhydrologische Kennfunktion und spiegelt die Porengrößenverteilung wider. Somit kennzeichnet die Wasserretentionskurve die Wasserspeichereigenschaften des Bodens. Auch bei der teilgesättigten Wasserdurchlässigkeit von Böden hat die Saugspannung großen Einfluss, da die Wasserbewegung von teilgesättigten Böden sehr stark vom Sättigungsgrad der mit Wasser gefüllten Poren abhängig ist. Je geringer der Sättigungsgrad der Böden ist, desto größer sind die Saugspannungen, desto geringer ist die Wasserdurchlässigkeit der Böden.

Die Kenntnis über das Wasserrückhaltevermögen und die Wasserdurchlässigkeit von Böden im gesättigten als auch im teilgesättigten Bereich ist für viele Aufgaben des Bauingenieurwesens von Bedeutung. In der Praxis hat jedoch die numerische Modellierung von teilgesättigten Böden bei Stabilitätsbetrachtungen bisher kaum Anwendung gefunden. Meist wurde hinsichtlich Effekte der Teilsättigung die Annahme von gesättigten Verhältnissen getroffen, welche zwar die „sicherste“, nicht jedoch die kostengünstigste Lösung war, besonders bei kurzzeitigen Betrachtungen wie zum Beispiel beim Bauzustand einer Baugrube. Berücksichtigt man jedoch teilgesättigte Verhältnisse, so wirkt die Saugspannung wie eine scheinbare Kohäsion, welche die Bodenkörner zusammenhält. Vor allem im Hinblick für die Böschungstabilität von Hängen ist es wichtig, die bodenphysikalischen Eigenschaften teilgesättigter Böden zu kennen, um ein mögliches Versagen zu verhindern oder voraussagen zu können.

Wie stark Wassermoleküle an Bodenteilchen gebunden sind ist auch für Pflanzen von großer Bedeutung, da diese die Bindungsenergie überwinden müssen, um Wasser aus dem Boden saugen zu können. Das für Pflanzen verfügbare Wasser liegt zwischen der Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt. Unter der Feldkapazität versteht man die Wassermenge, die ein zunächst wassergesättigter Boden gegen die Schwerkraft nach 2 bis 3 Tagen noch halten kann. Sie ist definiert bei einem Grundwasserstand von 60 cm unter der Bodenoberfläche (60 hPa). Sind die Poren des Bodens nicht mehr mit Wasser gefüllt, sondern nur noch mit Luft, so spricht man von der Luftkapazität. Beim permanenten Welkepunkt ist der Austrocknungsgrad des Bodens so groß, dass Pflanzen bei einer so geringen Bodenfeuchte keine vergleichbar hohe Saugspannung aufbringen können, um Wasser aus dem Boden zu saugen. Der permanente Welkepunkt ist definiert bei einem Abstand zum Grundwasser von ca. 160 m (16.000 hPa).

In der folgenden Abbildung (Abb. 1) sind die Wasserretentionskurven für Böden aus Sand, Schluff und Ton dargestellt. Des Weiteren sind das pflanzenverfügbare Wasser und das nicht pflanzenverfügbare Wasser, sowie die Luftkapazität (LK), die Feldkapazität (FK) und der permanente Welkepunkt (PWP) abgebildet.

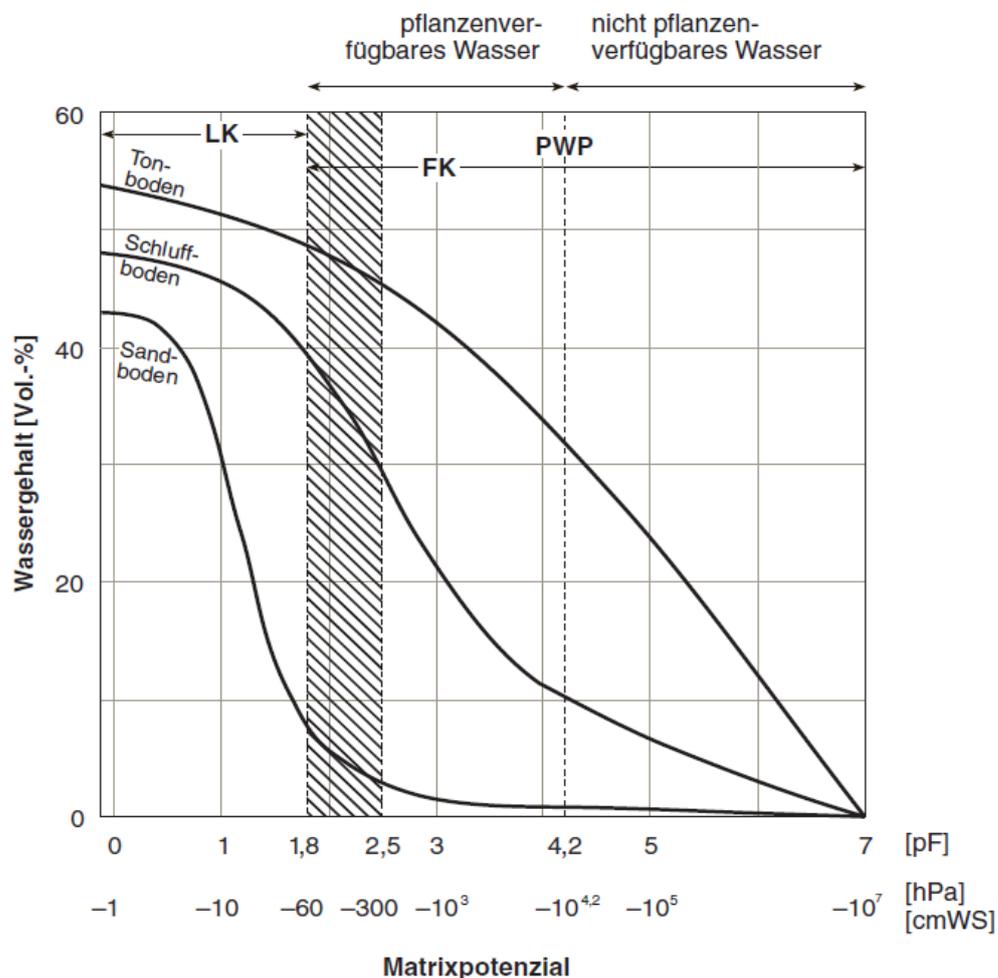


Abb. 1 Übersicht der Wasserretentionskurven (Scheffer, 2010)

2 Teilgesättigte Böden

2.1 Allgemeines

Böden (Lockergesteine) entstehen durch physikalische, chemische und zum Teil auch biologische Verwitterung von Felsen (Festgesteine), Verfrachtung und anschließender Sedimentation.

Im Allgemeinen sind Fest- und Lockergesteine ein Dreiphasensystem aus Bodenkörnern (Feststoff), Porenwasser (Flüssigkeit) und Porengas (Luft). Böden werden als teilgesättigt bezeichnet, wenn deren Porenraum mit mehr als einer Phase befüllt ist. Ist deren Porenraum vollständig mit einer Flüssigkeit befüllt, so spricht man von gesättigten Böden.

Das Volumen V und die Masse m der einzelnen Phasen, sowie der Porenanteil n und die Porenzahl e sind vereinfacht in der folgenden Abbildung (Abb. 2) als Dreiphasengemisch dargestellt.

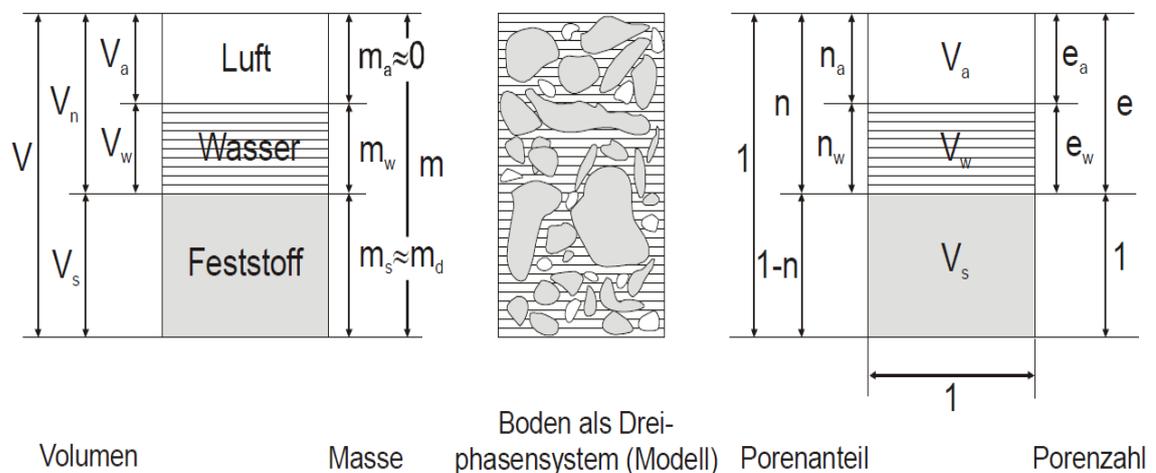


Abb. 2: Boden als Dreiphasengemisch

Der Feststoff, bestehend aus Bodenkörnern, ist kein homogenes Material und lässt sich anhand von Größe, Form, Art der Lagerung und deren mineralischen Zusammensetzung beschreiben. Diese Bodenheterogenität hat Auswirkungen auf bodenmechanische, sowie bodenhydraulische Eigenschaften.

Die Oberfläche der Körner mit einer Einheitstrockenmasse von $m_d = 1$ g ist als spezifische Kornoberfläche A_s definiert. Die spezifische Kornoberfläche A_s ist von der Kornform abhängig und nimmt mit abnehmender Korngröße d zu. Anhand der folgenden Gleichung kann die Kornform abgeschätzt werden: (Boley, 2012)

$$A_s = \frac{a}{d \cdot \rho_s} \quad (1)$$

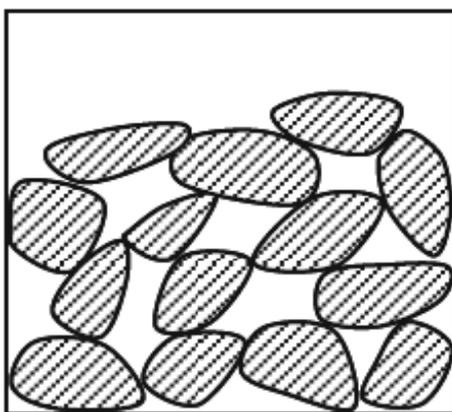
A_s	[cm ²]	spezifische Kornoberfläche
a	[-]	Formfaktor zur Bestimmung der spezifische Kornoberfläche
d	[μ m]	Korngröße
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte

Die Formfaktoren ergeben sich zu:

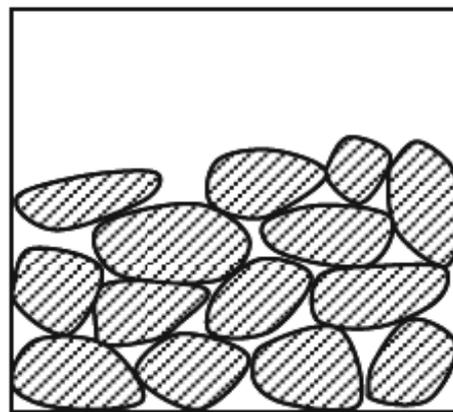
$a = 6$	[-]	für würfel- und kugelförmige Körner (z. B. Quarz)
$a = 24$	[-]	für Plättchen der Dicke $0,1 \cdot d$ (z. B. Kaolin und Illit)
$a = 204$	[-]	für Plättchen der Dicke $0,01 \cdot d$ (z. B. Montmorillonit)

Bodenkörner können sowohl in dichter, als auch lockerer Lagerung vorkommen und bilden anhand der Entstehung des Bodens, der Art der Körner und deren Korngröße unterschiedliche Bodengefüge. Dabei werden Bodenkörner unterschiedlich aneinandergesetzt.

Die einzelnen Bodenkörner des Kieses und des Sandes mit einer Korngröße von 0,063 mm bis 63 mm sind mit freiem Auge erkennbar und bilden ein Einzelkorngefüge. Dieses kann je nach Ablagerung im Wasser oder in der Luft locker, oder dicht gelagert sein (siehe Abb. 3).



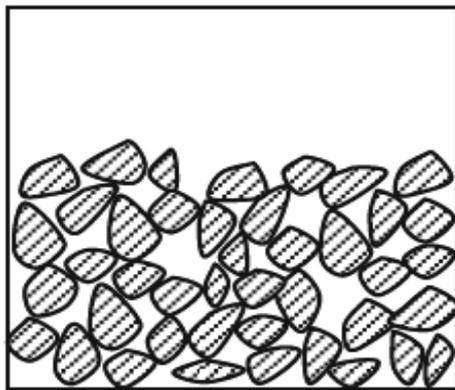
a) locker gelagert



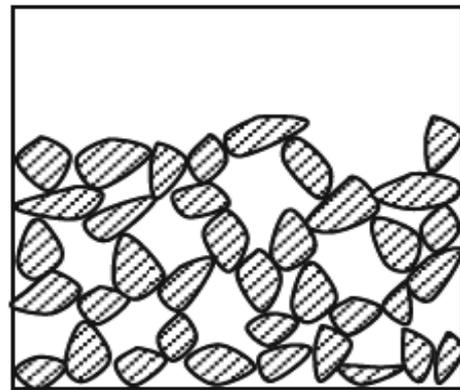
b) dicht gelagert

Abb. 3: Einzelkorngefüge von Kies und Sand

Die einzelnen Bodenkörner der Schluffe mit einer Korngröße von 0,002 mm bis 0,063 mm sind hingegen mit freiem Auge nicht mehr sichtbar. Schluff kann durch Ablagerung in der Luft, oder durch Sedimentation im Wasser entstehen. Dabei bildet Schluff bei einer Ablagerung in der Luft ein Einzelkorngefüge und bei Sedimentation im Wasser ein Wabengefüge (siehe Abb. 4).



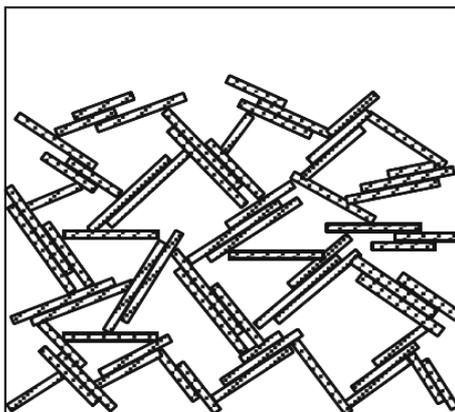
a) Einzelkorngefüge



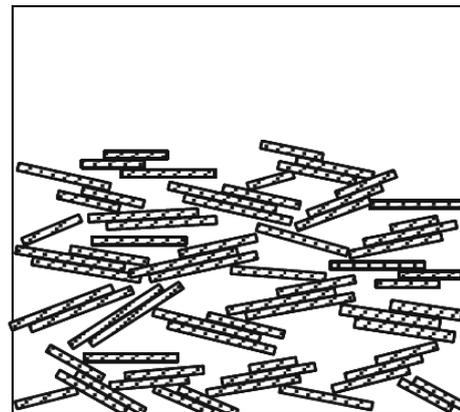
b) Wabengefüge

Abb. 4: Korngefüge von Schluff

Tonkörner mit einer Korngröße von kleiner 0,002 mm kommen überwiegend als Plättchen vor. Tonböden bilden durch Sedimentation im Wasser ein Flockengefüge, welches durch Belastung komprimiert wird. In lockerer Lagerung bilden Tonplättchen eine Wabenstruktur, in dichter Lagerung eine Parallelstruktur (siehe Abb. 5).



a) locker gelagert



b) komprimiert

Abb. 5: Flockengefüge von Tonkörner

2.2 Wasser im Boden

Das Wasser im Porenraum gesättigter sowie teilgesättigter Böden wird Porenwasser genannt. Je nach den unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Porenwassers unterscheidet man folgende Erscheinungsformen: Gebundenes Wasser, freies Porenwasser, Adsorptionswasser, Kapillarwasser und festes Wasser (siehe Abb. 6). (Boley, 2012)

Gebundenes Wasser haftet an der Kornoberfläche von Böden aufgrund deren elektrischen Ladung. Je größer die Entfernung zu der Kornoberfläche ist, desto geringer ist das Potential der Saugspannung (Wasserrückhaltevermögen). Wenn der Einfluss der elektrischen Ladung von Bodenkörnern auf die Wassermoleküle im Porenraum gesättigter Böden vernachlässigt werden kann, spricht man von freiem Porenwasser. Dieses verhält sich wie Wasser im herkömmlichen Sinne. Ähnlich wie bei gebundenem Wasser, bildet sich auch bei Adsorptionswasser an der Kornoberfläche von Fein- als auch Grobkörnern eine Wasserschicht. Bei teilgesättigten Böden spricht man von Adsorptionswasser, in gesättigten Böden von gebundenem Wasser. Oberhalb des Grundwasserspiegels kann infolge der Oberflächenspannung zwischen freien Poren und Porenwasser eine Kapillarzone entstehen. Das sich in dieser Zone befindende Porenwasser wird Kapillarwasser oder auch Kapillarsteigwasser genannt. Sinkt die Temperatur des Bodens und des Porenwassers unter den Gefrierpunkt, so wandelt sich freies als auch schwach gebundenes Wasser in festes Wasser (Eis) um. In diesem Fall muss das Porenwasser als Feststoff im Porenraum berücksichtigt werden.

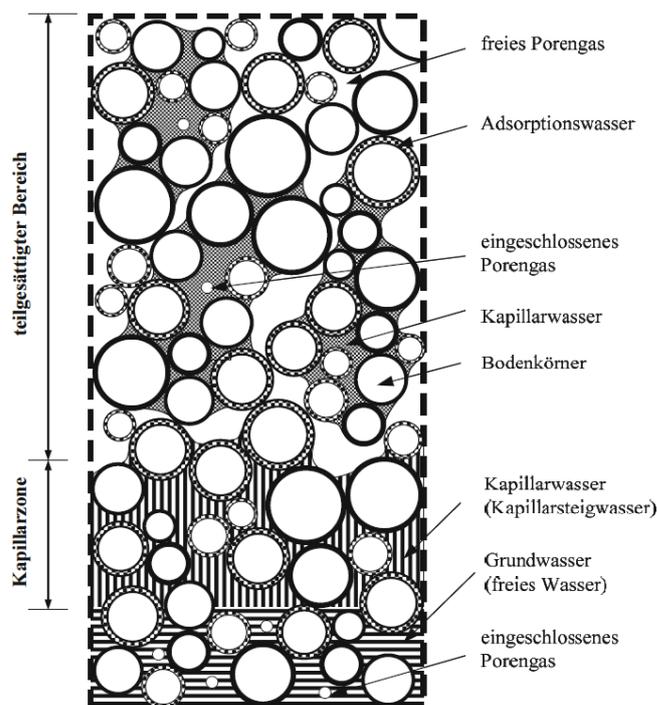


Abb. 6: Porenwasser und Porenluft (Boley, 2012)

Oberhalb des Grundwasserspiegels entstehen infolge der Kapillarwirkung eine Kapillarzone und eine teilgesättigte Zone (siehe Abb. 7). In diesen Zonen ist der Boden teilgesättigt und es entsteht aufgrund der Saugspannungen ein negativer Porenwasserdruck u_w (Zugspannung). Dabei nimmt der Sättigungsgrad S_r mit zunehmender Höhe über dem Grundwasserspiegel ab und die Saugspannungen zu. Infolge der Oberflächenspannung T_s des Porenwassers wirkt ein Kapillardruck p_k auf die Bodenkörner. Diese ähnelt einer Kohäsion und führt zu einer Erhöhung der Scherfestigkeit. Der Kapillardruck p_k ist ausschließlich von der Höhe der Oberflächenspannung T_s des Porenwassers abhängig und wird auch Kapillarkohäsion oder scheinbare Kohäsion genannt.

In der wassergesättigten Zone unterhalb des Grundwasserspiegels ist der Boden vollständig gesättigt und es entsteht ein positiver Porenwasserdruck u_w (Druckspannung). Dieser nimmt konstant über die Tiefe zu. Aufgrund des Grundwassers befinden sich die unter dem Grundwasserspiegel liegenden Bodenkörner unter Auftrieb. Dieser positive Porenwasserdruck u_w führt zu einer Reduktion der effektiven Spannung σ , welche die Bodenkörner zusammen hält.

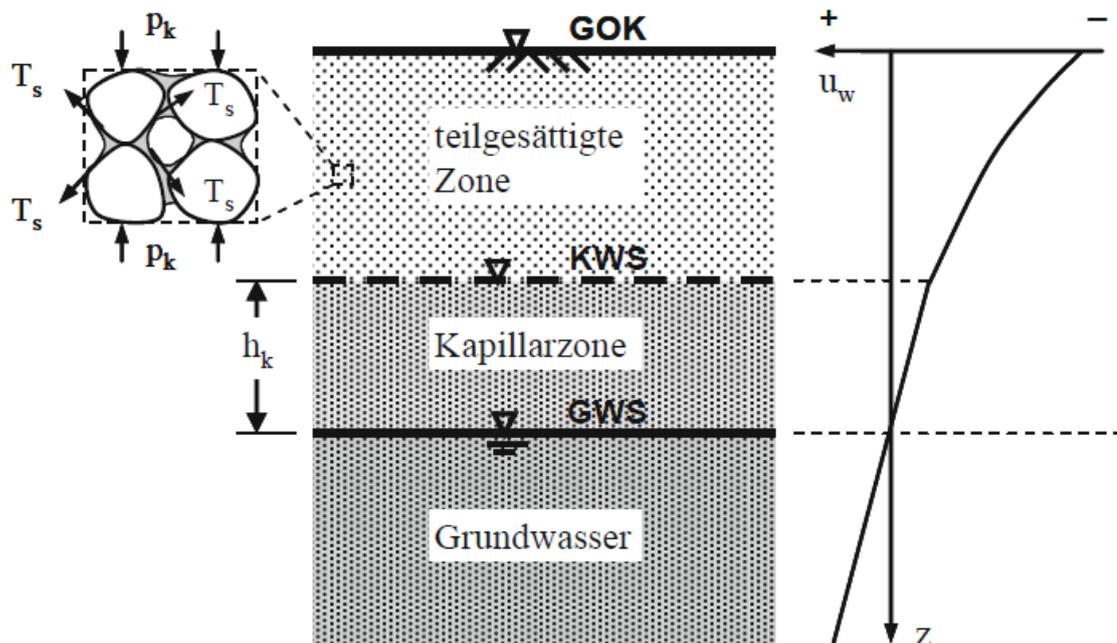


Abb. 7: Wasser im Boden (Boley, 2012)

2.2.1 Gesetz von Darcy

Darcy untersuchte die Gesetzmäßigkeiten des Wasserflusses durch Filter indem er das laminare Strömungsverhalten in mit Sand befüllten Glasrohren beobachtete (siehe Abb. 8). Dabei kam er zum Schluss, dass die Durchflussmenge Q (Volumenstrom) bei einer durchflossenen Querschnittsfläche A eines porösen Mediums, dem Druckhöhenunterschied Δh direkt proportional und umgekehrt proportional der Fließlänge Δl ist (Coldewey & Hölting, 2013).

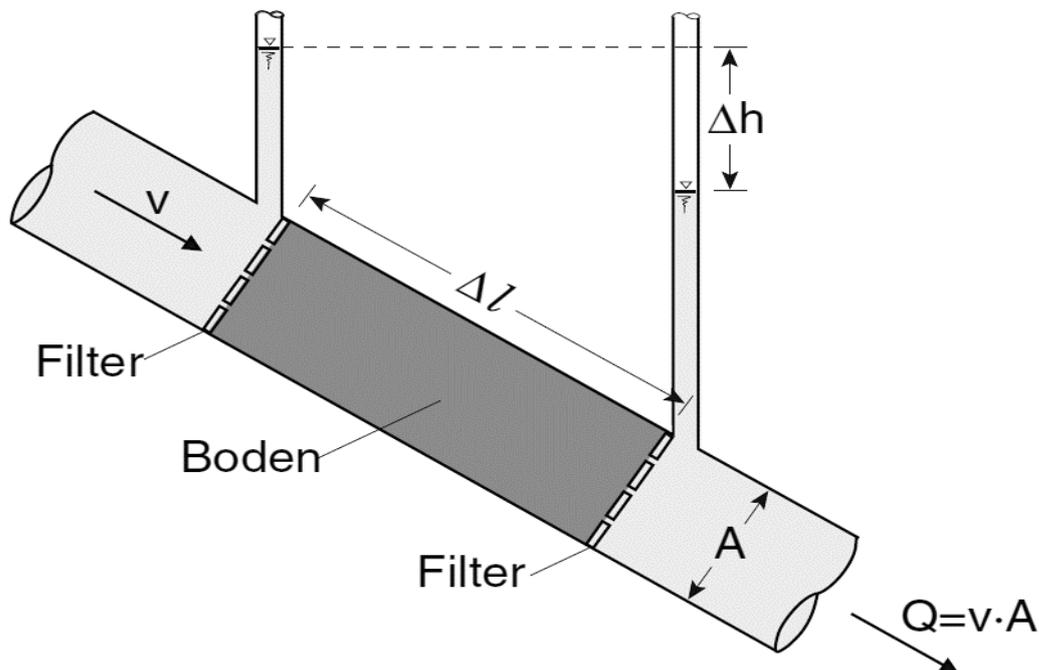


Abb. 8: Prinzipskizze vom Gesetz von Darcy

Aufgrund seiner Messergebnisse führte Darcy den Durchlässigkeitsbeiwert k ein, und formulierte das Filtergesetz von Darcy (siehe Gleichung 2). Der hydraulische Gradient i stellt dabei den Druckhöhenunterschied Δh bezogen auf die Fließlänge Δl dar.

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} = k \cdot A \cdot i \quad (2)$$

Q	[m ³ /s]	Durchflussmenge (Volumenstrom)
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
A	[m ²]	durchflossene Querschnittsfläche
Δh	[m]	Druckhöhenunterschied
Δl	[m]	Fließlänge
i	[-]	hydraulischer Gradient

Unter der Berücksichtigung, dass sich die Durchflussmenge Q aus der Fließgeschwindigkeit v mal der durchflossenen Querschnittsfläche A ergibt, erhält man folgende Gleichung:

$$v = k \cdot i \quad (3)$$

v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
i	[-]	hydraulischer Gradient

Somit besagt das Gesetz von Darcy, dass die Fließgeschwindigkeit v (Filtergeschwindigkeit) durch ein poröses Medium, proportional dem hydraulischen Gradienten i ist. Daraus geht hervor, dass die Wasserdurchlässigkeit von Böden abnimmt, wenn der hydraulische Gradient i steigt.

Der von Darcy bestimmte Durchlässigkeitsbeiwert k beschreibt den Widerstand (Reibung) eines von Wasser durchflossenen porösen Mediums. Dieser gilt nur bei laminarer Strömung und ist von den Eigenschaften der Flüssigkeit (wie z. B. Dichte, Viskosität, Temperatur) abhängig.

Anhand der Reynolds-Zahl Re kann der Zustand der Strömung (laminar oder turbulent) bestimmt werden. Eine laminare Strömung ist eine Bewegung von Flüssigkeiten, bei der keine Turbulenzen (Verwirbelungen) auftreten. Bei einer turbulenten Strömung treten hingegen Turbulenzen (Verwirbelungen) in Form von Querbewegungen auf. Die Reynolds-Zahl Re errechnet sich wie folgt:

$$Re = \frac{v \cdot l}{\vartheta} \quad (4)$$

Re	[-]	Reynolds-Zahl
v	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit (mittlere Fließgeschwindigkeit)
l	[m]	durchströmte Länge
ϑ	[m ² /s]	kinematische Viskosität der Flüssigkeit (Wasser bei 20° C: $\vartheta = 1,0 \cdot 10^{-6}$ m ² /s)

Überschreitet die Reynolds-Zahl Re den kritischen Wert Re_{krit} so findet ein Übergang von laminarer auf turbulenter Strömung statt und das Filtergesetz von Darcy darf nicht angewandt werden.

2.2.2 Porenraum

Der Porenraum ist der Zwischenraum im Dreiphasensystem, welcher nicht aus Bodenkörnern (Feststoff) besteht. Er wird mittels der Parameter Porenanteil n und Porenzahl e beschrieben (siehe Abb. 2).

Der Porenanteil n einer Bodenprobe ist definiert als das Verhältnis zwischen Porenvolumen V_0 zum Gesamtvolumen V und errechnet sich wie folgt:

$$n = \frac{V_0}{V} = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{m_d}{\rho_s \cdot V} \quad (5)$$

n	[-]	Porenanteil
V	[cm ³]	Gesamtvolumen
V_0	[cm ³]	Porenvolumen
V_s	[cm ³]	Feststoffvolumen
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte

Die Porenzahl e ist das Verhältnis des Porenvolumens V_0 zum Feststoffvolumen V_s und errechnet sich wie folgt:

$$e = \frac{V_0}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \frac{V \cdot \rho_s}{m_d} - 1 \quad (6)$$

e	[-]	Porenzahl
V	[cm ³]	Gesamtvolumen
V_0	[cm ³]	Porenvolumen
V_s	[cm ³]	Feststoffvolumen
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte

Der Porenanteil n und die Porenzahl e stehen in folgender Beziehung zueinander:

$$n = 1 - \frac{1}{1 + e} = \frac{e}{1 + e} \quad (7)$$

n	[-]	Porenanteil
e	[-]	Porenzahl

2.2.3 Wassergehalt

In dieser Arbeit wird der Wassergehalt der Bodenproben für die Auswertung der Wasserretentionskurven sowohl volumetrisch, als auch gravimetrisch bestimmt. Der volumetrische Wassergehalt θ bezieht sich auf das Gesamtvolumen der Bodenprobe. Im Gegensatz zum volumetrischen Wassergehalt θ bezieht sich der gravimetrische Wassergehalt w auf die Trockenmasse der Bodenprobe.

Der volumetrische Wassergehalt θ errechnet sich wie folgt:

$$\theta = \frac{V_w}{V} \cdot 100 \quad (8)$$

θ	[Vol.-%]	volumetrischer Wassergehalt
V_w	[cm ³]	Porenwasservolumen
V	[cm ³]	Gesamtvolumen

Der gravimetrische Wassergehalt w errechnet sich wie folgt:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (9)$$

w	[M-%]	gravimetrischer Wassergehalt
m_w	[g]	Masse des Porenwassers
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe

2.2.4 Sättigungsgrad

Der Sättigungsgrad S_r einer Bodenprobe stellt das Volumen der mit Wasser gefüllten Poren (Porenwasservolumen V_w) bezogen auf das Porenvolumen V_0 dar und errechnet sich wie folgt:

$$S_r = \frac{V_w}{V_0} = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad (10)$$

S_r	[-]	Sättigungsgrad
V_w	[cm ³]	Porenwasservolumen
V_0	[cm ³]	Porenvolumen
e	[-]	Porenzahl
w	[M-%]	gravimetrischer Wassergehalt
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wassers
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte

2.2.5 Dichteabhängigkeit infolge der Sättigung

Die Feuchtdichte eines Bodens stellt das Verhältnis zwischen Masse und Volumen dar und unterscheidet sich nicht nur anhand der Bodenkörner und deren Lagerung, sondern auch vom Sättigungsgrad des Bodens. Somit besitzt ein gesättigter Boden, dessen Poren mit einer Flüssigkeit befüllt sind eine höhere Dichte als ein trockener Boden. In der folgenden Abbildung (Abb. 9) sind ein trockener Boden, ein gesättigter Boden und ein teilgesättigter Boden vereinfacht dargestellt.



Abb. 9: Dichteabhängigkeit infolge von Sättigung

Die folgenden Gleichungen beschreiben die Trockendichte ρ_d (11), die gesättigte Dichte ρ_{sat} (12) und die Feuchtdichte ρ (13).

$$\rho_d = (1 - n) \cdot \rho_s \quad (11)$$

ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
n	[-]	Porosität
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte

$$\rho_{sat} = \rho_d + n \cdot \rho_w \quad (12)$$

ρ_{sat}	[g/cm ³]	gesättigte Dichte
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
n	[-]	Porosität
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wassers

$$\rho = \rho_d + S_r \cdot n \cdot \rho_w \quad (13)$$

ρ	[g/cm ³]	Feuchtdichte
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
S_r	[-]	Sättigungsgrad
n	[-]	Porosität
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wassers

2.3 Kapillarität

Kapillarität ist das Verhalten von Flüssigkeiten an der Oberfläche, das sich bei Kontakt mit einem Feststoff zeigt. Flüssigkeitsmoleküle ziehen sich gegenseitig an, dieses Verhalten wird Kohäsion genannt. An der Grenzfläche der einzelnen Phasen herrscht jedoch kein Kräftegleichgewicht zwischen den einzelnen Flüssigkeitsmolekülen, so dass sich eine nach unten gerichtete resultierende Kraft bildet (siehe Abb. 10). Diese Kraft verursacht die Oberflächenspannung von Flüssigkeiten. Genauso wie sich Flüssigkeitsmoleküle gegenseitig anziehen, ziehen sich auch Feststoff- und Flüssigkeitsmoleküle an. Diese Anziehungskraft von Molekülen unterschiedlicher Phasen wird Adhäsion genannt.

Bei Wasser sind die Adhäsionskräfte größer als die Kohäsionskräfte, so dass die Flüssigkeit den Feststoff benetzt. Hingegen sind bei Quecksilber die Adhäsionskräfte kleiner als die Kohäsionskräfte, so dass keine Benetzung des Feststoffes erfolgt. Je größer die Krümmung an der Oberfläche der Flüssigkeit ist, desto größer ist die kapillare Steighöhe der Flüssigkeit. Bei konkaver Krümmung (Adhäsionskräfte $>$ Kohäsionskräfte) ist die Steighöhe positiv, bei konvexer Krümmung (Adhäsionskräfte $<$ Kohäsionskräfte) negativ.

Der Effekt der kapillaren Steighöhe wird in der Abbildung 10 veranschaulicht und folgend näher beschreiben.

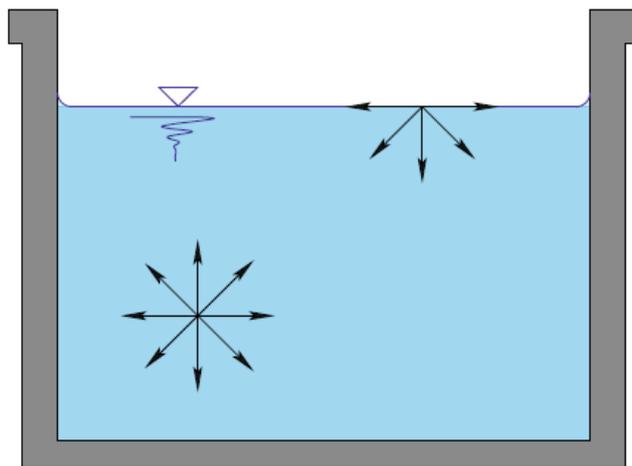


Abb. 10: Molekulare Kohäsionskräfte zwischen Flüssigkeitsmolekülen

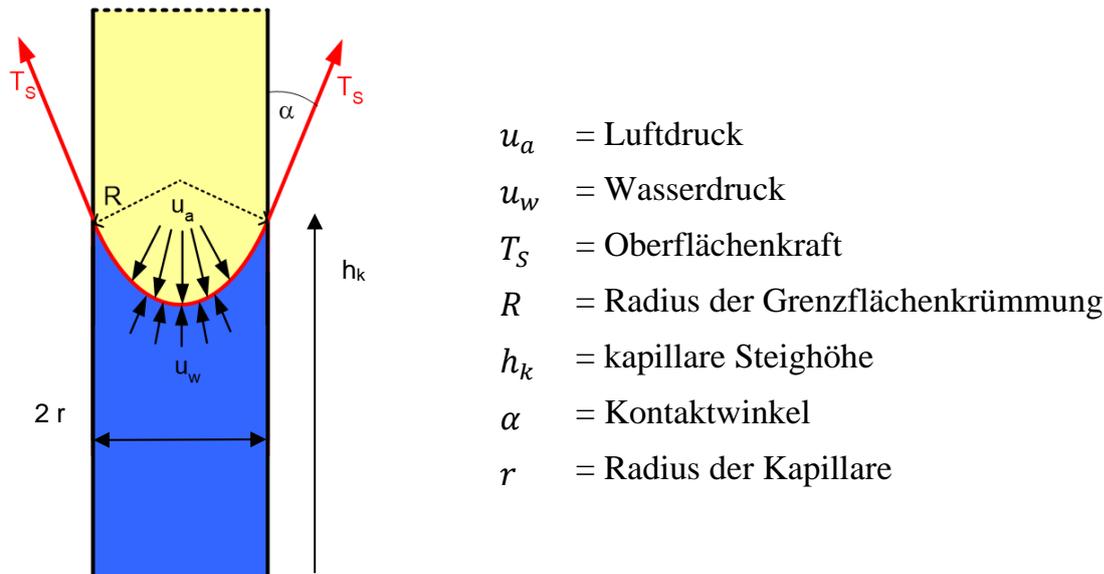


Abb. 11: Kapillare Steighöhe

Im Allgemeinen kann der Boden als ein System aus Kapillarröhrchen mit unterschiedlich großen Durchmessern betrachtet werden. Dabei hängt die kapillare Steighöhe h_k in einer Kapillarröhre von der Oberflächenspannung des Wassers ab, welche auf dem Umfang der Kapillarröhre unter dem Kontaktwinkel α wirkt. Die Oberflächenspannung des Wassers steht im Gleichgewicht mit der Schwerkraft der Wassersäule, daraus ergibt sich folgende Gleichung:

$$h_k \cdot r^2 \cdot \pi \cdot \gamma_w = T_S \cdot \cos(\alpha) \cdot 2 r \cdot \pi \quad (14)$$

h_k	[m]	kapillare Steighöhe
r	[m]	Radius der Kapillare
γ_w	[KN/m ³]	Wichte von Wasser
T_S	[KN/m]	Oberflächenkraft
α	[°]	Kontaktwinkel

Aus Gleichung (14) errechnet sich die kapillare Steighöhe h_k wie folgt:

$$h_k = 2 \cdot \frac{T_S \cdot \cos(\alpha)}{r \cdot \gamma_w} \quad (15)$$

Die kapillare Steighöhe h_k von Wasser in Böden hängt vor allem vom Radius der Kapillare r ab, da die Oberflächenkraft T_S von Wassermolekülen konstant ist. Somit kann jedem Porendurchmesser eine kapillare Steighöhe h_k zugewiesen werden. Diese entspricht dem Wasserrückhaltevermögen (Saugspannung) der jeweiligen Pore.

2.4 Saugspannung

Die Saugspannung Ψ kann aufgrund der Kapillarität erklärt werden (siehe Kapitel 2.3). Sie wird auch Kapillarspannung genannt und stellt die Differenz zwischen Luftdruck u_a und Wasserdruck u_w dar. Die Saugspannung errechnet sich wie folgt:

$$\Psi = u_a - u_w = \frac{2T_S}{r} \quad (16)$$

Ψ	[KN/m ²]	Saugspannung (Kapillarspannung)
u_a	[KN/m ²]	Luftdruck
u_w	[KN/m ²]	Wasserdruck
T_S	[KN/m]	Oberflächenkraft
r	[m]	Radius der Kapillare

Anhand der Saugspannung Ψ kann das Wasserrückhaltevermögen von Böden beschrieben werden. Je kleiner die Poren des Bodens sind, desto größer ist die kapillare Steighöhe h_k und umso größer ist die Saugspannung mit der die Bodenteilchen das gespeicherte Porenwasser zurückhalten. Des Weiteren ist das Wasserrückhaltevermögen des Bodens von deren Wassersättigung abhängig und nimmt mit zunehmendem Wassergehalt ab. Bei gleichem Wassergehalt ist die Saugspannung Ψ bei der Entwässerung höher als bei der Bewässerung (Hysterese: siehe Kapitel 2.6).

Die Saugspannung wird oft als Druck in hPa und kPa, oder als Druckhöhe in cm Wassersäule, sowie als pF-Wert ausgegeben. Der pF-Wert ist der dekadische Logarithmus der Druckhöhe einer Wassersäule in cm.

Die Höhe der Saugspannung ist von folgenden Einflussfaktoren abhängig:

- Wassersättigungsgrad S_r
- Porenanteil n
- Porengrößenverteilung
- Teilchenform
- Teilchengröße
- Abstand der Teilchen zueinander
- Oberfläche des Feststoffes
- phasenspezifischer Benetzungswinkel

Die Saugspannung Ψ wirkt sich auch auf die effektiven Spannungen σ' von teilgesättigten Böden aus, da sie den Porenwasserdruck u verringert. Die effektiven Spannungen σ' beschreiben die Normalspannung des Korngerüsts und sind maßgebend für die Festigkeit des Bodens. Sie werden wie folgt berechnet:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (17)$$

σ'	[KN/m ²]	effektive Spannungen
σ	[KN/m ²]	totale Spannungen
u	[KN/m ²]	Porenwasserdruck

Bei vollständiger Sättigung des Bodens ($S_r = 1$) wirkt keine Saugspannung Ψ , so dass der Porenwasserdruck u dem vorherrschenden Wasserdruck u_w entspricht. Mit abnehmendem Sättigungsgrad steigt die Saugspannung Ψ und die Poren der Bodenteilchen beginnen das Porenwasser zurückzuhalten. Dies führt zu einer Reduktion des Porenwasserdruckes u . Da bei gleichem Wassergehalt die Saugspannung Ψ bei der Entwässerung höher ist als bei der Bewässerung, führte Bishop den Saugspannungskoeffizienten χ ein, welcher eine Funktion der Sättigung des Bodens darstellt. Vereinfacht kann jedoch der Sättigungsgrad S_r anstelle des Saugspannungskoeffizienten χ verwendet werden, wodurch sich folgende Gleichung für den Porenwasserdruck u ergibt:

$$u = (1 - \chi) \cdot u_a - \chi \cdot u_w = u_a - \chi \cdot \Psi \approx u_a - S_r \cdot \Psi \quad (18)$$

u	[KN/m ²]	Porenwasserdruck
S_r	[-]	Sättigungsgrad
u_a	[KN/m ²]	Luftdruck
u_w	[KN/m ²]	Wasserdruck
χ	[-]	Saugspannungskoeffizient (Bishop Parameter)
Ψ	[KN/m ²]	Saugspannung (Kapillarspannung)

Unter der Annahme, dass der Saugspannungskoeffizienten χ dem Sättigungsgrad S_r entspricht und der atmosphärische Luftdruck u_a gleich null ist, errechnen sich die effektiven Spannungen σ' von teilgesättigten Böden wie folgt:

$$\sigma' = \sigma - u \approx \sigma - u_a + S_r \cdot \Psi \approx \sigma - S_r \cdot u_w \quad (19)$$

σ'	[KN/m ²]	effektive Spannungen
σ	[KN/m ²]	totale Spannungen
u	[KN/m ²]	Porenwasserdruck
S_r	[-]	Sättigungsgrad
u_a	[KN/m ²]	Luftdruck
u_w	[KN/m ²]	Wasserdruck
Ψ	[KN/m ²]	Saugspannung (Kapillarspannung)

2.5 Wasserdurchlässigkeit

Grundlage für die Berechnung der Wasserströmung im Boden bildet das Filtergesetz von Darcy (siehe Kapitel 2.2.1). Dieses beschreibt die Durchlässigkeit von Wasser anhand des Durchlässigkeitsbeiwertes k_w . Dieser stellt die Durchflussmenge V_w bei einem hydraulischen Gradienten i bezogen auf eine Querschnittsfläche A in einer bestimmten Durchflussdauer t dar. Der hydraulische Gradient i ist das Verhältnis zwischen dem hydraulischen Höhenunterschied Δh und der durchströmten Länge l .

Der Wasserdurchlässigkeitsbeiwert k_w errechnet sich somit wie folgt:

$$k_w = \frac{V_w \cdot l}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (20)$$

k_w	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert für Wasser
V_w	[m ³]	Durchflussmenge
l	[m]	durchströmte Länge
A	[m ²]	Querschnittsfläche
t	[s]	Durchflussdauer
Δh	[m]	hydraulischer Höhenunterschied

Die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens ist abhängig von der Korngrößenverteilung, dem Korngefüge, dem Verdichtungszustand, dem Sättigungsgrad, sowie der Flüssigkeit, welche den Boden durchströmt (ÖNORM B 4422-1:1992).

Feinkörnigere Böden sind in der Regel weniger wasserdurchlässig als grobkörnige Böden. Ebenso spielt die Korngrößenverteilung eine wesentliche Rolle bei der Wasserdurchlässigkeit von Böden. Bei gleichem Korndurchmesser d_{10} sind gleichkörnige Böden durchlässiger als ungleichkörnige Böden. Auch die Form der Bodenkörner und deren Korngefüge sind maßgebend für die Durchlässigkeit. Zum Beispiel haben fein- und gemischtkörnige Böden mit einem Wabenkorngefüge eine größere Durchlässigkeit als Böden mit einem dichteren Einzelkorngefüge. Mit zunehmender Dichte bei gleicher Korngrößenverteilung nimmt daher die Durchlässigkeit ab. Bei Böden mit denselben Bedingungen ist die Durchlässigkeit bei voller Wassersättigung der Poren am größten. Sind die Böden jedoch nur teilgesättigt, so ist die Wasserdurchlässigkeit der Böden stark reduziert, da sich die mit Luft eingeschlossenen Poren aufgrund der Kapillarwirkung zuerst mit Wasser sättigen.

2.5.1 Relative Durchlässigkeit

Die relative Durchlässigkeit stellt die teilgesättigte Durchlässigkeit von Böden bezogen auf die gesättigte Durchlässigkeit dar (siehe Abb. 12). Dabei ist die Wasserbewegung von teilgesättigten Böden sehr stark vom Sättigungsgrad der mit Wasser gefüllten Poren abhängig. Je geringer der Sättigungsgrad der Böden ist, desto geringer ist die Durchlässigkeit der Böden. Deshalb nimmt die relative Durchlässigkeit mit geringerer Sättigung ab. Die relative Wasserdurchlässigkeit $k_{r(h)}$ ist dimensionslos und nimmt in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_r Werte zwischen 0 und 1 an. Anhand folgender Gleichung errechnet sich die relative Wasserdurchlässigkeit $k_{r(h)}$ wie folgt:

$$k_{r(h)} = \frac{k_{(h)}}{k} \quad (21)$$

$k_{r(h)}$	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit
$k_{(h)}$	[m/s]	ungesättigte Durchlässigkeit
k	[m/s]	gesättigte Durchlässigkeit

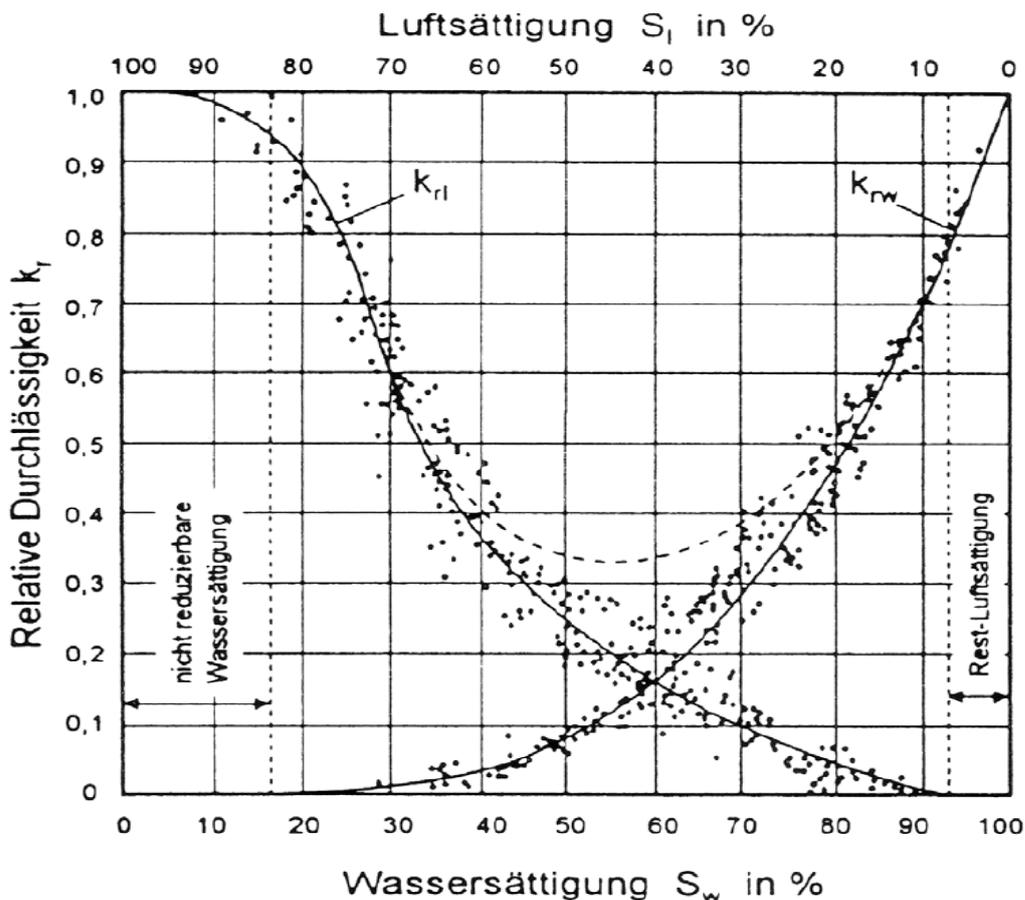


Abb. 12: Relative Durchlässigkeitsbeiwerte von Wasser und Luft (Wyckoff & Botset, 1936)

2.6 Wasserretentionskurve

Die Wasserretentionskurve (auch pF-Kurve genannt), stellt die Beziehung zwischen Bodenwassergehalt und Saugspannung dar. Der Bodenwassergehalt wird dabei als gravimetrischer Wassergehalt w , volumetrischer Wassergehalt θ , oder als Sättigungsgrad S_r dargestellt. Des Weiteren ist die Wasserretentionskurve eine bodenhydrologische Kennfunktion und spiegelt die Porengrößenverteilung wider. Somit kennzeichnet die Retentionskurve die Wasserspeichereigenschaften des Bodens. Die Form der Kurve wird wesentlich von der Bodenart, der Lagerungsdichte, dem Humusgehalt und der Bodenstruktur beeinflusst.

In der Bodenkunde beschreiben die Begriffe pF-Wert, Matrixpotential, Saugspannung, Wasserspannungswert und Tension dieselbe physikalische Größe. Sie beschreiben die Bindungsenergie, mit der Wassermoleküle kapillar in den Poren der Bodenteilchen gebunden sind. Das Potential ist hierbei als Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren, definiert. Umso höher das Matrixpotential ist, desto trockener ist der Boden, beziehungsweise desto geringer ist sein Wassergehalt (Scheffer, 2010).

Im Allgemeinen lässt sich die Wasserretentionskurve in 4 Phasen einteilen (siehe Abb. 13). Im gesättigten Zustand (Phase 1) ist der gesamte Porenraum mit Wasser gefüllt. Beim quasi gesättigten Zustand (Phase 2) ist das Porenwasser nicht vollständig entlüftet, so dass mit Luft gefüllte Hohlräume im Porenwasser existieren. Beim Übergang zwischen quasi gesättigten Zustand (Phase 2) und teilgesättigten Zustand (Phase 3) befindet sich der so genannte Lufteintrittspunkt. Ab diesem Punkt, tritt Luft in die Poren des Bodens ein und die Entwässerung des Bodens beginnt. Sind die Poren des Bodens sowohl mit Wasser, als auch mit Luft befüllt, so spricht man vom teilgesättigten Zustand (Phase 3). Beim residualen Zustand (Phase 4) befindet sich nur noch gebundenes oder schwer lösbares Wasser im Boden. Eine weitere Erhöhung der Saugspannung führt dabei zu keiner wesentlichen Reduktion des Wassergehaltes.

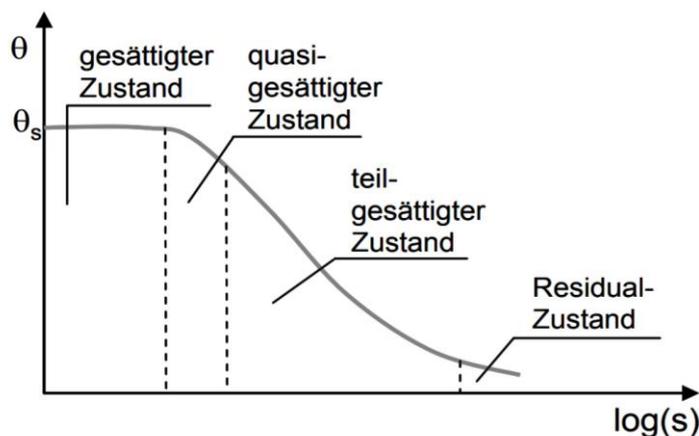


Abb. 13 Phasen der Wasserretentionskurve (Tarantino & Jommi, 2005)

Die Wasserretentionskurve weist bezüglich Aufsättigung und Austrocknung eine Hysterese auf (siehe Abb. 14). Das bedeutet, dass die Saugspannungen bei einem bestimmten Wassergehalt unterschiedlich groß sein können, je nachdem, ob sich der Boden in einer Aufsättigungsphase, oder in einer Austrocknungsphase befindet. Dabei begrenzen die Hauptaufsättigungskurve und die Hauptaustrocknungskurve den Bereich der möglichen Sättigungs- bzw. Saugspannungszustände. Im Allgemeinen sind die Saugspannungen im Boden bei gleichem Wassergehalt während der Aufsättigung geringer als während der Austrocknung. Des Weiteren wird der gesättigte Wassergehalt nach einer Austrocknung mit anschließender Wiederaufsättigung meist nicht mehr erreicht, da es zu Lufteinschlüssen in den Poren kommt. Ein natürlicher Boden befindet sich regelmäßig in einer Aufsättigungsphase gefolgt von einer Austrocknungsphase. Dieser Vorgang wird in Form der „Scanning“-Kurven veranschaulicht.

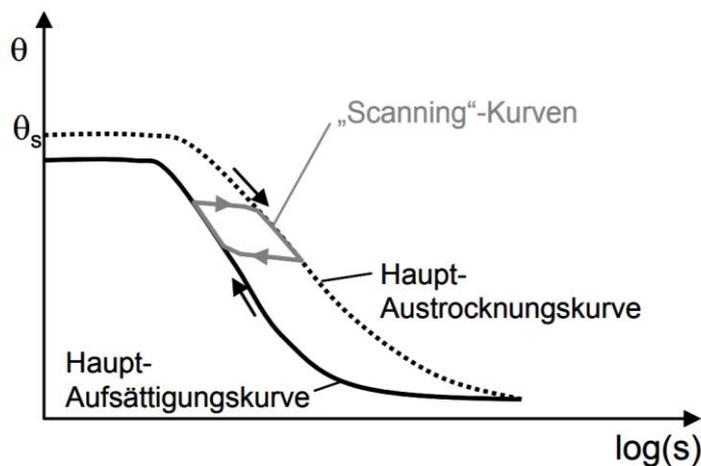


Abb. 14 Hysterese der Wasserretentionskurve (Tarantino & Jommi, 2005)

Die Wasserretentionskurve spiegelt die Porengrößenverteilung wider und ist daher auch von der Bodenart abhängig. In der folgenden Abbildung (Abb. 15) ist der typische Verlauf der Austrocknungskurven für verschiedene Böden dargestellt.

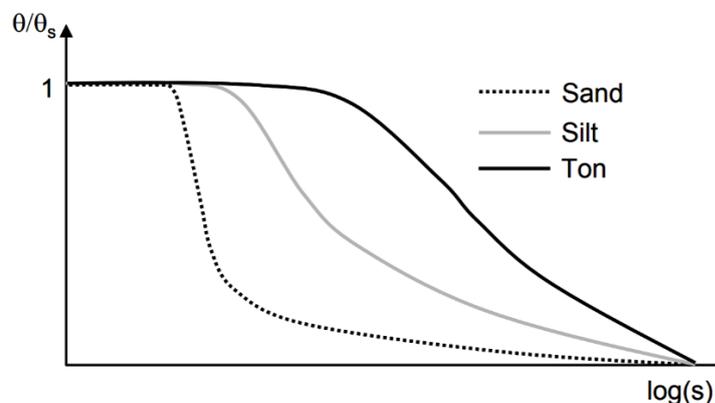


Abb. 15 Wasserretentionskurve für verschiedene Bodenarten (Vanapalli et al., 1999)

3 Untersuchte Böden

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik untersucht. Die dafür verwendeten Böden stammen aus einem Kieswerk in der Obersteiermark. Bei den bodenphysikalisch untersuchten Böden handelt es sich um einen schluffigen Sand (siehe Kapitel 3.2), einen tonigen, gering feinsandigen Schluff (siehe Kapitel 3.3) welcher im weiteren vereinfacht als toniger Schluff bezeichnet wird, und eine Mischung aus beiden Böden (siehe Kapitel 3.4).

3.1 Allgemeines

Die verwendeten Böden wurden laut ÖNORM EN ISO 14688-1:2013 und ÖNORM EN ISO 14688-2:2013 benannt, beschrieben und klassifiziert.

Den folgenden Anhängen können die Messprotokolle der bodenmechanischen Versuche entnommen werden:

- Anhang A:
Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß
ÖNORM EN ISO 17892-4:2017
- Anhang B:
Bestimmung der Korndichte gemäß
ÖNORM EN ISO 17892-3:2016
- Anhang C:
Ermittlung der Standard-Proctorkurve gemäß
ÖNORM EN 13286-2:2012
- Anhang D:
Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Triaxialzelle gemäß
ÖNORM B 4422-1:1992
- Anhang E:
Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Permeameter gemäß
ÖNORM L 1065:2006
- Anhang F:
Drucktopfversuch gemäß
ÖNORM L 1063:2006

3.2 Schluffiger Sand (si Sa)

Die Korngrößenverteilung (siehe Abb. 16) ergab einen Schluffanteil ($0,002 < d < 0,063$ mm) von 18,3 M-% und einen Sandanteil ($0,063 < d < 2$ mm) von 81,5 M-%. Das Größtkorn liegt bei 2 mm. Der wirksame Korndurchmesser d_{10} beträgt 0,05 mm. Die Form der Körnungslinie wird als enggestuft oder steil verlaufend beurteilt.

Bodenmechanisch wird die Bodenprobe als schluffiger Sand (si Sa) bezeichnet. Das Messprotokoll der Versuchsdurchführung kann dem Anhang A entnommen werden.

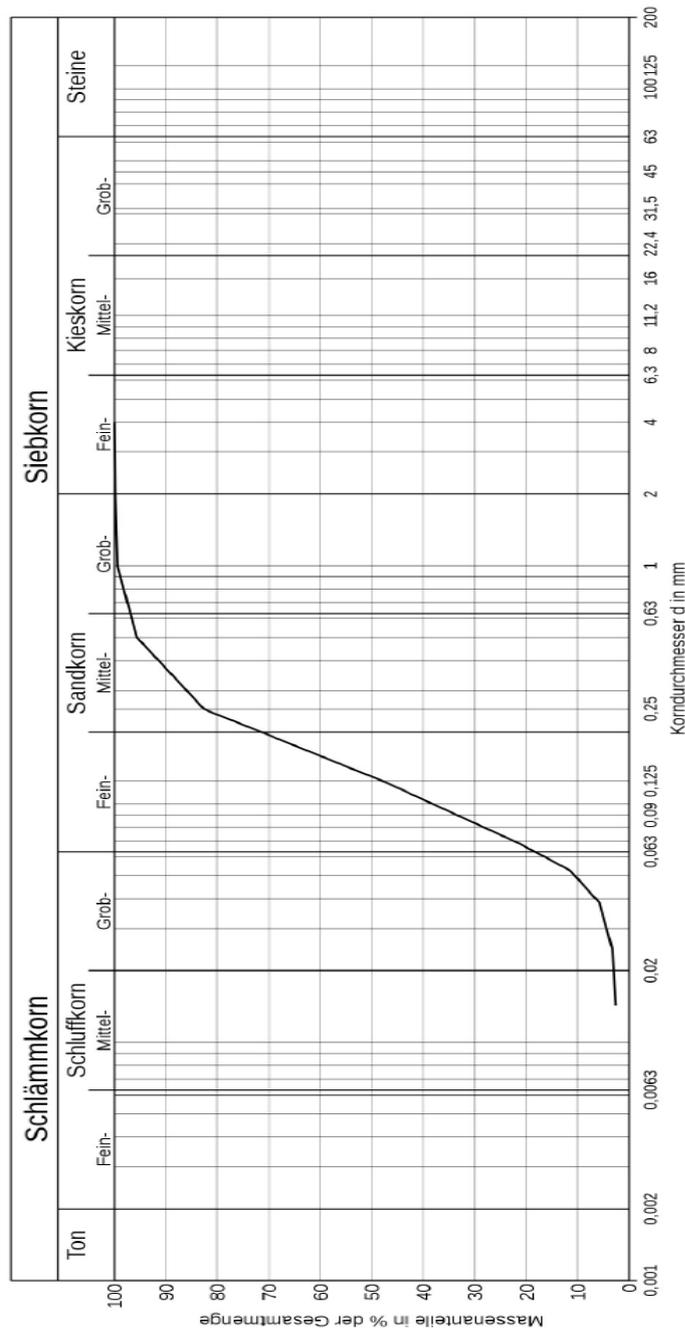


Abb. 16: Korngrößenverteilung schluffiger Sand (si Sa)

Das untersuchte Material weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$ auf (siehe Anhang B).

Bei einem optimalen Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100 \%$ wurde eine maximale Trockendichte $\max \rho_d$ (Proctordichte ρ_{Pr}) von $1,59 \text{ g/cm}^3$ erreicht (siehe Abb. 17). Der optimale Wassergehalt w_{opt} liegt bei $19,3 \%$ (siehe Abb. 17). Das Messprotokoll der Versuchsdurchführung kann dem Anhang C entnommen werden.

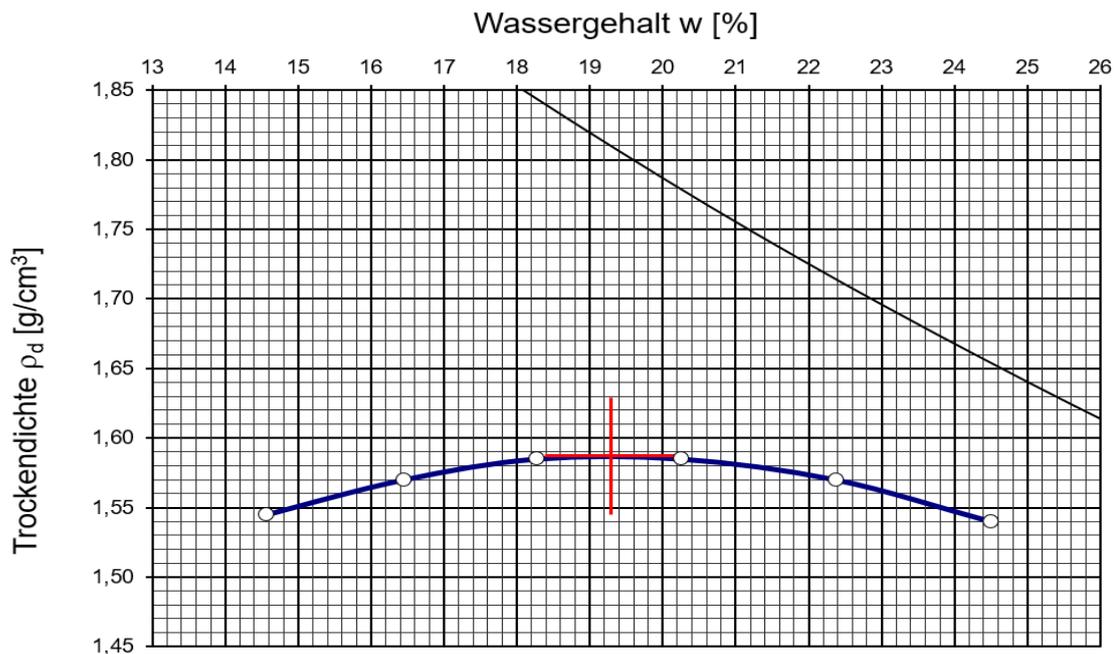


Abb. 17: Proctorkurve schluffiger Sand (si Sa)

Bei den Durchlässigkeitsbestimmungen mittels Triaxialzelle und Permeameter wurden die Bodenproben mit einer Trockendichte von $\rho_d = 1,40 \text{ g/m}^3$ und einem Wassergehalt von $w_{opt} = 19,3 \%$ eingebaut. Dies entspricht einem Verdichtungsgrad D_{Pr} von knapp 90% .

Nach zweiwöchigem Verbleib in der triaxialen Durchlässigkeitszelle bei einem Gradienten von $i = 8$ ergaben die Messungen einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (siehe Anhang D).

Nach fünftägiger Aufsättigung im Permeameter stellte sich bei der stationären Durchlässigkeitsbestimmung ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ein (siehe Anhang E).

Bei einer Druckstufe von 15 bar im Drucktopf und einer Trockendichte von $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ beträgt der Restwassergehalt des untersuchten Materials $w_r = 2,0 \text{ M-\%}$ oder $\theta_r = 2,6 \text{ Vol.-%}$ (siehe Anhang F).

3.3 Toniger Schluff (cl Si)

Die Korngrößenverteilung (siehe Abb. 18) ergab einen Tonanteil ($d < 0,002$ mm) von 15,1 %, einen Schluffanteil ($0,002 < d < 0,063$ mm) von 74,2 M-% und einen Feinsandanteil ($0,063 < d < 0,125$ mm) von 10,7 M-%. Das Größtkorn liegt bei 0,125 mm. Der wirksame Korndurchmesser d_{10} ist kleiner 0,002 mm. Die Form der Körnungslinie wird als weitgestuft oder flach verlaufend beurteilt.

Bodenmechanisch wird die Bodenprobe als toniger, gering feinsandiger Schluff (cl sa¹ Si) bezeichnet und im Weiteren vereinfacht toniger Schluff (cl Si) genannt. Das Messprotokoll der Versuchsdurchführung kann dem Anhang A entnommen werden.

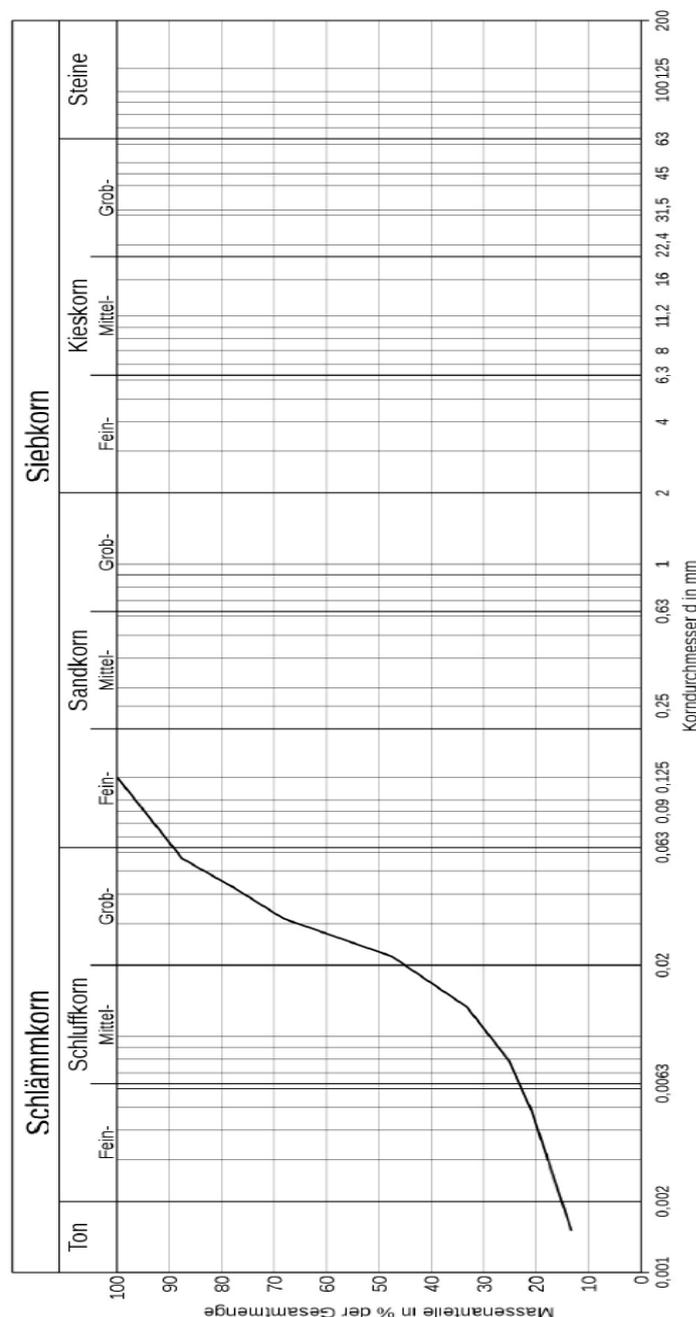


Abb. 18: Korngrößenverteilung toniger Schluff (cl Si)

Das untersuchte Material weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,77 \text{ g/cm}^3$ auf (siehe Anhang B).

Bei einem optimalen Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100 \%$ wurde eine maximale Trockendichte $\max \rho_d$ (Proctordichte ρ_{Pr}) von $1,90 \text{ g/cm}^3$ erreicht (siehe Abb. 19). Der optimale Wassergehalt w_{opt} liegt bei $14,3 \%$ (siehe Abb. 19). Das Messprotokoll der Versuchsdurchführung kann dem Anhang C entnommen werden.

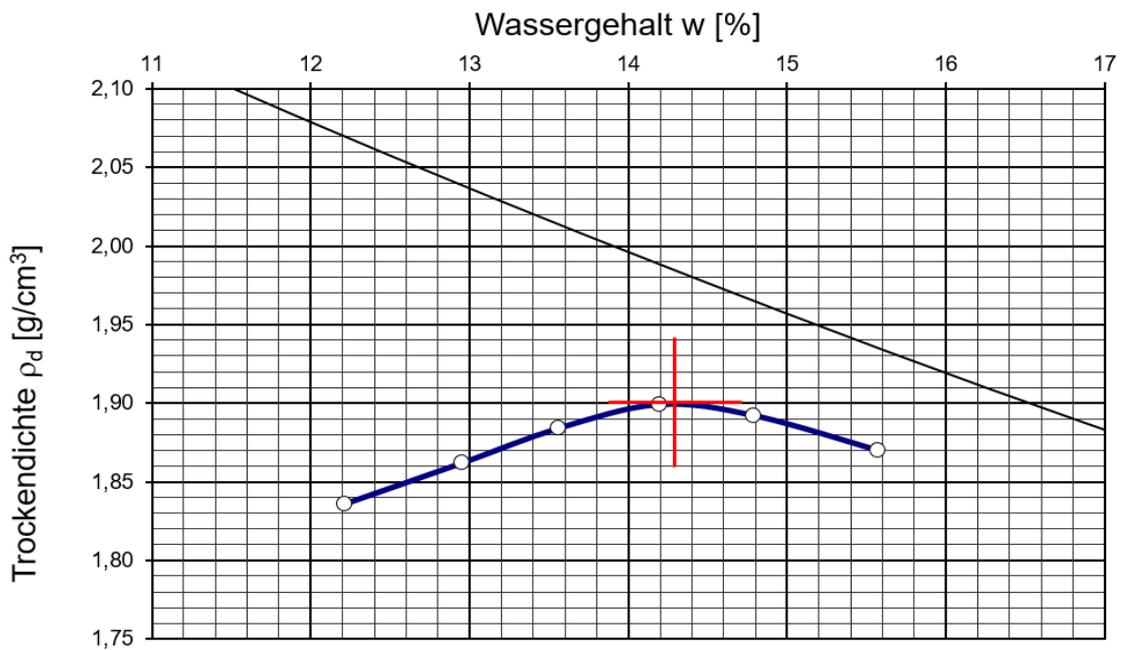


Abb. 19: Proctorkurve toniger Schluff (cl Si)

Bei den Durchlässigkeitsbestimmungen mittels Triaxialzelle und Permeameter wurden die Bodenproben mit einer Trockendichte von $\rho_d = 1,65 \text{ g/m}^3$ und einem Wassergehalt von $w_{opt} = 14,3 \%$ eingebaut. Dies entspricht einem Verdichtungsgrad D_{Pr} von knapp 90% .

Nach zweiwöchigem Verbleib in der triaxialen Durchlässigkeitszelle bei einem Gradienten von $i = 8$ ergaben die Messungen einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 2,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (siehe Anhang D).

Nachdem der Gradient auf $i = 30$ vergrößert wurde, stellte sich nach einer weiteren Woche in der triaxialen Durchlässigkeitszelle ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 3,2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ ein (siehe Anhang D).

Nach fünftägiger Aufsättigung im Permeameter stellte sich bei der stationären Durchlässigkeitsbestimmung ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 5,9 \cdot 10^{-7}$ m/s ein (siehe Anhang E).

Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der Bodenproben konnten instationäre Durchlässigkeitsbestimmungen durchgeführt werden, bis sich ein konstanter Wasserspiegel zwischen Bodenproben und Permeameter einstellte. Dabei ergaben die Messungen einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 5,7 \cdot 10^{-7}$ m/s (siehe Anhang E).

Bei einer Druckstufe von 15 bar im Drucktopf und einer Trockendichte von $\rho_d = 1,65$ g/cm³ beträgt der Restwassergehalt des untersuchten Materials $w_r = 9,9$ M-% oder $\theta_r = 16,2$ Vol.-% (siehe Anhang F).

3.4 Toniger Schluff-Sand (cl Si-Sa)

Der tonige Schluff-Sand ist ein Gemisch aus dem schluffigen Sand (siehe Kapitel 3.2) und dem tonigen Schluff (siehe Kapitel 3.3). Beide Böden wurden mit je 50 M-% vermischt.

Die Korngrößenverteilung des Gemisches wurde nicht bestimmt, da sie sich rechnerisch ermitteln lässt und eine Kombination aus den beiden Böden darstellt. Somit ergibt sich ein Tonanteil ($d < 0,002$ mm) von 7,6 %, ein Schluffanteil ($0,002 < d < 0,063$ mm) von 46,3 M-% und ein Sandanteil ($0,063 < d < 2$ mm) von 46,1 M-%. Das Größtkorn liegt bei 2 mm. Die Form der Körnungslinie wird als weitgestuft oder flach verlaufend beurteilt.

Bodenmechanisch wird die Bodenprobe als toniger Schluff-Sand (cl Si-Sa) bezeichnet.

Das Messprotokoll der Versuchsdurchführung kann dem Anhang A entnommen werden.

Das untersuchte Material weist eine Korndichte von $\rho_s = 2,78$ g/cm³ auf (siehe Anhang B).

Bei einer Druckstufe von 15 bar im Drucktopf und einer Trockendichte von $\rho_d = 1,66$ g/cm³ beträgt der Restwassergehalt des untersuchten Materials $w_r = 6,8$ M-% oder $\theta_r = 11,2$ Vol.-% (siehe Anhang F).

Bei einem optimalen Verdichtungsgrad von $D_{Pr} = 100\%$ wurde eine maximale Trockendichte $\max \rho_d$ (Proctordichte ρ_{Pr}) von $1,88 \text{ g/cm}^3$ erreicht (siehe Abb. 20). Der optimale Wassergehalt w_{opt} liegt bei $13,3\%$ (siehe Abb. 20). Das Messprotokoll der Versuchsdurchführung kann dem Anhang C entnommen werden.

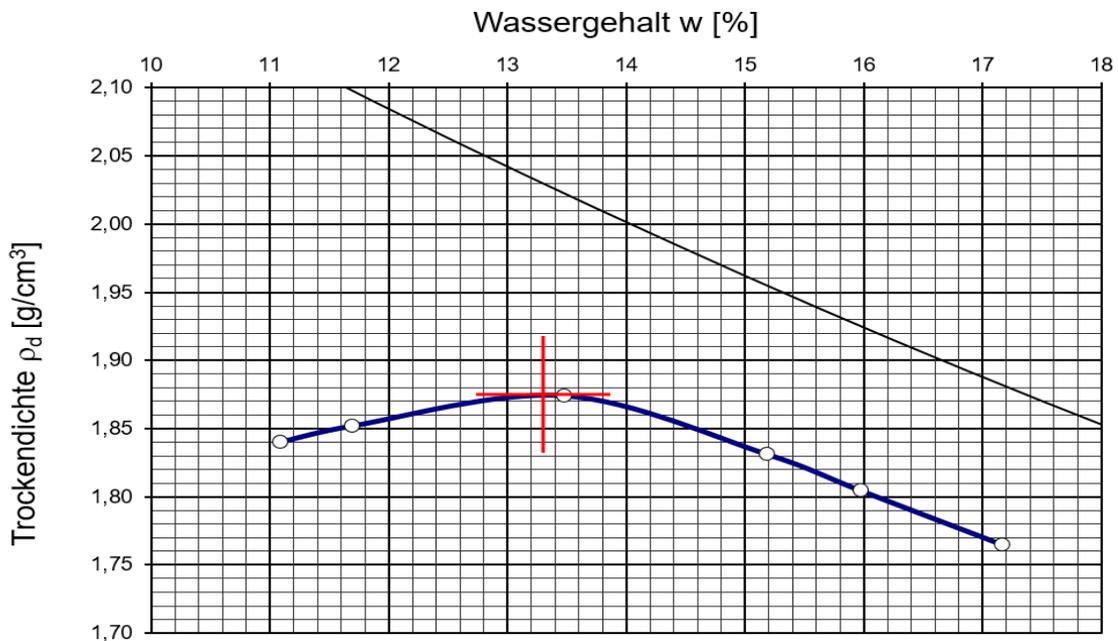


Abb. 20: Proctorkurve toniger Schluff-Sand (cl Si-Sa)

Bei den Durchlässigkeitsbestimmungen mittels Triaxialzelle und Permeameter wurden die Bodenproben mit einer Trockendichte von $\rho_d = 1,65 \text{ g/m}^3$ und einem Wassergehalt von $w_{opt} = 13,3\%$ eingebaut. Dies entspricht einem Verdichtungsgrad D_{Pr} von knapp 90% .

Nach zweiwöchigem Verbleib in der triaxialen Durchlässigkeitszelle bei einem Gradienten von $i = 8$ ergaben die Messungen einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 6,3 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ (siehe Anhang D).

Nachdem der Gradient auf $i = 30$ vergrößert wurde, stellte sich nach einer weiteren Woche in der triaxialen Durchlässigkeitszelle ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ein (siehe Anhang D).

Nach fünftägiger Aufsättigung im Permeameter stellte sich bei der stationären Durchlässigkeitsbestimmung ein Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ ein (siehe Anhang E).

Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der Bodenproben konnten instationäre Durchlässigkeitsbestimmungen durchgeführt werden, bis sich ein konstanter Wasserspiegel zwischen Bodenproben und Permeameter einstellte. Dabei ergaben die Messungen einen Durchlässigkeitsbeiwert von $k = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ (siehe Anhang E).

4 Bodenphysikalische Versuche

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik anhand des HYPROP[®]-Versuches untersucht. Für die Durchführung und Auswertung des Versuches werden jedoch Kenngrößen von den untersuchten Bodenproben benötigt. Diese wurden anhand folgender bodenmechanischer Versuche bestimmt:

- Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß
ÖNORM EN ISO 17892-4:2017
- Bestimmung der Korndichte gemäß
ÖNORM EN ISO 17892-3:2016
- Ermittlung der Standard-Proctorkurve gemäß
ÖNORM EN 13286-2:2012
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Triaxialzelle gemäß
ÖNORM B 4422-1:1992
- Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Permeameter gemäß
ÖNORM L 1065:2006
- Drucktopfversuch gemäß
ÖNORM L 1063:2006

4.1 Bestimmung der Korngrößenverteilung (EN ISO 17892-4:2017)

Die Korngrößenverteilung einer Bodenprobe ermöglicht die Beschreibung einer Bodenart anhand der Massenanteile ihrer Körnungsgruppen. Viele geotechnische und geohydraulische Eigenschaften von Böden sind von deren Korngröße abhängig. Somit ist die Korngrößenverteilung eine der wichtigsten physikalischen Kenngrößen eines Bodens. Der Versuchsablauf ist in der ÖNORM EN ISO 17892-4:2017 beschrieben.

Anhand der Siebung wird die Korngrößenverteilung grobkörniger Böden bestimmt. Bei feinkörnigen Böden wird das Prinzip der Sedimentation angewandt. In der unten angeführten Abbildung (Abb. 21) ist ersichtlich, bei welchen Böden die Korngrößenverteilung mittels Siebung (A), Sedimentation (B), oder mittels Siebung und Sedimentation (C) durchgeführt wird. In der Korngrößenverteilung werden die Massenanteile des Siebdurchganges (Korngrößen kleiner der Maschenweite des Siebes) bezogen auf die Gesamtmasse dargestellt. Dabei bedeutet ein steil verlaufender Bereich in der Körnungslinie das Vorherrschen einer Korngruppe, während ein horizontal verlaufender Bereich auf das Fehlen einer Korngruppe hindeutet. Körner mit einem Masseanteil von 10 %, 30% und 60% werden mit d_{10} , d_{30} und d_{60} bezeichnet.

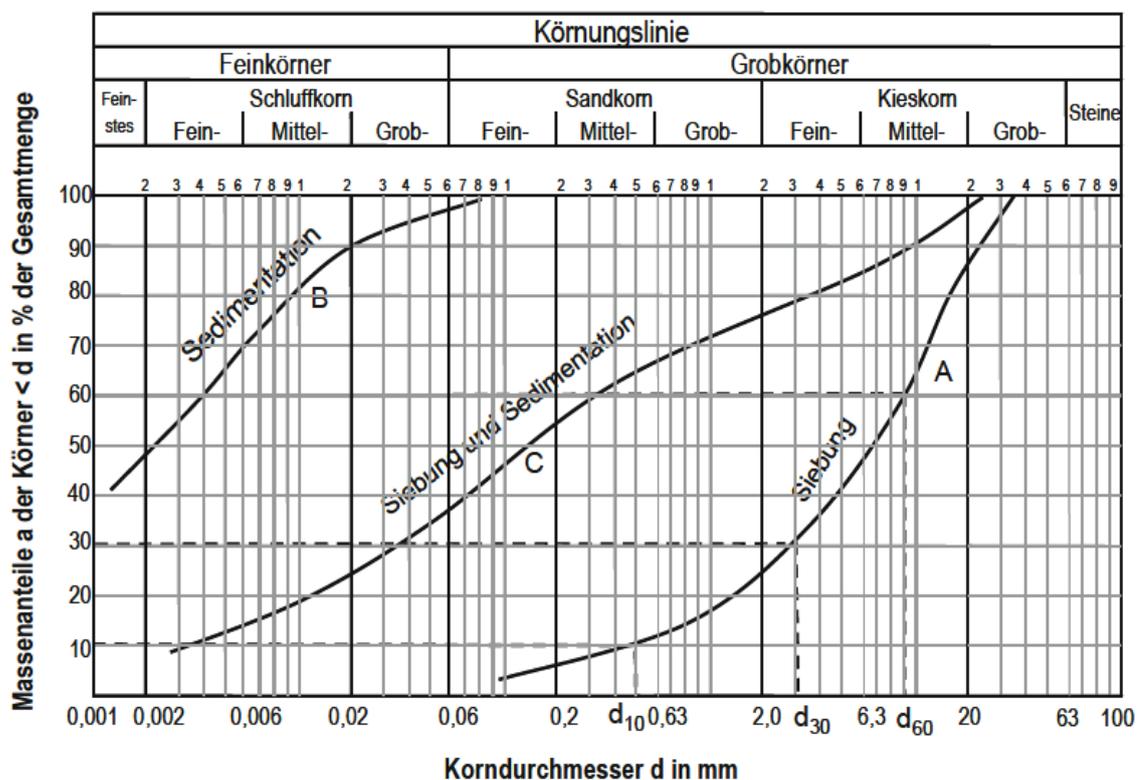


Abb. 21: Korngrößenverteilung (Boley, 2012)

4.1.1 Nasssiebung

Bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung der Bodenproben wurde eine Kombination aus Siebung und Sedimentation angewandt. Die Siebanalyse erfolgte bei Böden mit einer Korngröße von 0,0063 mm bis 63 mm. Bei Korngrößen kleiner 0,0063 mm erfolgte die Bestimmung der Korngrößenverteilung anhand der Schlämmanalyse.

Vor Beginn der Siebung wurden die Bodenproben in den Trockenschrank gegeben und bei ca 60°C bis zur Massenkonsistenz getrocknet. Nachdem die Bodenproben abgekühlt waren, wurden sie auf 0,1 % ihrer Masse gewogen und mit Wasser zu einer Schlämme vermennt. Anschließend erfolgte die Nasssiebung. Dabei wurde die Aufschlämmlung unter Zugabe von Wasser durch ein Feinsieb mit einer Maschenweite von 0,0063 mm gewaschen. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis die abgegossene Flüssigkeit keine Trübung mehr aufwies. Abschließend wurde der Siebdurchgang (Feinkorn = kleiner 0,0063 mm) und der Siebrückstand (Grobkorn = größer 0,0063 mm) getrocknet und gewogen.

4.1.2 Korngrößenverteilung durch Siebung

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung (Siebanalyse) wurde ein Siebturm verwendet. Nachdem die Bodenproben sorgfältig gesiebt wurden, wurden die Siebrückstände in eine Auffangschale gegeben und die Massen der Rückstände auf den einzelnen Sieben ermittelt.

Damit die Massenanteile der Körner sehr genau bestimmt werden konnten und um Unstetigkeitsstellen in der Kornverteilungskurve zu vermeiden, wurde eine sehr feine Abstufung der Maschenweite der Siebe gewählt. Die Maschenweite der einzelnen Siebe betrug 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 und 0,063 mm.

Die Massenteile a_i der Korngruppe i (Korngrößen $< d$), bezogen auf die Gesamtmasse m_d , werden anhand folgender Gleichung bestimmt: (Boley, 2012)

$$a_i = \frac{\Delta m_i}{m_d} \cdot 100 \quad (22)$$

a_i	[%]	Massenanteile der Korngrößen $< d$
Δm_i	[g]	Trockenmasse der Korngruppe i
m_d	[g]	gesamte Trockenmasse der Bodenprobe

4.1.3 Korngrößenverteilung durch Sedimentation

Bei sehr feinkörnigen Böden bestimmt man die Korngrößenverteilung anhand der Sedimentation (Schlamm-analyse). Dabei kommt das Gesetz von Stokes zur Anwendung, welches besagt, dass ein Zusammenhang zwischen Korngröße, Dichte und Sinkgeschwindigkeit besteht und daher unterschiedlich große Körner im stehenden Wasser mit unterschiedlicher Geschwindigkeit absinken. Mit Hilfe eines Aräometers wird die Absinkgeschwindigkeit bestimmt, anschließend kann die Korngrößenverteilung errechnet werden.

Die erforderlichen Ausgangsmassen der Bodenproben wurden bei der Nasssiebung auf Korngrößen kleiner 0,063 mm gesiebt, getrocknet und gewogen (siehe Kapitel 4.1.1 Nasssiebung). Anschließend wurden die Bodenproben für die Versuchsdurchführung vorbereitet. Dafür wurden ca. 25 g der Bodenproben in einen Zylinder gegeben und mit einem Dispergierungsmittel (Natriumpyrophosphat, etwa 20 g/l, in Wasser gelöst) vermischt. Dannach wurde die Suspension mit Hilfe eines mechanischen Rüttelgerätes so lange durchmischt, bis eine vollständige Dispergierung erreicht wurde.

Vor Beginn der Versuchsführung wurden die Kennwerte des Aräometers anhand einer Referenzlösung ermittelt. Anschließend wurde das Aräometer in die Suspension eingetaucht und die Eintauchtiefe nach vorgegeben Zeitintervallen (30 Sekunden; 1, 2, 5, 15 und 45 Minuten sowie 2, 6 und 24 Stunden) abgelesen (siehe Abb. 22).



Abb. 22: Aräometerablesung für die Schlamm-analyse

Der Masseanteil der Korngrößen $< d$ bezogen auf die Gesamtmasse der Bodenprobe wurde laut ÖNORM EN ISO 17892-4:2017 mittels folgender Gleichung bestimmt:

$$a_d = \frac{100}{m_d} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} \cdot (R + c_\vartheta) \quad (23)$$

a_d	[%]	Massenanteile der Korngrößen $< d$
m_d	[g]	gesamte Trockenmasse der Bodenprobe
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte der Bodenprobe
R	[g/cm ³]	Hilfswert der die Aräometerablesung und die Meniskuskorrektur berücksichtigt
c_ϑ	[g/cm ³]	Korrekturwert, der den Einfluss der Temperatur berücksichtigt

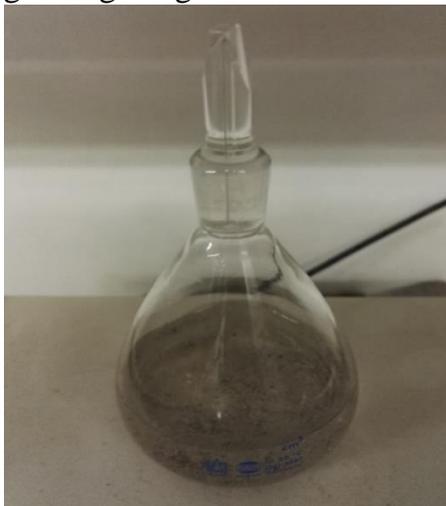
4.2 Bestimmung der Korndichte (EN ISO 17892-3:2016)

Die Korndichte ρ_s ist die Trockenmasse der Kornteilchen, bezogen auf ihr Volumen. Mit Hilfe eines Kapillarpyknometers wird das Volumen der Bodenteilchen V_K ermittelt, während die Trockenmasse der Bodenprobe m_d durch Wägung bestimmt wird. Das Kapillarpyknometerverfahren beruht auf der Bestimmung des Massenunterschiedes beim Füllen des Pyknometers bei enthaltener und nicht enthaltener Bodenprobe.

Der Versuchsablauf ist in der ÖNORM EN ISO 17892-3:2016 beschrieben.

4.2.1 Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wurden die Bodenproben mittels Mörser in einer Porzellschale verkleinert, um mögliche Lufteinschlüsse in den Körnern zu beseitigen. Anschließend wurden die Böden laut ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 ofengetrocknet. In der Zwischenzeit wurden die Massen der leeren Kapillarpyknometer einschließlich derer Glasstopfen (Verschlüsse) auf 0,01 g genau gewogen. Da das Volumen der verwendeten Pyknometer bereits aus Referenzmessungen bekannt war, musste es nicht mit Hilfe einer Kontrollflüssigkeit bestimmt werden. Nachdem die Bodenproben im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühlt waren, wurden diese in die Kapillarpyknometer gegeben und auf 0,01 g genau gewogen. Danach wurden die Bodenproben mit einer Kontrollflüssigkeit



(destilliertes Wasser) 2 cm überdeckt (siehe Abb. 23). Anschließend wurden die gefüllten Pyknometer in ein Vakuumgerät gegeben, um eingeschlossene Luft aus den Bodenproben zu entfernen. Nachdem die Proben vollständig entlüftet wurden, wurden die Pyknometer vollständig mit der Kontrollflüssigkeit befüllt, mittels Glasstopfen verschlossen und auf 0,01 g genau gewogen. Unmittelbar nach der Wägung wurde die Temperatur der Kontrollflüssigkeit bestimmt um die Dichte der Kontrollflüssigkeit zu ermitteln.

Abb. 23: Kapillarpyknometer mit Bodenprobe und Kontrollflüssigkeit

4.2.2 Auswertung der Korndichte

Die Korndichte der Bodenproben wurde laut ÖNORM EN ISO 17892-3:2015 bestimmt. Die für die Auswertung benötigten Massen wurden bei der Versuchsdurchführung bestimmt, das Volumen der Kornteilchen wurde mit Hilfe der Dichte der Kontrollflüssigkeit errechnet. Der Versuchsablauf wurde bei jeder Bodenprobe drei Mal durchgeführt wobei die Abweichung der Korndichten im Toleranzbereich von 0,03 g/cm³ lagen.

$$\rho_s = \frac{m_4}{(m_1 - m_0) - (m_3 - m_2)} \cdot \rho_L \quad (24)$$

ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte der Bodenprobe
m_0	[g]	Masse des trockenen Pyknometers
m_1	[g]	Masse des Pyknometers gefüllt mit der Kontrollflüssigkeit
m_2	[g]	Masse des Pyknometers mit der trockenen Bodenprobe
m_3	[g]	Masse des Pyknometers mit der Bodenprobe und gefüllt mit der Kontrollflüssigkeit
m_4	[g]	Trockenmasse der Versuchsprobe
ρ_L	[g/cm ³]	Dichte der Kontrollflüssigkeit bei Prüftemperatur

Die für die Auswertung benötigten Dichten von entlüftetem und destilliertem Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen stammen von der ÖNORM EN ISO 17892-3:2015 (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Dichte von destilliertem Wasser bei unterschiedlichen Temperaturen

Temperatur T °C	Dichte ρ_w Mg/m ³	Temperatur T °C	Dichte ρ_w Mg/m ³
10	0,999 73	21	0,998 02
11	0,999 63	22	0,997 80
12	0,999 53	23	0,997 57
13	0,999 41	24	0,997 33
14	0,999 27	25	0,997 08
15	0,999 13	26	0,996 81
16	0,998 97	27	0,996 54
17	0,998 80	28	0,996 26
18	0,998 62	29	0,995 98
19	0,998 42	30	0,995 68
20	0,998 23		

4.3 Ermittlung der Standard-Proctorkurve (ÖNORM EN 13286-2:2012)

Anhand des Proctorversuches kann die Proctordichte einer Bodenprobe bestimmt werden. Die Proctordichte ist die höchste unter definierter Verdichtungsarbeit erreichbare Dichte, die ein Boden bei optimalem Wassergehalt einnehmen kann. Der Versuchsablauf ist in der ÖNORM EN 13286-2:2012 beschrieben.

4.3.1 Versuchsdurchführung

Zur Bestimmung der Proctordichte wurde ein Standard-Proctorversuch laut ÖNORM EN 13286-2:2012 durchgeführt. Das für den Standard-Proctorversuch zulässige Größtkorn von 16 mm wurde von keiner der untersuchten Böden überschritten (siehe Kapitel 3). Bei der Versuchsdurchführung wurde ein Proctortopf (Typ A) mit einem Durchmesser von 100 mm und einer Höhe von 120 mm verwendet. Die Verdichtung der Böden erfolgte mittels Proctorhammer (Typ A) mit einer Masse von 2,5 kg und einer Fallhöhe von 305 mm. Bei jedem Versuch wurden die Böden in 3 Schichten eingebaut und mit 25 Schlägen je Schicht verdichtet. Anschließend wurde das überstehende Gemisch sorgfältig abgezogen und der Proctortopf samt Bodenprobe gewogen.

Die Bestimmung des Wassergehaltes der Bodenproben erfolgte laut ÖNORM EN ISO 17892-1:2014. Dafür wurde die feuchte Bodenprobe in eine trockene Schüssel mit bekannter Masse gegeben und gewogen. Anschließend wurde die Schüssel inklusive der Bodenprobe in einen Trocknungsofen gestellt und bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massenkonsistenz getrocknet (Trocknungszeit > 16 h). Danach wurde die Schüssel samt Bodenprobe in einen Exsikkator gestellt, auf Raumtemperatur abgekühlt und gewogen. Die Gewichts Differenz ist die Masse des Wassers, welche dem Boden entzogen wurde.

Für die Auswertung der Proctorkurve (Verdichtungskurve) werden mindestens fünf Messpunkte benötigt. Daher wurde der Wassergehalt der Bodenproben um ein bis zwei Masseprozent erhöht und der Versuchsablauf solange wiederholt, bis genügend Messpunkte ermittelt wurden.

4.3.2 Auswertung Proctorversuch

Bei der Auswertung des Proctorversuches wurden für jeden Einzelversuch der Wassergehalt der Bodenprobe nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 und die dazugehörige Trockendichte nach ÖNORM EN ISO 17892-2:2014 bestimmt und in ein Koordinatensystem eingetragen. Die Abszissenachse stellt den Wassergehalt dar, während die Ordinatenachse die Trockendichte abbildet. Dabei ergibt sich eine Kurve, die zunächst ansteigt, ein Maximum erreicht und anschließend wieder abfällt (Dachprofil). Beim Abfallen der Kurve nähert sie sich asymptotisch der Sättigungslinie $S_r = 1,0$ an.

Das Maximum der Kurve bildet die Proctordichte ρ_{Pr} (maximale Trockendichte $\max \rho_d$) der Bodenprobe mit dem dazugehörigen optimalen Wassergehalt w_{opt} (siehe Abb. 24). Bei $w < w_{opt}$ spricht man von der trockenen Seite der Proctorkurve. Aufgrund des hohen Reibungswiderstandes zwischen den Körnern infolge der kapillaren Saugspannung konnte das Gemisch keine maximale Verdichtung erreichen. Bei $w > w_{opt}$ spricht man von der nassen Seite der Proctorkurve. Auch in diesem Bereich konnte keine maximale Verdichtung des Gemisches erreicht werden, da das Porenwasser bei feinkörnigen Böden in der kurzen Versuchszeit nicht vollständig ausgepresst wurde.

In der unten dargestellten Abbildung ist ersichtlich, dass sich mit größerer Verdichtungsarbeit A , die maximale Trockendichte $\max \rho_d$ erhöht und der optimale Wassergehalt abnimmt. Da die Proctordichte ρ_{Pr} die maximale Trockendichte $\max \rho_d$ bei einer vorgegebenen Verdichtungsarbeit A darstellt, sind auch Verdichtungsgrade größer 100 % möglich, sofern die Verdichtungsarbeit erhöht wird.

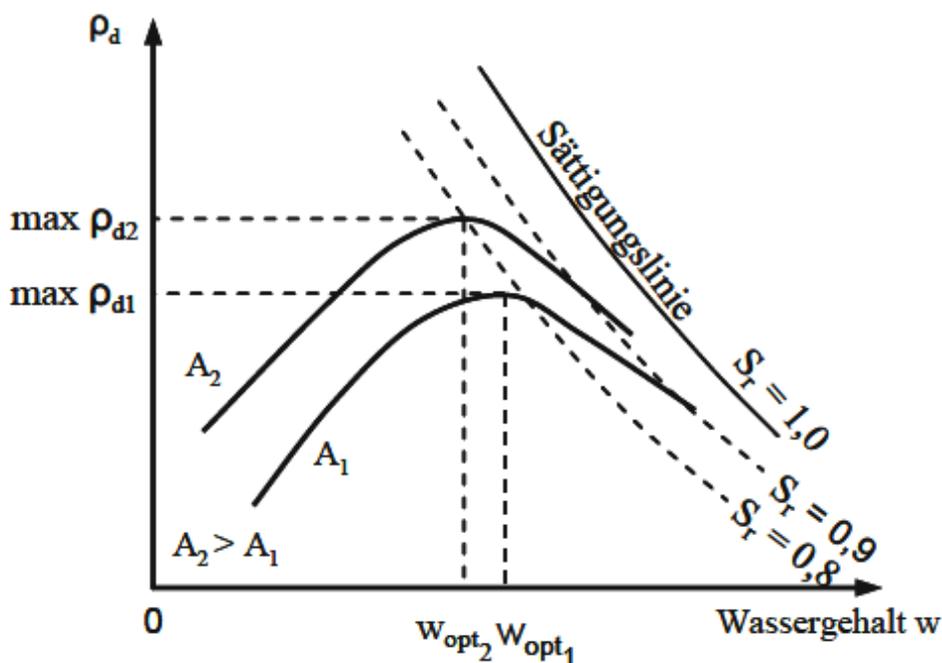


Abb. 24: Proctorkurve für feinkörnige Böden

Aus jedem Einzelversuch wurde der Wassergehalt w der Bodenprobe bestimmt. Er ist das Verhältnis der Masse des freien Wassers bezogen zur Masse der trockenen Bodenbestandteile und errechnet sich laut ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 wie folgt:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_c} \cdot 100 = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \quad (25)$$

w	[Mass-%]	Gravimetrischer Wassergehalt der Bodenprobe
m_1	[g]	Masse des Behälters und der feuchten Bodenprobe
m_2	[g]	Masse des Behälters und der getrockneten Bodenprobe
m_c	[g]	Masse des Behälters
m_w	[g]	Masse des Wassers
m_d	[g]	Masse der getrockneten Bodenprobe

Die Feuchtdichte ρ (Bodendichte oder auch Raumdichte genannt) ist definiert als Masse m der Feuchten Probe bezogen auf das Volumen V der Probe einschließlich der mit Flüssigkeit und Gas gefüllten Poren. Sie wurde für jeden verdichteten Probekörper laut ÖNORM EN 13286-2:2012 mittels folgender Gleichung errechnet:

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} = \frac{m}{V} \quad (26)$$

ρ	[g/cm ³]	Feuchtdichte der Bodenprobe
m_1	[g]	Masse des Proctortopfes und der Grundplatte
m_2	[g]	Masse des Proctortopfes, der Grundplatte und der Probe
m	[g]	Masse der feuchten Bodenprobe
V	[cm ³]	Volumen des Proctortopfes

Die Trockendichte ρ_d ist definiert als Masse des ofengetrockneten Bodens je Volumeneinheit des Materials. Sie wurde für jeden verdichteten Probekörper laut ÖNORM EN ISO 17892-2:2014 mittels folgender Gleichung errechnet:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + w} \quad (27)$$

ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte der Bodenprobe
ρ	[g/cm ³]	Feuchtdichte der Bodenprobe
w	[Mass-%]	Gravimetrischer Wassergehalt der Bodenprobe

4.4 Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle (ÖNORM B 4422-1:1992)

Bei der Wasserdurchlässigkeitsbestimmung anhand eines Triaxialgerätes wird die zu untersuchende Bodenprobe in eine Triaxialzelle eingebaut und bei konstantem hydraulischem Druck von unten nach oben durchströmt. Dabei wird die Durchflussmenge über einen bestimmten Zeitraum gemessen. Mit Hilfe des Filtergesetzes nach Darcy kann der Durchlässigkeitskoeffizient k errechnet werden.

Damit die Bodenprobe aufgrund eines hohen Durchströmungsdruckes bruchsicher bleibt, wird ein Zelldruck in der Triaxialzelle angelegt, welcher größer ist als der Durchströmungsdruck. Des Weiteren wird die Bodenprobe von einer Gummihülle umschlossen, sowie unten und oben mit je einem Filterstein begrenzt.

Der Versuchsablauf ist in der ÖNORM B 4422-1:192 geregelt.

Das Funktionsprinzip ist in der folgenden Abbildung (Abb. 25) dargestellt.

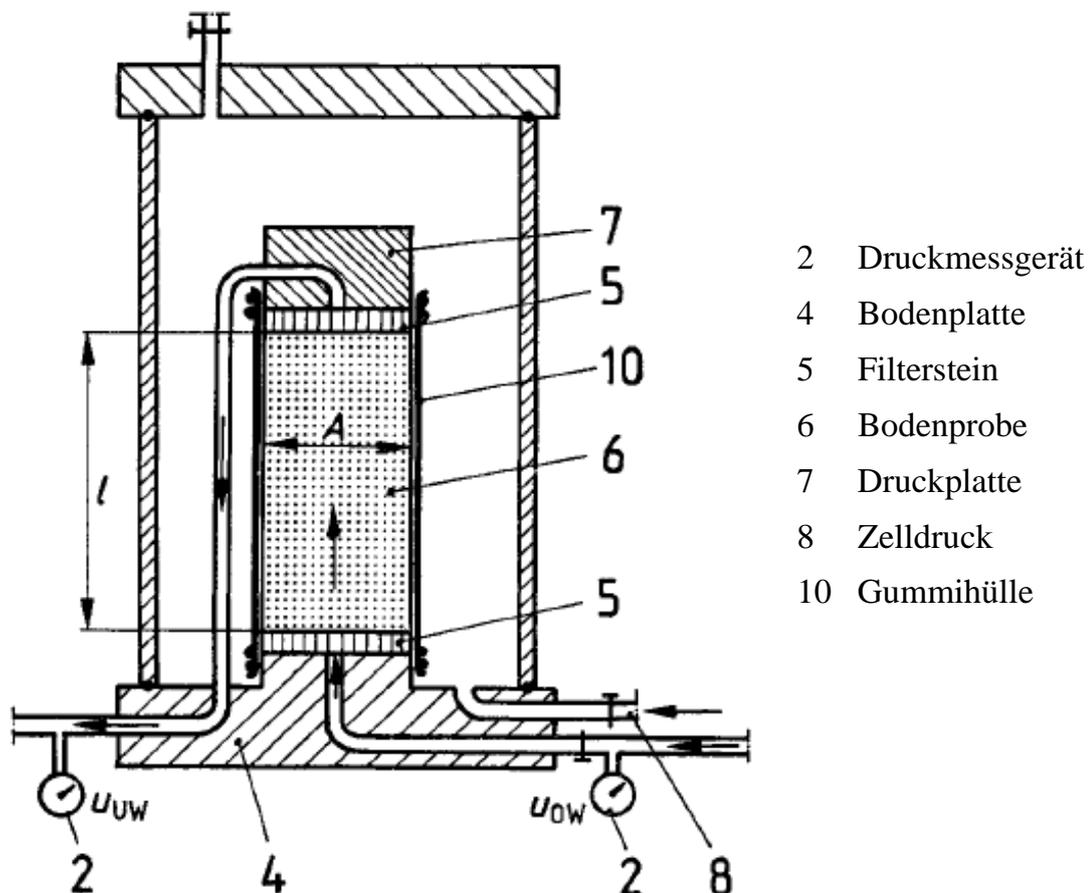


Abb. 25: Funktionsprinzip Triaxialzelle (ÖNORM B 4422-1:1992)

4.4.1 Versuchsdurchführung

Bevor mit der Versuchsdurchführung zur Wasserdurchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle begonnen werden konnte, mussten die Bodenproben hergestellt werden. Diese wurden mit einer Proktordichte $D_{Pr} = 90 \%$ und dem optimalen Wassergehalt w_{opt} (siehe Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4) mit Hilfe einer hydraulischen Presse hergestellt. Die Höhe der homogenen Bodenproben betrug 12 cm, der Durchmesser 10 cm.

Nach der Herstellung der Bodenproben wurden diese oben und unten mit einem Filterstein begrenzt und mit einer Gummihülle umschlossen. Anschließend wurden die Bodenproben in die Triaxialzellen eingebaut, mit Wasser befüllt und an den Wasserkreislauf angeschlossen. Um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten und ein Versagen der Bodenproben zu vermeiden, wurden der Zeldruck und der Durchströmungsdruck langsam auf das gewünschte Druckniveau erhöht. Aufgrund der Gummihülle konnte das Wasser bei der Durchlässigkeitsbestimmung nur durch die Bodenprobe strömen, die Filtersteine verhinderten ein Ausschwemmen der Kornteilchen. Nach einem zweiwöchigen Verbleib in der triaxialen Durchlässigkeitszelle waren die Bodenproben annähernd vollständig gesättigt, so dass mit der Wasserdurchlässigkeitsmessung gestartet werden konnte.

Bei der Wasserdurchlässigkeitsmessung wurde der Durchfluss durch die Bodenproben über einen bestimmten Zeitraum gemessen. Vor Beginn der Messung wurde das Gewicht der Messbehälter ermittelt. Indem man das Ventil der Unterwasserleitung öffnete, konnte das Wasser, welches die Bodenprobe durchströmte, in die Messbehälter fließen. Mit einer Stoppuhr wurde die Zeit gemessen, bis das Ventil der Unterwasserleitung wieder geschlossen wurde. Anschließend wurden die Messbehälter erneut gewogen. Die Gewichts Differenz der Messbehälter entspricht der Masse des Wassers, welches durch die Bodenproben hindurchgeflossen ist. Da die Zähigkeit des Wassers von der Wassertemperatur abhängig ist, wurde diese ebenfalls während des Versuchs gemessen.

Anhand des Filtergesetzes von Darcy wurde nach der Durchlässigkeitsmessung der Durchlässigkeitsbeiwert k errechnet. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde der k -Wert auf eine Vergleichstemperatur von 10°C umgerechnet. Die Durchlässigkeitsmessungen wurden so lange wiederholt, bis die letzten 5 ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte keine größeren Abweichungen vom Mittelwert als $\pm 5 \%$ aufwiesen.

4.4.2 Auswertung der Wasserdurchlässigkeit

Der Durchlässigkeitsbeiwert k wurde anhand des Filtergesetzes nach Darcy errechnet (siehe Kapitel 2.2.1). Das Darcy Gesetz besagt, dass der Durchfluss Q über eine Querschnittsfläche A eines porösen Mediums proportional dem hydraulischen Gradienten i ist.

$$v = k \cdot i \quad (28)$$

v	[m/s]	Fließgeschwindigkeit
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
i	[-]	hydraulischer Gradient

Die Fließgeschwindigkeit v ergibt sich aus der Durchflussmenge V_W bezogen auf eine Querschnittsfläche A über eine bestimmte Zeitdauer t . Der hydraulische Gradient i ist das Verhältnis zwischen hydraulischem Höhenunterschied Δh und der durchströmten Länge l . Somit errechnet sich der Durchlässigkeitsbeiwert k zu:

$$k_T = \frac{V_W \cdot l}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (29)$$

k_T	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchstemperatur
V_W	[m ³]	Durchflussmenge
l	[m]	durchströmte Länge
A	[m ²]	Querschnittsfläche
t	[t]	Durchflussdauer
Δh	[m]	hydraulischer Höhenunterschied

Da der Durchlässigkeitsbeiwert k von der Temperatur des Wassers abhängt, wurde er zur besseren Vergleichbarkeit auf eine Temperatur von 10 °C umgerechnet. Der Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C (k_{10}) errechnet sich wie folgt:

$$k_{10} = k_T \cdot \frac{\vartheta_T}{\vartheta_{10}} \quad (30)$$

k_{10}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei einer Temperatur von 10 °C
k_T	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchstemperatur
ϑ_T	[m ² /s]	kinematische Viskosität von Wasser bei Versuchstemperatur
ϑ_{10}	[m ² /s]	kinematische Viskosität von Wasser bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C

4.5 Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter (ÖNORM L 1065:2006)

Die Wasserdurchlässigkeitsbestimmung wurde mit einem Permeameter der Firma Eijkelkamp durchgeführt. Der Versuchsablauf ist in der ÖNORM L 1065:2006, sowie in der Gebrauchsanweisung der Firma Eijkelkamp (Eijkelkamp, 2017) geregelt.

Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Bodenproben können zwei Messmethoden angewandt werden:

- Messung mit einem konstanten Druckhöhenunterschied (stationär)
- Messung mit einem abnehmenden Druckhöhenunterschied (instationär)

Bei der stationären Messung wird mit Hilfe eines Saughebers eine konstante Druckhöhendifferenz zwischen Wasserstand im Kunststoffbehälter und dem Ringhalter (Wasserstand über der Bodenprobe) erzeugt. Der dadurch entstehende Wasserdurchfluss durch die Bodenprobe wird gemessen.

Bei der instationären Messung wird nicht der Wasserdurchfluss gemessen, sondern die Änderung des Wasserhöhenunterschiedes in einem bestimmten Zeitintervall.

Das Funktionsprinzip des Permeameters ist in der folgenden Abbildung (Abb. 26) dargestellt.

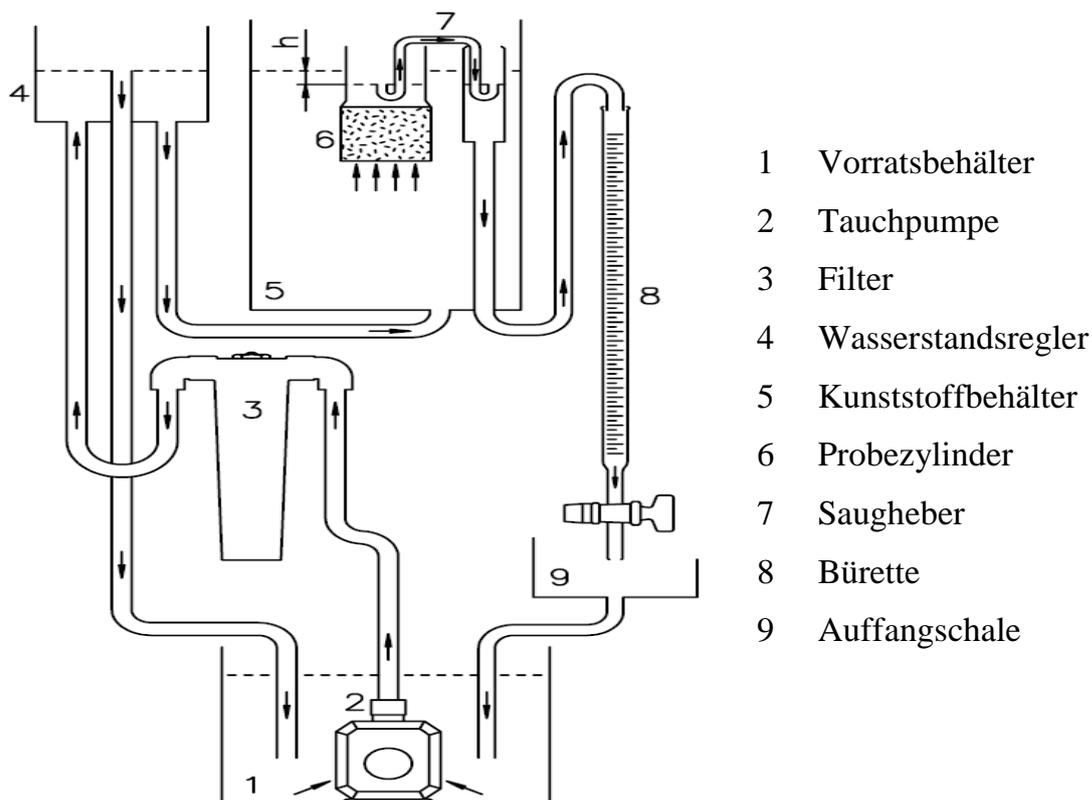


Abb. 26: Funktionsprinzip Permeameter (Eijkelkamp, 2017)

4.5.1 Vorbereitung

Bei der Wasserdurchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter wurden die zu untersuchenden Bodenproben mit Hilfe einer hydraulischen Presse in einen Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 5 cm gepresst (siehe Kapitel 5.1 Herstellung der Bodenproben). Damit während der Durchlässigkeitsbestimmung keine Feinanteile aus den Bodenproben geschwemmt werden konnten, wurde ein Filtertuch mit Hilfe eines O-Ring an den Proben befestigt. Anschließend wurden die Stechzylinder in die Ringhalter des Permeameters geschraubt. Der Ringhalter dient als Befestigung der Bodenproben im Permeameter und stellt die Abgrenzung zwischen dem Wasserspiegel im Kunststoffbehälter und dem Wasserspiegel im Ringhalter dar. Nachdem alle Bodenproben im Permeameter gestellt worden sind, wurde der Kunststoffbehälter mit Wasser bis zu Probenunterkante gefüllt. Damit es zu keinen Lufteinschlüssen in den Bodenproben während der Sättigung kam, wurde der Wasserspiegel im Permeameter sehr langsam erhöht, so dass sich die Poren aufgrund der Kapillarwirkung zur Gänze mit Wasser füllen konnten. Nachdem sich ein konstanter Wasserstand zwischen dem Kunststoffbehälter und dem Ringhalter eingestellt hat (siehe Abb. 27), konnte mit der Wasserdurchlässigkeitsbestimmung begonnen werden.



Abb. 27: Bodenproben im mit Wasser gefüllten Permeameter

4.5.2 Versuchsdurchführung

4.5.2.1 Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung

Die Wasserdurchlässigkeitsbestimmung mit konstantem Höhenunterschied (Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung) kann bei den meisten Böden angewandt werden. Ausgenommen sind sehr wenig durchlässige Böden wie zum Beispiel Ton und Moor.

Vor der Versuchsdurchführung wurde sichergestellt, dass die Bodenproben im Permeameter vollständig gesättigt waren und der Wasserspiegel im Ringhalter genauso hoch war wie im Kunststoffbehälter. Danach wurde mit Hilfe der Saugheber eine konstante Druckhöhendifferenz (ca. 10 mm) zwischen dem Wasserstand im Kunststoffbehälter und dem Wasserstand der Ringhalter erzeugt. Dadurch strömte das Wasser durch die Bodenproben und über die Saugheber zu den jeweiligen Büretten der Bodenproben. Nachdem alle Saugheber angebracht waren wurde die Durchflussmenge der Bodenproben bestimmt. Dafür wurden die Ventile der Büretten verschlossen und die Wassermenge in bestimmten Zeitabschnitten gemessen. Dieser Vorgang wurde so lange wiederholt, bis sich ein konstanter (stationärer) Durchfluss einstellte. Anschließend wurden mit der Messbrücke des Permeameters der Wasserstand im Kunststoffbehälter und der Wasserstand in den Ringhaltern der Bodenproben ermittelt. Die Differenz der beiden Wasserstände bildet die Druckhöhendifferenz. Anhand des Filtergesetzes nach Darcy wurde der Durchlässigkeitskoeffizient k errechnet.

Der stationäre Versuchsablauf ist in Abbildung (Abb. 28) dargestellt.



Abb. 28: Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

4.5.2.2 Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung

Die Wasserdurchlässigkeitsbestimmung mit abnehmendem Höhenunterschied (Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung) eignet sich für Bodenproben mit niedrigen Durchlässigkeiten.

Wie bei der stationären Durchlässigkeitsbestimmung wurde vor der Versuchsdurchführung sichergestellt, dass die Bodenproben im Permeameter vollständig gesättigt waren und der Wasserspiegel im Ringhalter genauso hoch war wie im Kunststoffbehälter. Danach wurde mit Hilfe einer Pipette der Wasserstand im Ringhalter gesenkt. Anders wie bei der stationären Durchlässigkeitsbestimmung wurde nicht die Durchflussmenge durch die Bodenproben gemessen, sondern die Änderung des Wasserhöhenunterschiedes im Ringhalter in einem bestimmten Zeitintervall. Nachdem der Wasserspiegel im Ringhalter zunahm, verringerte sich die Druckhöhendifferenz und somit auch der hydraulische Gradient. Dies führte zu einer Abnahme der Fließgeschwindigkeit (instationäre Strömung) durch die Bodenproben. Um Messungenauigkeiten aufgrund von Verdunstung zu vermeiden wurde während des Versuchsablaufes der Kunststoffbehälter mit einer Klappe verschlossen. Der Wasserspiegel im Ringhalter wurde zu Versuchsbeginn und zu Versuchsende mit Hilfe der Messbrücke bestimmt. Ebenso wurden der Wasserspiegel im Kunststoffbehälter, sowie die Wassertemperatur während des Versuchsablaufes bestimmt. Die Differenz des Wasserspiegels im Ringhalter und im Kunststoffbehälter bildet den Druckhöhenunterschied. Der Durchlässigkeitskoeffizient k lässt sich mit einer angepassten Form des Darcyschen Gesetzes errechnen. Dabei wird die Änderung des Wasserhöhenunterschiedes ∂h in einem bestimmten Zeitintervall ∂t berücksichtigt.

4.5.3 Auswertung der Wasserdurchlässigkeit

Der Durchlässigkeitsbeiwert k wurde wie bei der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle (siehe Kapitel 4.4.2) anhand des Filtergesetzes nach Darcy errechnet. Das Darcy Gesetz besagt, dass der Durchfluss Q über eine Querschnittsfläche A eines porösen Mediums proportional dem hydraulischen Gradienten i ist (siehe Gleichung (28)).

Da der Durchlässigkeitsbeiwert k von der Temperatur des Wassers abhängt, wurde er auf eine Temperatur von 10 °C umgerechnet. (siehe Gleichung (30))

- **Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung**

Die Fließgeschwindigkeit v ergibt sich aus der Durchflussmenge V_W bezogen auf eine Querschnittsfläche A über eine bestimmte Zeitdauer t . Der hydraulische Gradient i ist das Verhältnis zwischen hydraulischem Höhenunterschied Δh und der durchströmten Länge l . Somit errechnet sich der Durchlässigkeitsbeiwert k zu:

$$k_T = \frac{V_W \cdot l}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (31)$$

k_T	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchstemperatur
V_W	[m ³]	Durchflussmenge
l	[m]	durchströmte Länge
A	[m ²]	Querschnittsfläche
t	[s]	Durchflussdauer
Δh	[m]	hydraulischer Höhenunterschied

- **Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung**

Der Durchlässigkeitskoeffizient k lässt sich bei der instationären Messmethode mit dem Filtergesetz nach Darcy berechnen. Da sich jedoch die Steighöhe als auch der Durchfluss mit der Zeit ändern, wird eine angepasste Form des Darcyschen Gesetzes angewendet. Dabei wird die Änderung des Wasserhöhenunterschiedes ∂h in einem bestimmten Zeitintervall ∂t berücksichtigt. Somit errechnet sich der Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchstemperatur zu:

$$k_T = \frac{a \cdot l}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{x \cdot a \cdot l}{A \cdot \sqrt{h_1 \cdot h_2}} \quad (32)$$

k_T	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei Versuchstemperatur
l	[m]	Länge der Bodenprobe
a	[m ²]	Querschnittsfläche des Ringhalters
A	[m ²]	Querschnittsfläche der Bodenprobe
Δt	[s]	Zeitintervall zwischen Anfang und Ende der Messung
h_1	[m]	Wasserhöhenunterschied zwischen Kunststoffbehälter und Ringhalter zu Beginn der Messung
h_2	[m]	Wasserhöhenunterschied zwischen Kunststoffbehälter und Ringhalter am Ende der Messung
x	[m/s]	Verdunstungsfaktor laut Bedienungsanleitung (Eijkelkamp, 2017)

4.6 Drucktopfversuch (ÖNORM L 1063:2006)

Anhand des Drucktopfversuches kann die Saugspannung (Matrixpotential) einer Bodenprobe bei einer bestimmten Druckstufe ermittelt werden. Der Versuchsablauf ist in der ÖNORM L 1063:2006 geregelt.

Durch das Erhöhen des Luftdruckes im Drucktopf wird der Wassergehalt der feuchten Bodenproben reduziert. Dabei wird das in den Poren enthaltene Wasser herausgepresst. Eine poröse mit Wasser gefüllte Keramikplatte dient als hydraulische Verbindung, über die das Wasser vom Boden in den Außenbereich des Drucktopfs gelangen kann. Bei einem Durchgang strömt die Bodenfeuchtigkeit bei jedem eingestellten Druck um alle Bodenpartikel und durch die Keramikplatte über das Ausflussrohr hinaus. Die Drucktopfmethode eignet sich zur Bestimmung des Matrixpotentials im Bereich von 0,1 bis 15 bar Saugspannung. Je kleiner die Porengrößen der Bodenproben sind, desto größer ist das Wasserrückhaltevermögen. Der Wasserstrom aus dem Ausflussrohr versiegt, sobald sich ein Potentialgleichgewicht zwischen Saugspannung der Bodenproben (Matrixpotential) und dem Luftdruck im Drucktopf (Gravitationspotential) einstellt. Somit kann der Feuchtegehalt der Proben für verschiedene Druckbereiche bestimmt werden.

Das Drucktopfsystem ist in der folgenden Abbildung (Abb. 29) dargestellt.



Abb. 29: Drucktopfsystem

4.6.1 Probenherstellung

Die Bodenproben für den Drucktopfversuch wurden mit Hilfe einer hydraulischen Presse in Kunststoffzylinder mit einem Durchmesser von 53 mm und einer Höhe von 10 mm gepresst. Dabei wurden die untersuchten Böden (siehe Kapitel 3) mit einer Proktordichte von knapp 90 % und dem optimalen Wassergehalt w_{opt} (siehe Kapitel 3.2, 3.3 und 3.4) hergestellt (siehe Abb. 30).



Abb. 30: Bodenproben Drucktopfversuch
links schluffiger Sand (si Sa); rechts toniger Schluff (cl Si)

4.6.2 Versuchsdurchführung

Vor Versuchsbeginn wurden die Bodenproben mit Wasser gesättigt. Dafür wurden die Bodenproben in eine Sättigungsschale gegeben, welche langsam und stufenweise mit Wasser befüllt wurde. Nach zwei bis drei Tagen waren die Bodenproben vollständig gesättigt, so dass sich an der Oberseite der Proben ein dünner Wasserfilm bildete. Auch die Keramikplatten wurden nach diesem Prinzip mit entlüftetem, entionisiertem Wasser gesättigt.

Nachdem die Bodenproben und die Keramikplatten vollständig gesättigt waren, wurden die Proben mit einem Filterpapier auf den Keramikplatten positioniert und in den Drucktopf gestellt (siehe Abb. 31). Das Filterpapier hielt dabei die Böden in den Zylindern und sorgte für einen direkten Kontakt der Bodenproben zu den Keramikplatten.



Abb. 31: Bodenproben im Drucktopf

Anschließend wurde der Drucktopf verschlossen und die gewünschte Druckstufe (15 bar) eingestellt. Aufgrund des hohen Luftdrucks im Drucktopf wurde das Wasser aus den Hohlräumen der Bodenproben gedrückt, bis sich ein Potentialgleichgewicht zwischen Saugspannung der Bodenproben (Matrixpotential) und dem Luftdruck im Drucktopf (Gravitationspotential) einstellte. Nachdem innerhalb von 48 Stunden kein Wasser mehr aus dem Ausflussrohr des Drucktopfes kam, konnte der Versuch beendet werden.

Für die Ermittlung des Wasserrückhaltevermögens (Saugspannung) bei der verwendeten Druckstufe musste der Wassergehalt der Bodenproben bestimmt werden. Die Bestimmung des Wassergehaltes erfolgte laut ÖNORM EN ISO 17892-1:2014. Dafür wurden die feuchten Bodenproben gewogen und anschließend im Trocknungsofen bei 105 °C bis zur Massenkonsistenz getrocknet. Danach wurden sie im Exsikkator abgekühlt und erneut gewogen. Nachdem die Böden von den Keramikzylindern entfernt wurden, wurden diese gesäubert und auch gewogen.

Der Wassergehalt der Bodenproben errechnet sich aus der Differenz der Feuchtmasse (Masse der Bodenprobe bei verwendeter Druckstufe) und der Trockenmasse.

4.6.3 Auswertung Drucktopfversuch

Die Berechnung des Wassergehaltes von Bodenproben bei einer bestimmten Druckstufe erfolgt laut ÖNORM L 1063:2006.

Da es während der Versuchsdurchführung nur zu sehr geringen Temperaturschwankungen (± 2 °C) kam, wurden die Änderungen der Dichte des Wassers vernachlässigt. Die Masse des von den Böden zurückgehaltenem Wasser errechnet sich aus der Differenz der Feuchtmasse bei der verwendeten Druckstufe $m_{(\psi_m)}$ und der Trockenmasse m_d der Bodenprobe.

Der Wassergehalt wurde in Volumenprozent $\theta_{(\psi_m)}$ und in Masseprozent $w_{(\psi_m)}$ bestimmt und errechnet sich wie folgt:

$$\theta_{(\psi_m)} = \frac{m_{(\psi_m)} - m_d}{\rho_W \cdot V} \cdot 100 \quad (33)$$

$\theta_{(\psi_m)}$ [M-%]	Wassergehalt in Volumsprozent
$m_{(\psi_m)}$ [g]	Feuchtmasse der Bodenprobe bei verwendeter Druckstufe
m_d [g]	Trockenmasse der Bodenprobe
ρ_W [g/cm ³]	Dichte des Wassers bei Versuchstemperatur ($\rho_W = 1$ g/cm ³)
V [cm ³]	Volumen der Bodenprobe

$$w_{(\psi_m)} = \frac{m_{(\psi_m)} - m_d}{\rho_W \cdot m_d} \cdot 100 \quad (34)$$

$w_{(\psi_m)}$ [Vol.-%]	Wassergehalt in Masseprozent
$m_{(\psi_m)}$ [g]	Feuchtmasse der Bodenprobe bei verwendeter Druckstufe
m_d [g]	Trockenmasse der Bodenprobe
ρ_W [g/cm ³]	Dichte des Wassers bei Versuchstemperatur ($\rho_W = 1$ g/cm ³)

5 HYPROP[®]-Versuch (UMS 2015)

Die Verdunstungsmethode basiert auf den Grundlagen von Schindler und dient zur Bestimmung der Wasserretentionsfunktion und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion der Wasserspannung oder des Wassergehaltes von Bodenproben (Schindler, 2010). Die Durchführung der Verdunstungsmethode erfolgt mittels Geräten der Firma UMS (UMS, 2015), dem HYPROP[®]-System (siehe Abb. 32).

Mit Hilfe der Verdunstungsmethode wird die Saugspannung der Bodenprobe von zwei Tensiometern (Drucksensoren) in unterschiedlichen Ebenen über einen bestimmten Zeitraum gemessen. Durch die Verdunstung des Wassers verringert sich das Gewicht der Bodenprobe, welches mittels einer Waage bestimmt wird. Anhand der Gewichtsreduktion der Bodenprobe kann der aktuelle Wassergehalt errechnet werden. Die Leitfähigkeit der Bodenprobe hängt davon ab, wie gut der Boden das Wasser zum Verdunsten nach oben leiten kann. Bei schlechter Leitfähigkeit trocknet der Boden oben aus, während er unten noch nass ist. Somit misst der oben liegende trockene Tensiometer höhere Saugspannungen, als der weiter unten liegende, der noch nass ist. Bei guter Leitfähigkeit verdunstet das Wasser der Bodenprobe gleichmäßiger, womit die Saugspannungen an beiden Tensiometerspitzen fast gleich groß sind.

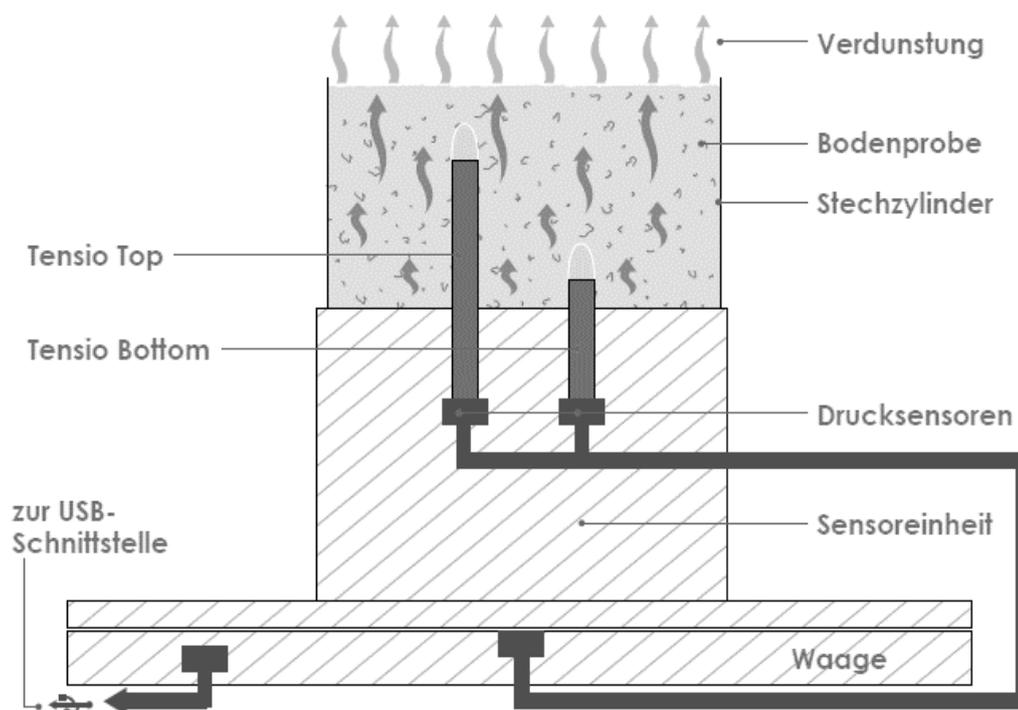


Abb. 32 Funktionsprinzip HYPROP[®]-System (UMS, 2015)

5.1 Herstellung der Bodenproben

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik anhand des HYPROP®-Versuches untersucht. Als Ausgangsmaterialien wurden ein schluffiger Sand (siehe Kapitel 3.2) und ein toniger Schluff (siehe Kapitel 3.3) verwendet. Mit Hilfe einer hydraulischen Presse (siehe Abb. 33) wurden die Böden in einen Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 5 cm gepresst (siehe Abb. 34). Insgesamt wurden fünf Versuchsdurchgänge mit unterschiedlichen Bodenproben durchgeführt. Pro Versuchsdurchgang wurden je drei baugleiche Proben hergestellt, um Versuchsausreißer ausschließen zu können. Die Bodenproben wurden mit einer Proktordichte von knapp 90 % und dem optimalen Wassergehalt w_{opt} hergestellt.



Abb. 33: Hydraulische Presse



Abb. 34: Bodenproben für den HYPROP®-Versuch
links schluffiger Sand (si Sa); rechts toniger Schluff (cl Si)

5.1.1 Bodenprobe Sa

Die Bodenprobe Sa homogen wurde aus dem schluffigen Sand (siehe Kapitel 3.2) hergestellt. Für den HYPROP[®]-Versuch wurden je drei Bodenproben erstellt. Diese wurden homogen mit einer Trockendichte ρ_d von 1,40 g/m³ und einem Wassergehalt w von 19,3 % in die Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 5 cm eingepresst.

5.1.2 Bodenprobe Si

Die Bodenprobe Sa homogen wurde aus dem tonigen Schluff (siehe Kapitel 3.3) hergestellt. Für den HYPROP[®]-Versuch wurden je drei Bodenproben erstellt. Diese wurden homogen mit einer Trockendichte ρ_d von 1,65 g/m³ und einem Wassergehalt w von 14,3 % in die Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 5 cm eingepresst.

5.1.3 Bodenprobe Sa/Si

Die Bodenprobe Sa/Si wurde aus dem schluffigen Sand (siehe Kapitel 3.2) und dem tonigen Schluff (siehe Kapitel 3.3) hergestellt. Für den HYPROP[®]-Versuch wurden je drei Bodenproben erstellt. Diese wurden in zwei Schichten mit je 2,5 cm Höhe in die Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm eingepresst. Die untere Schicht wurde mit dem tonigen Schluff, die obere Schicht mit dem schluffigen Sand eingebaut. Um die geschichteten und die homogenen Bodenproben miteinander vergleichen zu können, wurden diese mit der gleichen Einbaudichte und dem gleichen Wassergehalt eingepresst. Somit ergab sich für die gesamte Bodenprobe Sa/Si eine Trockendichte ρ_d von 1,50 g/m³ und ein Wassergehalt w von 16,8 %.

5.1.4 Bodenprobe Si/Sa

Die Bodenprobe Si/Sa wurde aus dem schluffigen Sand (siehe Kapitel 3.2) und dem tonigen Schluff (siehe Kapitel 3.3) hergestellt. Für den HYPROP[®]-Versuch wurden je drei Bodenproben erstellt. Diese wurden in zwei Schichten mit je 2,5 cm Höhe in die Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm eingepresst. Die untere Schicht wurde mit dem schluffigen Sand, die obere Schicht mit dem tonigen Schluff eingebaut. Um die geschichteten und die homogenen Bodenproben miteinander vergleichen zu können, wurden diese mit der gleichen Einbaudichte und dem gleichen Wassergehalt eingepresst. Somit ergab sich für die gesamte Bodenprobe Sa/Si eine Trockendichte ρ_d von 1,50 g/m³ und ein Wassergehalt w von 16,8 %.

5.1.5 Bodenprobe Sa&Si

Die Bodenprobe Sa&Si wurde aus dem schluffigen Sand (siehe Kapitel 3.2) und dem tonigen Schluff (siehe Kapitel 3.3) hergestellt. Für den HYPROP[®]-Versuch wurden je drei Bodenproben aus einem Gemisch der beiden Böden erstellt. Beide Böden wurden mit je 50 M-% vermischt. Der daraus entstandene tonige Schluff-Sand (siehe Kapitel 3.4) wurden homogen mit einer Trockendichte ρ_d von 1,65 g/m³ und einem Wassergehalt w von 13,3 % in die Stechzylinder mit einem Durchmesser von 8 cm und einer Höhe von 5 cm eingepresst.

5.2 Versuchsdurchführung HYPROP[®]-Versuch

Die Versuchsdurchführung der Verdunstungsmethode mittels HYPROP[®]-System wurde laut der Bedienungsanleitung der Firma UMS (2015) durchgeführt.

Dabei besteht die Vorgehensweise aus folgenden Schritten:

- Aufsättigung der Bodenproben
- Entlüften des Messsystems
- Montage der Proben auf dem Messsystem
- Start der HYPROP[®] Messkampagne
- Bestimmung des Trockenmasse der Bodenproben
- Auswertung der Messergebnisse mittels HYPROP-FIT[®]

5.2.1 Aufsättigung der Bodenproben

Vor Versuchsbeginn der Verdunstungsmethode, wurden die Bodenproben vollständig gesättigt. Bei vollgesättigten Bodenproben entspricht der Anfangswassergehalt einer Saugspannung von 0 kPa. Die Sättigung der Bodenproben erfolgte im Permeameter (siehe Kapitel 4.5). Damit während der Durchlässigkeitsbestimmung keine Feinanteile aus den Bodenproben geschwemmt werden konnten, wurde ein Filtertuch mit Hilfe eines O-Ringes an den Proben befestigt. Die Aufsättigung erfolgte laut ÖNORM L 1065:2006. Durch regelmäßige Wasserzugabe wurden die Poren der Bodenproben von unten nach oben, zufolge der Kapillarität, mit Wasser gefüllt, bis sich ein Wasserfilm auf den Bodenproben bildete.

5.2.2 Entlüften des Messsystems

Um einen reibungslosen Versuchsablauf zu gewährleisten, wurden die für das Messsystem notwendigen Tensiometer und Druckmessköpfe vollständig entlüftet. Die Tensiometer übertragen die Bodenwasserspannungen über ihre poröse Keramikspitze auf die Druckaufnehmer (Manometer) der Messköpfe. Damit die Übertragung der Saugspannungen schnell und zuverlässig erfolgen kann, müssen die Tensiometer möglichst blasenfrei mit entionisiertem und entgastem Wasser befüllt sein.

Die Befüllung der Tensiometer erfolgte mit Hilfe einer Vakuumpumpe durch das Aufbringen eines Unterdruckes. Hierbei wurden die porösen Keramikspitzen der Tensiometer in einen Behälter mit entionisiertem und entgastem Wasser gegeben und mittels mehreren Silikonschläuchen über eine Tröpfchenfängerflasche an die Vakuumpumpe angeschlossen. Auch die Druckmessköpfe wurden mit entionisiertem und entgastem Wasser befüllt und mittels Silikonschläuchen an die Vakuumpumpe angeschlossen. Nachdem das Messsystem an die Vakuumpumpe angeschlossen war, wurde diese für mindestens 24 Stunden in Betrieb genommen, bis sich die Tensiometer vollständig mit entionisiertem Wasser befüllt hatten.

Nachdem die Entlüftung des Messsystems abgeschlossen war, konnten die Tensiometer in die Druckmessköpfe eingeschraubt werden (siehe Abb. 35). Da die Drucksensoren der Druckmessköpfe sehr empfindlich sind, wurde der Vorgang mittels der Refilling-Wizard® Software von der Fima UMS überwacht. Anschließend wurde die Funktionskontrolle des Befüllungszustandes der Tensiometer durchgeführt. Zu Beginn der Funktionskontrolle waren die Keramikspitzen der Tensiometer vollständig gesättigt so dass kein Wasser aus den Tensiometern entzogen wurde (Nullpotential). Anschließend wurden die Keramikspitzen mit einem Taschentuch getrocknet. Das Taschentuch saugte das Wasser aus den Keramikspitzen und aus dem Schaft des Tensiometers. Der dadurch entstehende Unterdruck glich den Saugspannungen der Bodenproben. Die Tensiometer waren alle gut mit entgastem Wasser gefüllt, weshalb die Saugspannungen innerhalb von 15 Sekunden nahe dem atmosphärischen Luftdruck (ca. 850 hPa) stiegen. Nachdem die Funktionskontrolle der Tensiometer abgeschlossen war, wurden die Keramikspitzen der Tensiometer befeuchtet und mit einer Schutzkappe versehen, so dass mit der Montage der Bodenproben auf dem Messsystem begonnen werden konnte.

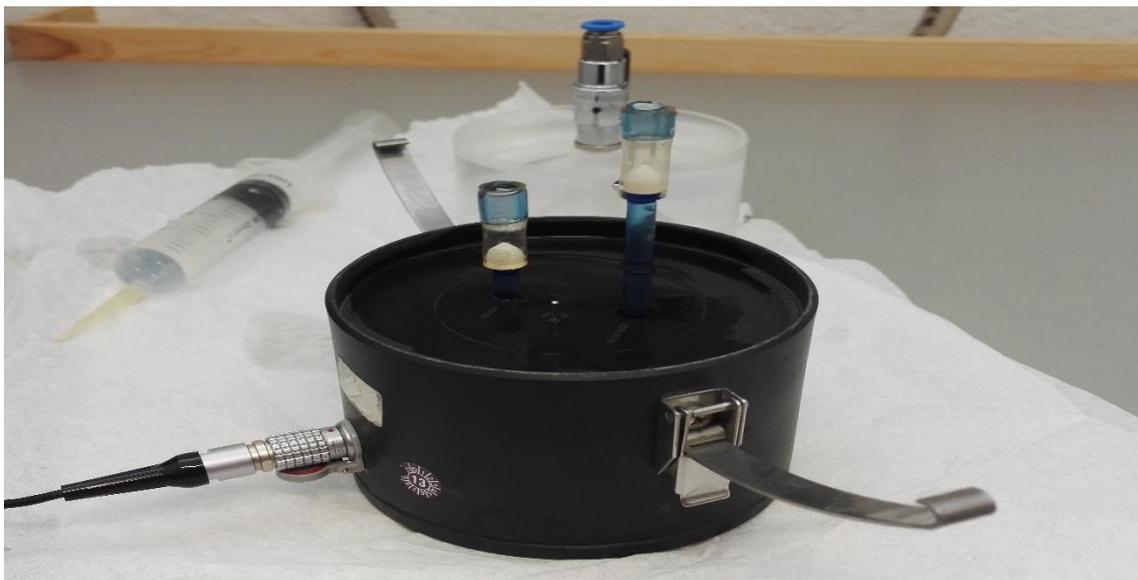


Abb. 35: Einschrauben der Tensiometer in den Druckmesskopf

5.2.3 Montage der Bodenproben am Messsystem

Damit die Bodenproben am Messsystem befestigt werden konnten, wurden zwei Löcher in die Bodenproben gebohrt, um den nötigen Hohlraum für die Tensiometer zu schaffen. Die Bohrungen wurden mittels Handbohrer und Bohradapter durchgeführt. Das entfernte Material der Bodenproben entsprach ca. 1 cm³ und wurde bei der Auswertung berücksichtigt. Damit es bei der Montage der Bodenproben auf dem Messsystem zu keinen Lufteinschlüssen kam, wurden die gebohrten Hohlräume mit Wasser gefüllt. Anschließend wurden die Druckmessköpfe auf die Bodenproben gesetzt und mit den vorhandenen Klammern der Druckmessköpfe ab den Stechzylindern fixiert.

5.2.4 Start der HYPROP® Messkampagne

Nachdem die Montage der Bodenproben am Messsystem abgeschlossen war, wurden Probandaten in das Messprogramm tensioVIEW® der Firma UMS eingetragen. Anschließend wurde ein leichter Wasserfilm auf die Bodenproben aufgetragen und die HYPROP® Messkampagne gestartet (siehe Abb. 36).

Das Messprogramm tensioVIEW® maß die Saugspannungen der Bodenproben während der Evaporation. Der Wassergehalt der Bodenproben wurde während dessen mittels Wiegung (zwei bis drei Mal täglich) bestimmt. Die Eingabe der Wiegungen erfolgte automatisch durch das Messprogramm.



Abb. 36 Bodenproben zu Beginn der HYPROP® Messkampagne

Eine optimale Messkurve verläuft in vier Phasen ab und ist in der unten angeführten Abbildung (Abb. 37) dargestellt. Je nach Bodenprobe und örtlichen Bedingungen kann ein Durchlauf aller vier Phasen zwischen 4 und 14 Tagen dauern.

- Phase 1, regulärer Messbereich

Die Saugspannung steigt ohne abzuflachen bis zum Erreichen des Dampfdruckes von Wasser.

- Phase 2, Siedeverzugsphase

Die Saugspannung steigt bei gut entgasten Tensiometern über 850 hPa an. Das Wasser in den Tensiometern befindet sich im Siedeverzugsbereich.

- Phase 3, Kavitationsphase

In den Tensiometern bildet sich Wasserdampf und der Spannungswert fällt schlagartig auf den Siedepunkt von ca. 850 hPa ab. Die Höhe des aktuellen Siedepunkts von Wasser ist vom atmosphärischen Luftdruck abhängig.

- Phase 4, Lufteintrittsphase

Der Spannungswert fällt schlagartig auf 0 hPa ab, da Luft durch die Keramikspitzen eintritt. Der Lufteintrittspunkt ist ein Materialkennwert des Keramikwerkstoffes und liegt bei ca. 8800 hPa. Dieser Punkt wird bei der Auswertung mittels HYPROP-FIT[®] herangezogen und ist ein sehr wichtiger Messwert, da beim HYPROP[®]-Versuch keine weiteren Messpunkte bei so einer hohen Saugspannung generiert werden.

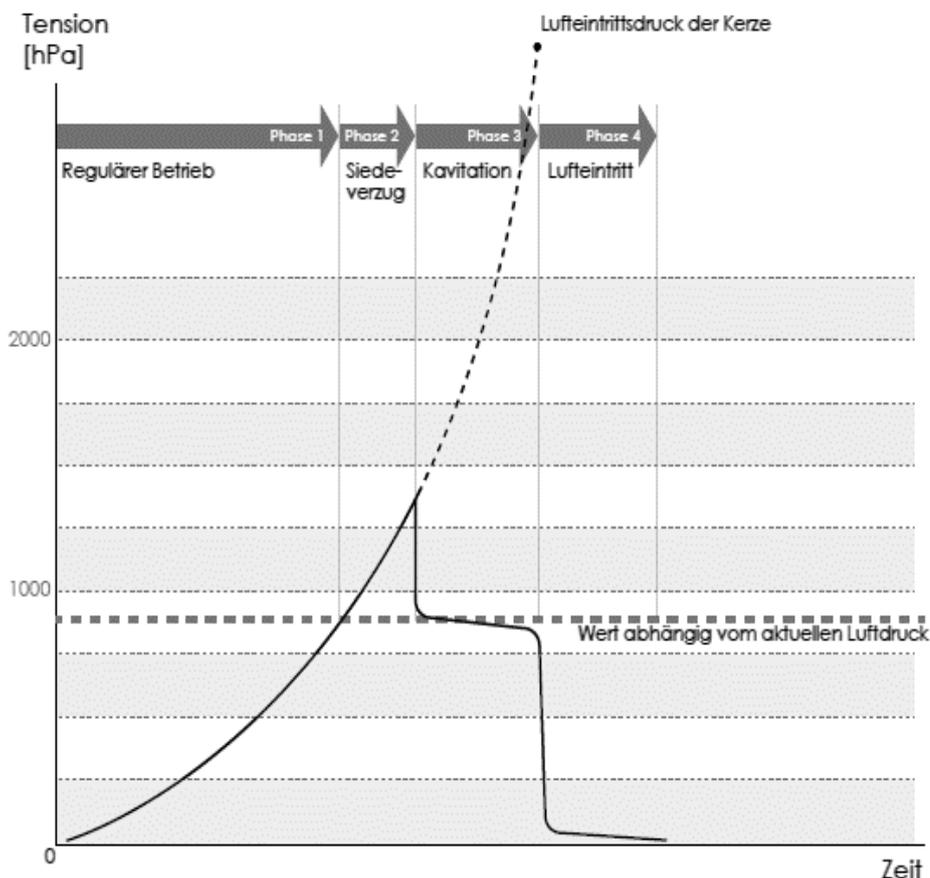


Abb. 37: Optimale Messkurve (Fa. UMS, 2015)

5.2.5 Bestimmung der Trockenmasse der Bodenproben

Für die Bestimmung der Trockenmassen der Bodenproben wurden die nach dem HYPROP®-Versuch noch restfeuchten Bodenproben inklusive Stechzylinder von den Druckmessköpfen abgenommen und in Schalen gegeben. Diese wurden in einen Trocknungsofen gestellt und bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massenkonsistenz getrocknet (Trocknungszeit > 16 h). Danach wurden die Schalen in einen Exsikkator gestellt, auf Raumtemperatur abgekühlt und erneut gewogen.

Die Trockenmasse m_d einer Bodenprobe errechnet sich wie folgt:

$$m_d = m_{ges} - m_{STZ} - m_s \quad (35)$$

m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
m_{ges}	[g]	Masse der Bodenprobe inklusive Stechzylinder und Schale
m_{STZ}	[g]	Masse des Stechzylinders
m_s	[g]	Masse der Schale

Anhand der Trockenmasse m_d kann die Trockendichte ρ_d der Bodenprobe berechnet werden. Die Trockendichte ist die Masse des ofengetrockneten Bodens bezogen auf dem Volumen der Bodenprobe V und errechnet sich wie folgt:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (36)$$

ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte der Bodenprobe
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
V	[cm ³]	Volumen der Bodenprobe (249 cm ³)

Der Anfangswassergehalt $m_{W(0\text{ kPa})}$ (Wassergehalt zu Beginn des HYPROP® - Versuchs) stellt den Wassergehalt bei vollständiger Sättigung der Bodenproben dar und entspricht einer Saugspannung von 0 kPa. Er wurde für die Auswertung des HYPROP® - Versuchs benötigt und errechnet sich wie folgt:

$$m_{W(0\text{ kPa})} = m_{ges(0\text{ kPa})} - m_{HYPROP} - m_{STZ} - m_d \quad (37)$$

$m_{W(0\text{ kPa})}$	[g]	Anfangswassergehalt der Bodenprobe bei einer Saugspannung von 0 kPa
$m_{ges(0\text{ kPa})}$	[g]	Erste Gewichtsmessung des HYPROP® - Versuches
m_{HYPROP}	[g]	Masse des HYPROP® Messkopfes inklusive Tensiometer
m_{STZ}	[g]	Masse des Stechzylinders
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe

5.2.6 Auswertung der Messergebnisse mittels HYPROP-FIT[®]

Die Auswertung der Messergebnisse des HYPROP[®]-Versuches erfolgte anhand der HYPROP-FIT[®]-Software der Firma UMS. Mit Hilfe der Software können Modellfunktionen teilgesättigter Böden an die Messpunkte der Saugspannungen während der Evaporation der Bodenproben angenähert werden.

Dabei kann die Berechnung im Programm anhand der Trockenmasse m_d , oder anhand des Anfangswassergehalts $m_{W(0\text{ kPa})}$ der Bodenproben erfolgen. Es wurde sich für die Berechnung anhand der Trockenmasse m_d entschieden, da die von der Software ermittelte Trockendichte ρ_d und Porosität n der Bodenproben, sehr gut mit den errechneten Parametern der Messprotokolle (siehe Anhang G) übereinstimmen.

Die Messpunkte des HYPROP[®]-Systems werden nur bis zu einer Saugspannung von 100 kPa gemessen. Daher wurde der Lufteintrittspunkt der Tensiometer zusätzlich eingegeben. Dieser ist ein Materialkennwert von den Keramikspitzen der Tensiometer und wird bei einer Saugspannung von 880 kPa erreicht. Der Lufteintrittspunkt dient dabei als weiterer Messpunkt für die später erzeugten Modellfunktionen.

Um die Genauigkeit der Modellfunktionen weiter zu erhöhen, wurden bekannte Messpunkte hinzugefügt. Anhand des Drucktopfversuches wurde zum Beispiel der Restwassergehalt bei einem Druck von 1.500 kPa bestimmt (siehe Anhang F). Ebenso wurde die Wasserdurchlässigkeit bei vollständiger Sättigung hinzugefügt (siehe Anhang D und E). Diese entspricht einer Wasserdurchlässigkeit der Bodenproben bei einer Saugspannung von 0 kPa.

Nachdem alle Parameter und Messpunkte in die HYPROP-FIT[®]-Software eingegeben wurden, wurden die Messpunkte mit den Modellfunktionen der Software angenähert (Fitting). Dabei bildete das Constrained van Genuchten-Mualem Modell die Messpunkte am besten nach (van Genuchten, 1980). Das Modell wird im folgenden Kapitel 5.2.7 genauer beschrieben.

Laut den Berechnungen der Messprotokolle (siehe Anhang G) waren die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig mit Wasser gesättigt. Der Wasserverlust der Bodenproben ist womöglich aufgrund der Verdunstung während der Probenvorbereitung zurückzuführen. Dies führte zu einem geringeren Anfangswassergehalt bei den Wasserretentionskurven. Um eine einheitliche Vergleichbarkeit der Bodenproben zu schaffen, wurde der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert und als Eingabeparameter (Fittingparameter) θ_s vorgegeben.

5.2.7 Constrained van Genuchten-Mualem Modell

Für die Berechnung der Wasserretentionskurven und der Wasserdurchlässigkeit der Bodenproben wird das Stoffgesetz teilgesättigter Böden von van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) verwendet. Das Berechnungsmodell von van Genuchten basiert auf der Herleitung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von Mualem (Mualem, 1976). Aus diesem Grund beinhaltet das Modell beide Namen.

Beim Constrained-Modell ist der zusätzliche Kurvenparameter m definiert als Funktion des Parameters n (siehe Gleichung (39)), beim unconstrained-Modell ist der zusätzliche Kurvenparameter m ein freier Parameter.

Der momentane volumetrische Wassergehalt in Abhängigkeit der Saugspannung h berechnet sich nach van Genuchten-Mualem wie folgt (van Genuchten, 1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \quad (38)$$

mit: $m = 1 - \frac{1}{n}$ (39)

θ	[Vol.-%]	volumetrischer Wassergehalt der Bodenprobe
θ_r	[Vol.-%]	residualer Wassergehalt der Bodenprobe
θ_s	[Vol.-%]	Wassergehalt bei Sättigung der Bodenprobe
h	[1/hPa]	Saugspannung bzw. Matrixpotential
α	[1/cm]	Parameter, bestimmt den Wendepunkt der Retentionskurve
n	[-]	Parameter, bestimmt die Steilheit der Retentionskurve
m	[-]	zusätzlicher Kurvenparameter

Die relative ungesättigte Durchlässigkeit der Bodenprobe $k_{r(h)}$ in Abhängigkeit vom Matrixpotential h wird im Berechnungsmodell von van Genuchten-Mualem durch folgende Funktion beschrieben (van Genuchten, 1980):

$$k_{r(h)} = \frac{\{1 - (\alpha \cdot h)^{n-1} \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^{\frac{m}{2}}} \quad (40)$$

mit: $m = 1 - \frac{1}{n}$ (39)

$k_{r(h)}$	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit der Bodenprobe
h	[1/hPa]	Saugspannung bzw. Matrixpotential
α	[1/cm]	Parameter, bestimmt den Wendepunkt der Retentionskurve
n	[-]	Parameter, bestimmt die Steilheit der Retentionskurve
m	[-]	zusätzlicher Kurvenparameter

Die ungesättigte Durchlässigkeit der Bodenprobe $k_{(h)}$ errechnet sich anhand der Multiplikation der relativen ungesättigten Durchlässigkeit der Bodenprobe $k_{r(h)}$ mit der gesättigten Durchlässigkeit der Bodenprobe k :

$$k_{(h)} = k \cdot k_{r(h)} \quad (41)$$

$k_{(h)}$	[m/s]	ungesättigte Durchlässigkeit der Bodenprobe
k	[m/s]	gesättigte Durchlässigkeit der Bodenprobe
$k_{r(h)}$	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit der Bodenprobe

6 Ergebnisse der Versuche

In dieser Arbeit werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik anhand des HYPROP[®]-Versuches untersucht. Als Ausgangsmaterialien wurden ein schluffiger Sand (siehe Kapitel 3.2) und ein toniger Schluff (siehe Kapitel 3.3) verwendet. Es wurden 5 Versuchsreihen mit unterschiedlichen Bodenproben durchgeführt (siehe Kapitel 5.1).

Zur besseren Veranschaulichung wurde für jede Versuchsreihe eine Übersichtstabelle mit den wichtigsten Parametern der Bodenproben erstellt. Diese beinhalten den gravimetrischen Wassergehalt w und den volumetrischen Wassergehalt θ , die Trockenmasse m_d , die Trockendichte ρ_d und die Korndichte ρ_s , sowie die Porosität n und den Sättigungsgrad S_r . Das gesamte Messprotokoll des HYPROP[®]-Versuches kann dem Anhang G entnommen werden. Die Berechnungen der in der Übersichtstabelle dargestellten Parameter wurden anhand der Gleichungen (5) bis (10) durchgeführt.

Ebenso wurde eine Übersichtstabelle für die gesättigte Wasserdurchlässigkeit je Versuchsreihe erstellt. Diese beinhaltet die Durchlässigkeitsbeiwerte k_{10} aus der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle und mittels Permeameter. Um die Genauigkeit der Modellfunktionen für die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit der Bodenproben zu erhöhen, wurde die Wasserdurchlässigkeit bei vollständiger Sättigung als Messpunkt im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] hinzugefügt. Die Messprotokolle können dem Anhang D und E entnommen werden.

Anhand des Drucktopfversuches wurde der Restwassergehalt der Bodenproben bei einer Druckstufe von 1.500 kPa ermittelt. Dieser Messpunkt wurde auch im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] hinzugefügt, um die Genauigkeit der Modellfunktion für die Wasserretentionskurve zu erhöhen. Das Messprotokoll kann dem Anhang F entnommen werden.

Zu Beginn des HYPROP[®] - Versuches waren die Bodenproben nicht vollständig mit Wasser gesättigt, dies führte zu einem zu geringen Anfangswassergehalt bei den Wasserretentionskurven. Das Problem konnte gelöst werden, indem der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert wurde und als Fittingparameter θ_s im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] vorgegeben wurde.

Die Ergebnisse der hydraulischen Versuche je Versuchsreihe, werden in den folgen Kapiteln (6.1 bis 6.5) dargestellt.

6.1 Bodenprobe Sa (Versuchsreihe 1)

Bei der Versuchsreihe 1 wurde der schluffige Sand si Sa (siehe Kapitel 3.2) auf seine hydraulischen Eigenschaften anhand des HYPROP[®]-Versuches überprüft. Die Bodenproben wurden in drei 5 cm hohe Stechzylinder mit einem Volumen von 250 cm³ gepresst und werden folgend Bodenprobe Sa genannt. Die für den HYPROP[®]-Versuch relevanten Parameter der Bodenproben können der folgenden Tabelle (Tab. 2) entnommen werden.

Tab. 2 Parameter der Bodenprobe Sa für den HYPROP[®]-Versuch

STZ*	w [M-%]	θ [Vol.-%]	m_d [g]	ρ_d [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	n [-]	S_r [%]
21	27,5	38,7	330,0	1,40	2,78	0,49	78,1
23	28,9	40,5	329,9	1,40	2,78	0,50	81,9
24	28,5	40,1	331,4	1,41	2,78	0,49	81,5
\bar{x}	28,3	39,8	330,4	1,40	2,78	0,49	80,5

*Stechzylinder

Beim Aufsättigen komprimierten sich die Bodenproben aufgrund der geringen Einbaudichte. Dies wurde in Form einer Volumenkorrektur von 15 cm³ beim HYPROP[®]-Versuch berücksichtigt. Die Trockendichte ρ_d der Bodenprobe Sa beträgt somit 1,40 g/cm³.

Die Korndichte ρ_s der Bodenprobe Sa wurde mittels Kapillarpyknometerverfahren bestimmt und beträgt 2,78 g/cm³. Mit einer Trockenmasse m_d von 330,4 g und einem Volumen V von 235 cm³ errechnet sich ein Porenanteil n zu 49 %.

Anhand des Sättigungsgrades S_r von 80,5 % ist erkennbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Porenwassers während der Probenvorbereitung verdunstet ist. Daher wurde der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert und als Fittingparameter θ_s im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] vorgegeben.

Bei vollständiger Sättigung der Bodenprobe Sa beträgt der Anfangswassergehalt $w_s = 35,1$ M-%, oder $\theta_s = 49,4$ Vol.-%

Anhand des Drucktopfversuches wurde bei einer Druckstufe von 1.500 kPa ein Restwassergehalt von $w_r = 2,0$ M-%, oder $\theta_r = 2,6$ Vol.-% ermittelt.

In der folgenden Abbildung ist die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa bezogen auf deren Sättigungsgrad dargestellt. Es ist sehr gut sichtbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren.

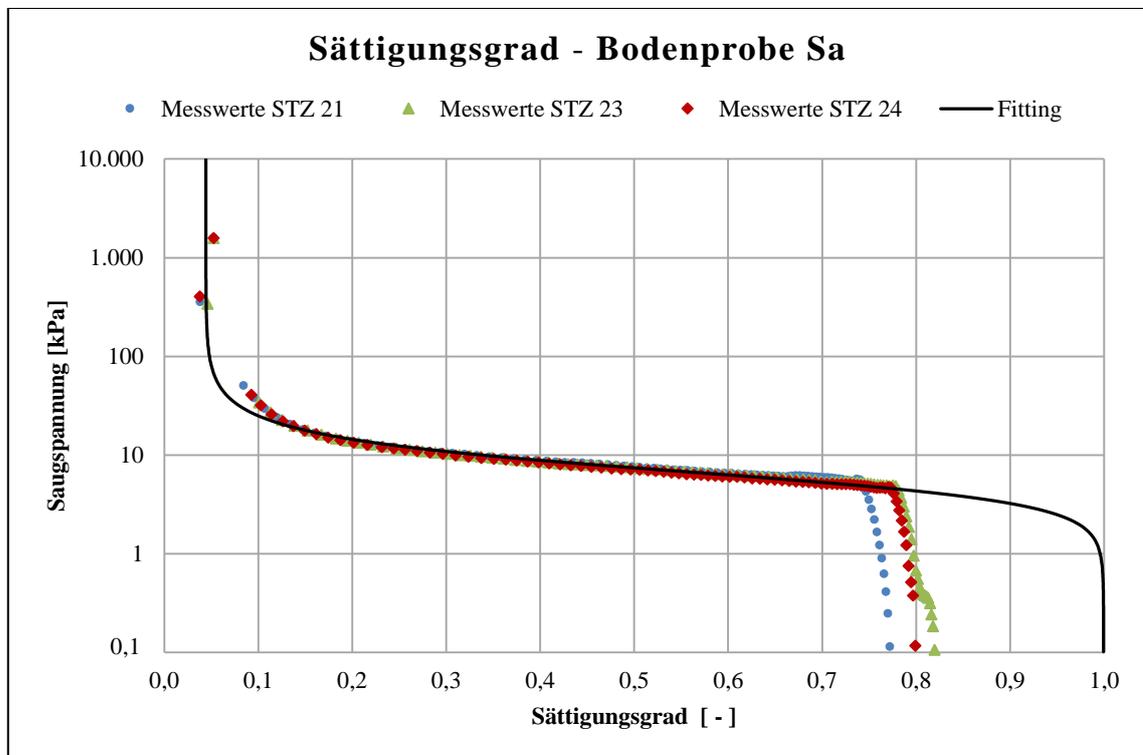


Abb. 38: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Messwerte der Bodenproben sind farblich dargestellt und reichen bis zu einer Saugspannung von 100 kPa. Der Lufteintrittspunkt der Tensiometer wird bei einer Saugspannung von 880 kPa erreicht. Ein weiterer Messpunkt wurde anhand des Drucktopfversuches bei einer Druckstufe von 1.500 kPa bestimmt. In schwarz ist das Fitting der Modelfunktion nach van Genuchten-Mualem dargestellt. Das Fitting trifft die Messdaten der Bodenproben sehr gut und repräsentiert den zusammengefassten Verlauf der Bodenprobe Sa.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa ist bei einer Saugspannung von 1 – 50 kPa sehr steil. Dies ist typisch für einen Sandboden und weist darauf hin, dass in diesem Bereich der Durchmesser der Poren relativ einheitlich ist. Der Großteil des Porenwassers ist nur sehr schwach gebunden und weist eine einheitliche Bindungsstärke auf. Die restlichen 5 % des Porenwassers sind in Form von Adsorptionswasser stärker an die Poren gebunden und lassen sich auch bei Saugspannungen größer als 100 kPa nur sehr schwer entwässern. Diese hohe Bindungsstärke des Porenwassers führt auch dazu, dass die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Sa in diesem Bereich stark abnimmt.

Die folgenden 2 Abbildungen stellen die Wasserretentionskurven der Bodenprobe Sa bezogen auf den Wassergehalt in Masseprozent und Volumenprozent dar.

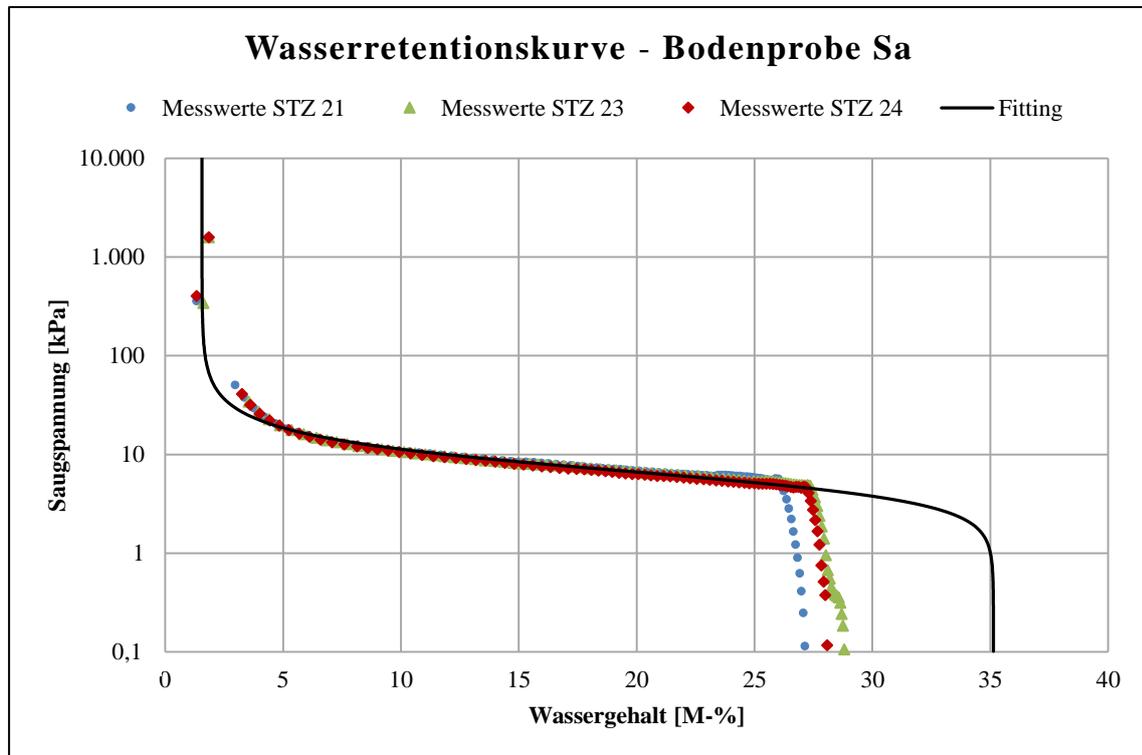


Abb. 39: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa in Masseprozent

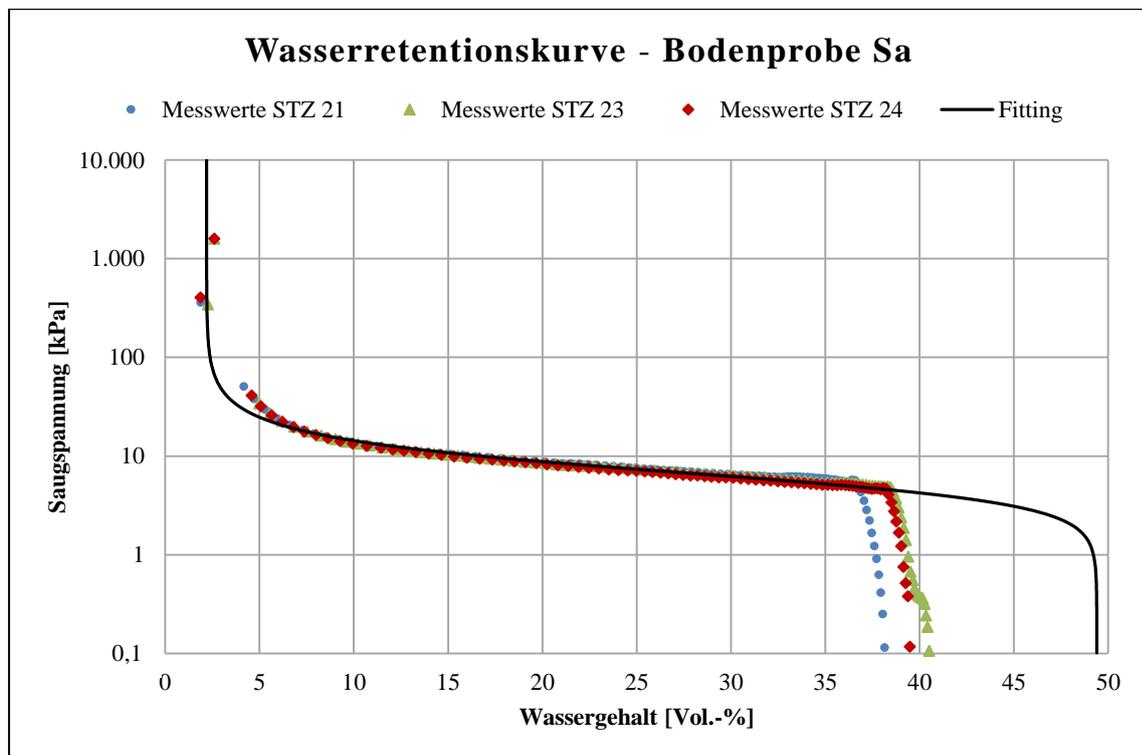


Abb. 40: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa in Volumsprozent

Die folgende Tabelle (Tab. 3) stellt die Ergebnisse der gesättigten hydraulischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k im Permeameter und in der Triaxialzelle bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C für die Bodenprobe Sa dar.

Die Abweichungen der Durchlässigkeitsbeiwerte k zwischen Permeameter und Triaxialzelle sind sehr gering, dies deutet auf gut gesättigte Bodenproben während der Versuchsdurchführung hin. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der Bodenprobe Sa wurden im Permeameter keine instationären Messungen durchgeführt und der Gradient i in der Triaxialzelle nicht erhöht.

Tab. 3 Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte k der Bodenprobe Sa

Bodenprobe Sa	Permeameter St. [m/s]	Permeameter Inst. [m/s]	Triaxialzelle $i = 8$ [m/s]	Triaxialzelle $i = 30$ [m/s]
1	$1,9 \cdot 10^{-5}$	-	$1,4 \cdot 10^{-5}$	-
2	$1,8 \cdot 10^{-5}$	-	$1,4 \cdot 10^{-5}$	-
3	$1,3 \cdot 10^{-5}$	-	$1,8 \cdot 10^{-5}$	-
\bar{x}	$1,7 \cdot 10^{-5}$	-	$1,5 \cdot 10^{-5}$	-

In der folgenden Abbildung ist die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit k_h bezogen auf den Sättigungsgrad S_r der Bodenprobe Sa dargestellt. Es ist sehr gut zu sehen, dass die hydraulische Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung am größten ist, und mit abnehmender Sättigung abnimmt. Um die Genauigkeit der Modellfunktion zu erhöhen, wurde die gesättigte Durchlässigkeit mit $k = 1,6 \cdot 10^{-5}$ m/s vorgegeben.

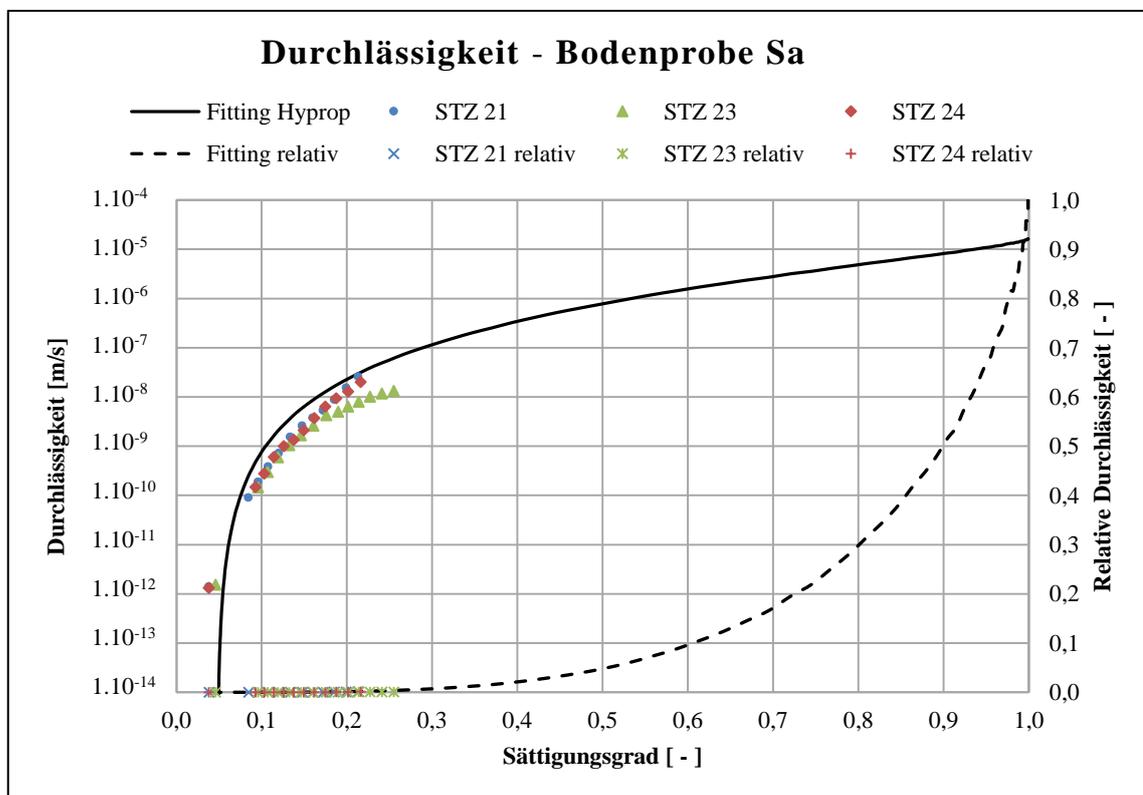


Abb. 41: Wasserdurchlässigkeit der Bodenprobe Sa

6.2 Bodenprobe Si (Versuchsreihe 2)

Bei der Versuchsreihe 1 wurde der tonige Schluff cl Si (siehe Kapitel 3.3) auf seine hydraulischen Eigenschaften anhand des HYPROP[®]-Versuches überprüft. Die Bodenproben wurden in drei 5 cm hohe Stechzylinder mit einem Volumen von 250 cm³ gepresst und werden folgend Bodenprobe Si genannt. Die für den HYPROP[®]-Versuch relevanten Parameter der Bodenproben können der folgenden Tabelle (Tab. 4) entnommen werden.

Tab. 4 Parameter der Bodenprobe Si für den HYPROP[®]-Versuch

STZ	w [M-%]	θ [Vol.-%]	m_d [g]	ρ_d [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	n [-]	S_r [%]
25	22,8	37,3	408,5	1,64	2,77	0,41	91,6
28	22,5	37,1	409,8	1,65	2,77	0,41	91,3
30	22,3	36,9	411,5	1,65	2,77	0,41	91,4
\bar{x}	22,5	37,1	409,9	1,65	2,77	0,41	91,4

*Stechzylinder

Für den HYPROP[®]-Versuch wurde die Bodenprobe Si mit einer Trockendichte ρ_d von 1,65 g/cm³ in die Stechzylinder eingebaut.

Die Korndichte ρ_s der Bodenprobe Si wurde mittels Kapillarpyknometerverfahren bestimmt und beträgt 2,77 g/cm³. Mit einer Trockenmasse m_d von 409,9 g und einem Volumen V von 249 cm³ errechnet sich ein Porenanteil n zu 41 %.

Anhand des Sättigungsgrades S_r von 91,4 % ist erkennbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Porenwassers während der Probenvorbereitung verdunstet ist. Daher wurde der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert und als Fittingparameter θ_s im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] vorgegeben.

Bei vollständiger Sättigung der Bodenprobe Sa beträgt der Anfangswassergehalt $w_s = 24,6$ M-%, oder $\theta_s = 40,5$ Vol.-%

Anhand des Drucktopfversuches wurde bei einer Druckstufe von 1.500 kPa ein Restwassergehalt von $w_r = 9,9$ M-%, oder $\theta_r = 16,2$ Vol.-% ermittelt.

In der folgenden Abbildung ist die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si bezogen auf deren Sättigungsgrad dargestellt. Es ist sehr gut sichtbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP®-Versuches nicht vollständig gesättigt waren.

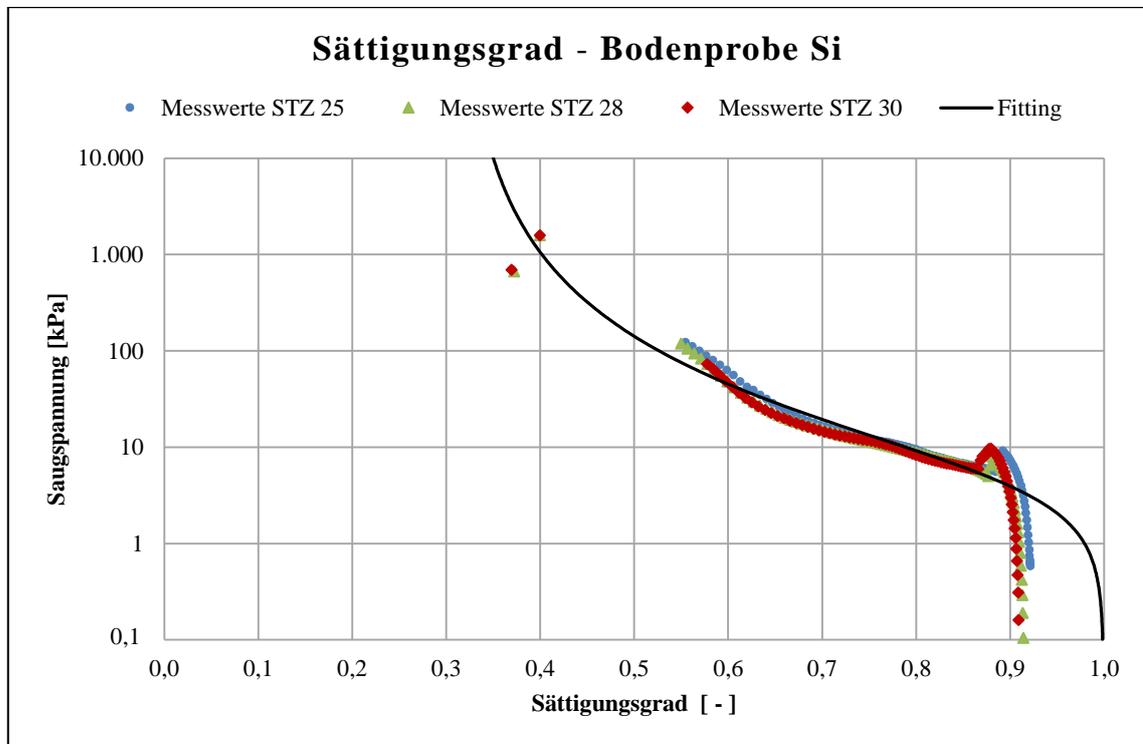


Abb. 42: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Messwerte der Bodenproben sind farblich dargestellt und reichen bis zu einer Saugspannung von 100 kPa. Der Lufteintrittspunkt der Tensiometer wird bei einer Saugspannung von 880 kPa erreicht. Ein weiterer Messpunkt wurde anhand des Drucktopfversuches bei einer Druckstufe von 1.500 kPa bestimmt. In schwarz ist das Fitting der Modelfunktion nach van Genuchten-Mualem dargestellt. Der Knick der Messwerte im Bereich von 90 % Sättigung ist durch das Hysterese Verhalten der Bodenprobe zu erklären. Es ist anzunehmen, dass sich in diesem Bereich einige Poren wieder gesättigt haben, welche bereits entwässert waren.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve bei der Bodenprobe Si ist wesentlich flacher als bei der Bodenprob Sa. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der tonige Schluff eine viel feinere Abstufung der Porengrößenverteilung aufweist als der schluffige Sand. Aufgrund des hohen Tonanteiles von ca. 15% sind rund 40 % des Porenwassers bei einer Saugspannung von 1.000 kPa noch in der Bodenprobe Si gebunden. Mit steigender Saugspannung nimmt auch der Restwassergehalt kontinuierlich ab. Dieses Verhalten wirkt sich auch auf die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Si aus und führt zu einer Reduktion der Leitfähigkeit je nachdem wie stark die Saugspannungen ansteigen.

Die folgenden 2 Abbildungen stellen die Wasserretentionskurven der Bodenprobe Si bezogen auf den Wassergehalt in Masseprozent und Volumenprozent dar.

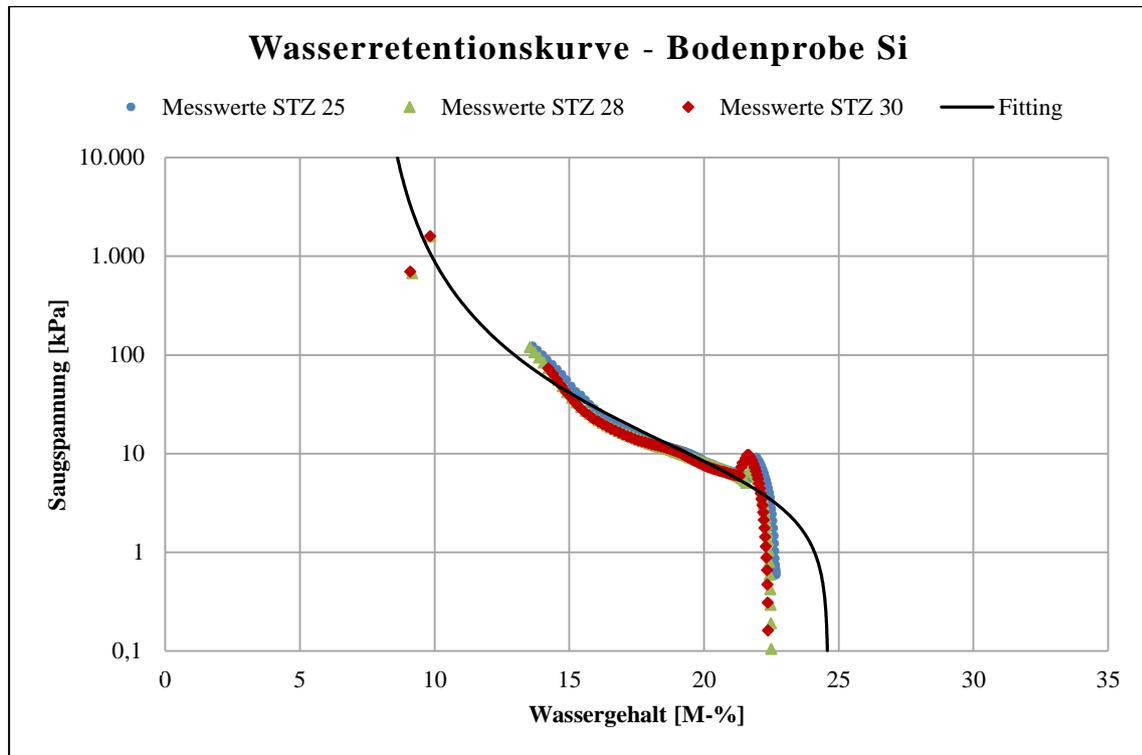


Abb. 43: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si in Masseprozent

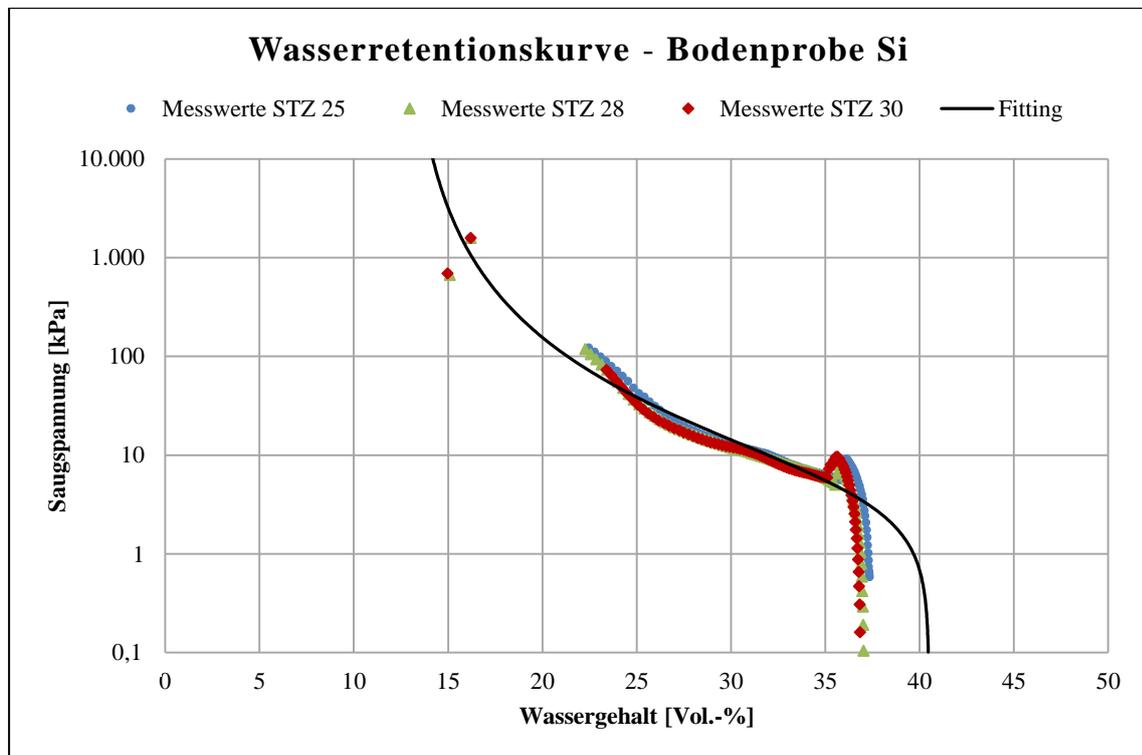


Abb. 44: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si in Volumsprozent

Die folgende Tabelle (Tab. 5) stellt die Ergebnisse der gesättigten hydraulischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k im Permeameter und in der Triaxialzelle bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C für die Bodenprobe Si dar.

Dabei ist gut zu sehen, dass es Abweichungen der Durchlässigkeitsbeiwerte k zwischen Permeameter und Triaxialzelle gibt. Dies deutet darauf hin, dass die Bodenproben in der Triaxialzelle womöglich nicht vollständig gesättigt waren. Nachdem der Gradient i in der Triaxialzelle erhöht wurde, nahm auch die Wasserdurchlässigkeit zu.

Tab. 5 Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte k der Bodenprobe Si

Bodenprobe Si	Permeameter St. [m/s]	Permeameter Inst. [m/s]	Triaxialzelle $i = 8$ [m/s]	Triaxialzelle $i = 30$ [m/s]
1	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
2	$6,4 \cdot 10^{-7}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$
3	$5,5 \cdot 10^{-7}$	$5,6 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$
\bar{x}	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$

In der folgenden Abbildung ist die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit k_h bezogen auf den Sättigungsgrad S_r der Bodenprobe Si dargestellt. Es ist sehr gut zu sehen, dass die hydraulische Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung am größten ist, und mit abnehmender Sättigung abnimmt. Um die Genauigkeit der Modellfunktion zu erhöhen, wurde die gesättigte Durchlässigkeit mit $k = 5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s vorgegeben.

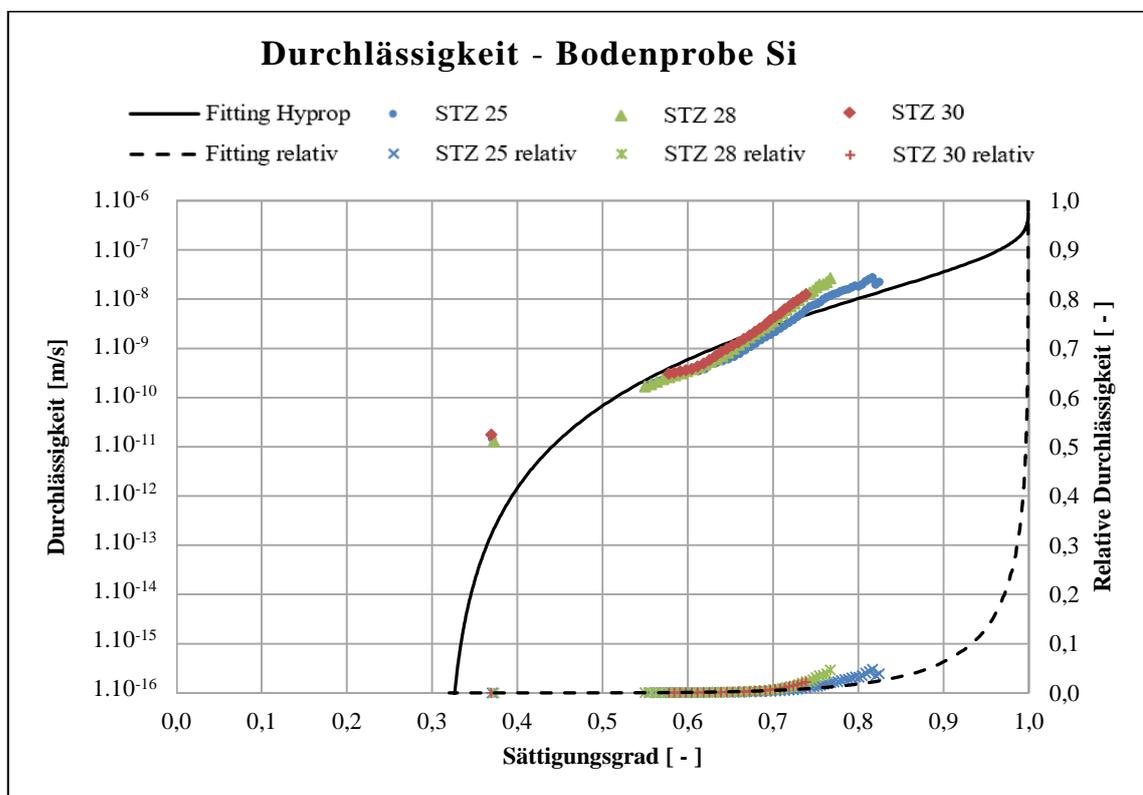


Abb. 45: Durchlässigkeit der Bodenprobe Si in m/s

6.3 Bodenprobe Sa/Si (Versuchsreihe 3)

Bei der Versuchsreihe 3 wurden die hydraulischen Eigenschaften einer Bodenprobe mit schichtweisem Aufbau anhand des HYPROP[®]-Versuches überprüft. Dazu wurde die Bodenprobe Sa/Si erstellt. Die obere Schicht der Bodenprobe besteht aus dem schluffigen Sand si Sa (siehe Kapitel 3.2), die untere Schicht besteht aus dem tonigen Schluff cl Si (siehe Kapitel 3.3). Es wurden wie bei den anderen Versuchsreihen drei Bodenproben in Stechzylinder mit einer Höhe von 5 cm und einem Volumen von 250 cm³ gepresst. Die für den HYPROP[®]-Versuch relevanten Parameter der Bodenproben können der folgenden Tabelle (Tab. 6) entnommen werden.

Tab. 6 Parameter der Bodenprobe Sa/Si für den HYPROP[®]-Versuch

STZ	w [M-%]	θ [Vol.-%]	m_d [g]	ρ_d [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	n [-]	S_r [%]
6	27,1	40,8	375,0	1,51	2,78	0,46	88,9
7	27,3	41,1	374,7	1,50	2,78	0,46	89,7
10	26,8	40,2	373,4	1,50	2,78	0,46	87,2
\bar{x}	27,1	40,7	374,4	1,50	2,78	0,46	88,6

*Stechzylinder

Für den HYPROP[®]-Versuch wurde die Bodenprobe Sa/Si mit einer Trockendichte ρ_d von 1,50 g/cm³ in die Stechzylinder eingebaut.

Als Korndichte ρ_s der Bodenprobe Sa/Si wurde dieselbe Dichte wie bei der Bodenprobe Sa&Si verwendet, welche mittels Kapillarpknometerverfahren bestimmt wurde. Die Korndichte ρ_s der Bodenprobe Sa/Si beträgt somit 2,78 g/cm³. Mit einer Trockenmasse m_d von 374,4 g und einem Volumen V von 249 cm³ errechnet sich ein Porenanteil n zu 46 %.

Anhand des Sättigungsgrades S_r von 88,6 % ist erkennbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Porenwassers während der Probenvorbereitung verdunstet ist. Daher wurde der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert und als Fittingparameter θ_s im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] vorgegeben.

Bei vollständiger Sättigung der Bodenprobe beträgt der Anfangswassergehalt $w_s = 30,6$ M-%, oder $\theta_s = 46,0$ Vol.-%

Anhand des Drucktopfversuches wurde bei einer Druckstufe von 1.500 kPa ein Restwassergehalt von $w_r = 6,8$ M-%, oder $\theta_r = 11,2$ Vol.-% ermittelt.

In der folgenden Abbildung ist die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa/Si bezogen auf deren Sättigungsgrad dargestellt. Es ist sehr gut sichtbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren.

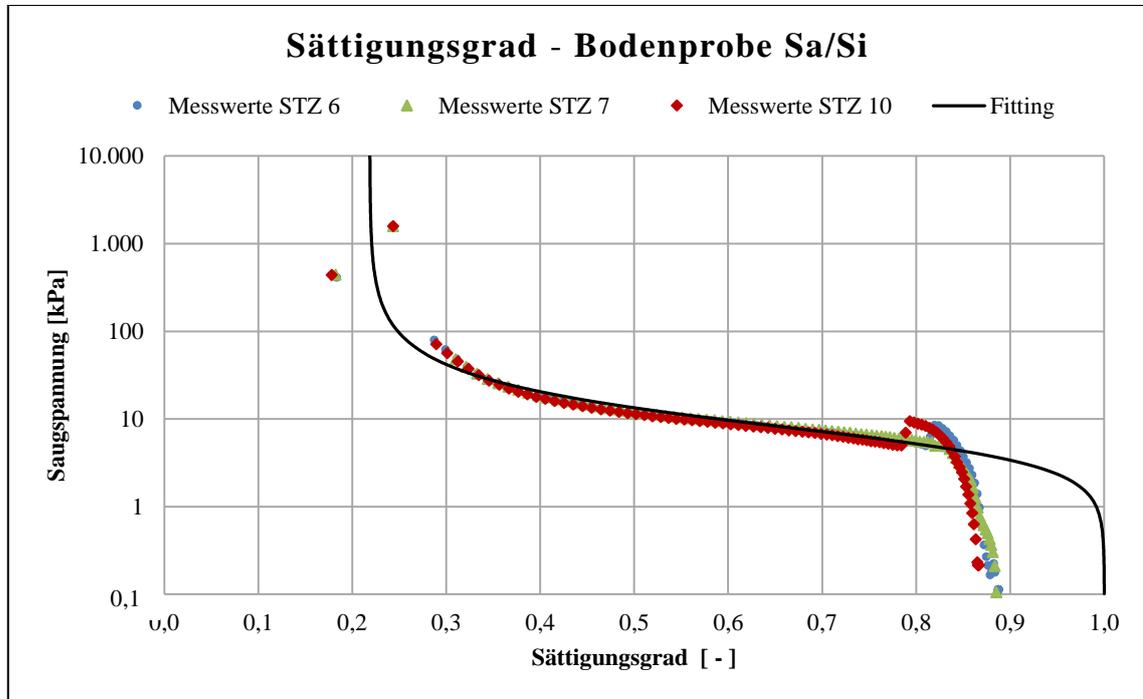


Abb. 46: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa/Si bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Messwerte der Bodenproben sind farblich dargestellt und reichen bis zu einer Saugspannung von 100 kPa. Der Lufttrittspunkt der Tensiometer wird bei einer Saugspannung von 880 kPa erreicht. Ein weiterer Messpunkt wurde anhand des Drucktopfversuches bei einer Druckstufe von 1.500 kPa bestimmt. In schwarz ist das Fitting der Modelfunktion nach van Genuchten-Mualem dargestellt. Der Knick der Messwerte im Bereich von 80 % Sättigung ist durch das Hysterese Verhalten der Bodenprobe zu erklären. Es ist anzunehmen, dass sich in diesem Bereich einige Poren wieder gesättigt haben, welche bereits entwässert waren.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve bei der Bodenprobe Sa/Si liegt zwischen den Wasserretentionskurven der beiden Bodenproben Sa und Si und stellt eine Kombination der beiden Verläufe dar. Der Anfangswassergehalt als auch der Restwassergehalt bei einer Druckstufe von 1.500 kPa befinden sich daher zwischen den Wassergehalten der einzelnen Bodenproben. Die Entwässerung der Poren beginnt ab einer Saugspannung von ca. 1 kPa. Ähnlich wie bei der Bodenprobe Sa lässt sich das restliche Porenwasser ab einer Saugspannung von 100 kPa nur sehr schwer entwässern. Diese hohe Bindungsstärke des Porenwassers führt auch dazu, dass die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Sa/Si in diesem Bereich stark abnimmt.

Die folgenden 2 Abbildungen stellen die Wasserretentionskurven der Bodenprobe Sa/Si bezogen auf den Wassergehalt in Masseprozent und Volumenprozent dar.

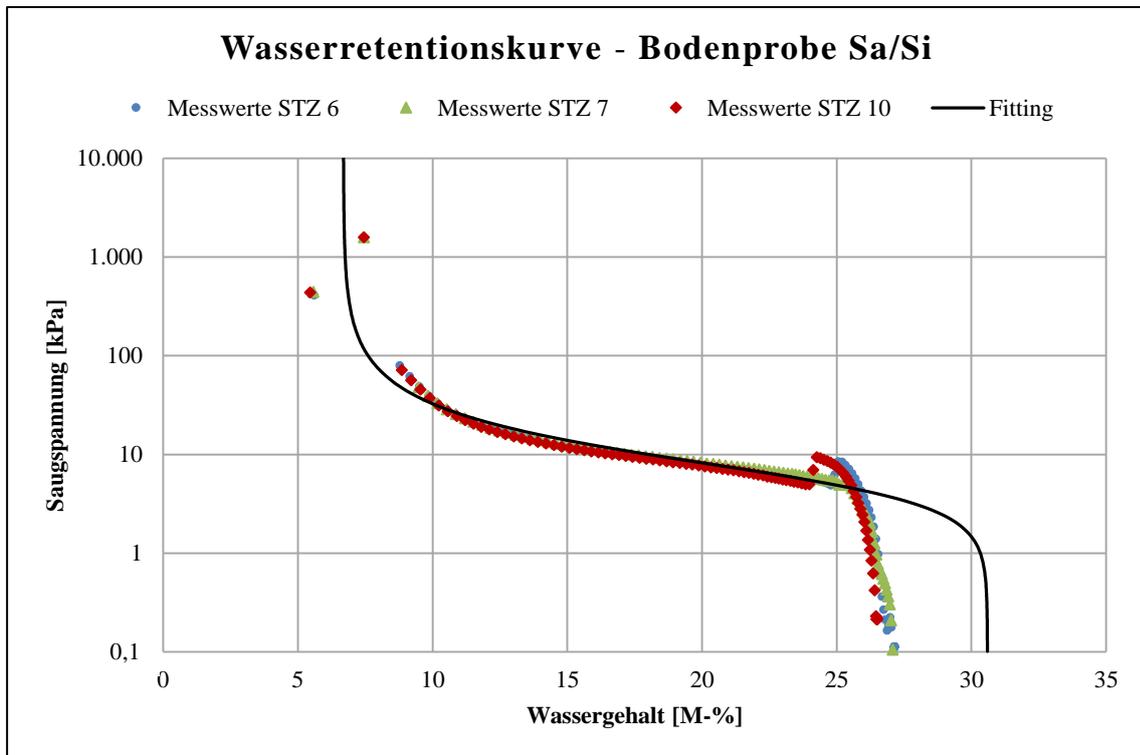


Abb. 47: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa/Si in Masseprozent

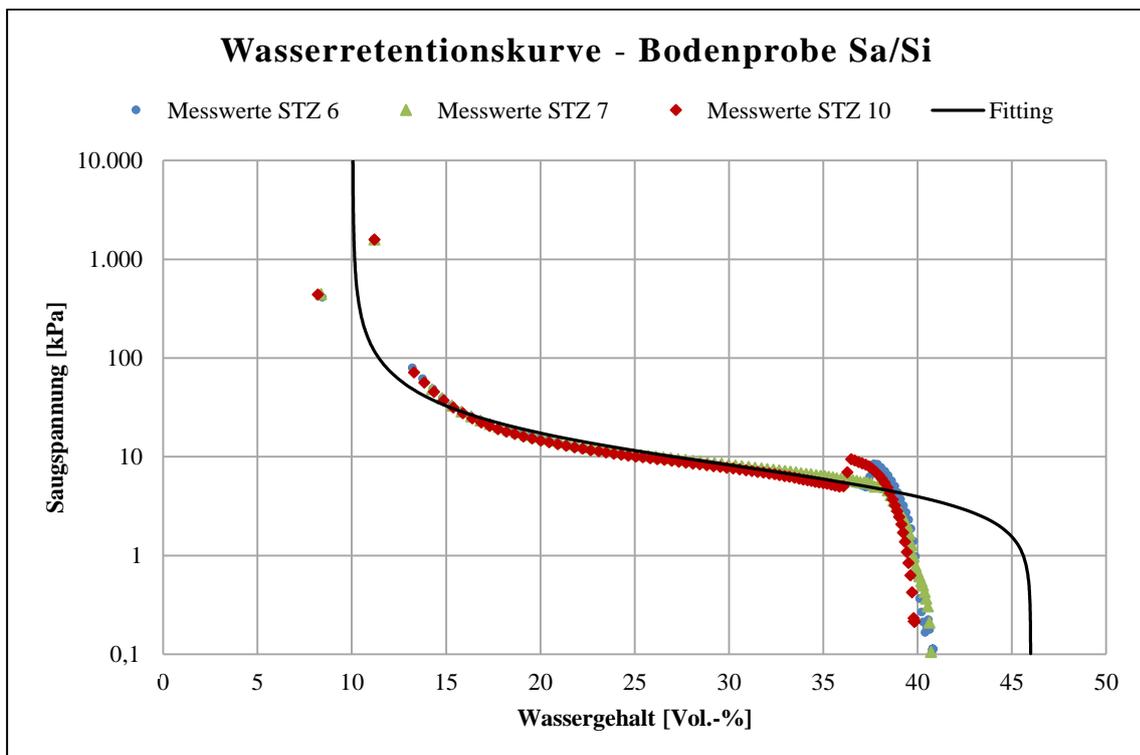


Abb. 48: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa/Si in Volumsprozent

Die folgende Tabelle (Tab. 7) stellt die Ergebnisse der gesättigten hydraulischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k im Permeameter und in der Triaxialzelle bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C für die Bodenprobe Sa/Si dar.

Für den geschichteten Aufbau der Bodenprobe wurde auf die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle verzichtet, da die Messergebnisse des Permeameterveruches sehr gut waren und die Bedingungen des HYPROP-Versuches besser wiedergeben. Bei den Messergebnissen ist gut sichtbar, dass die Abweichungen zwischen stationärer und instationärer Messung sehr gering sind.

Tab. 7 Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte k der Bodenprobe Sa/Si

Bodenprobe Sa/Si	Permeameter St. [m/s]	Permeameter Inst. [m/s]	Triaxialzelle $i = 8$ [m/s]	Triaxialzelle $i = 30$ [m/s]
1	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	-	-
2	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	-	-
3	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	-	-
\bar{x}	$1,3 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	-	-

In der folgenden Abbildung ist die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit k_h bezogen auf den Sättigungsgrad S_r der Bodenprobe Sa/Si dargestellt. Dabei ist gut zu sehen, dass die hydraulische Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung am größten ist, und mit abnehmender Sättigung abnimmt. Um die Genauigkeit der Modellfunktion zu erhöhen, wurde die gesättigte Durchlässigkeit mit $k = 1,4 \cdot 10^{-6}$ m/s vorgegeben.

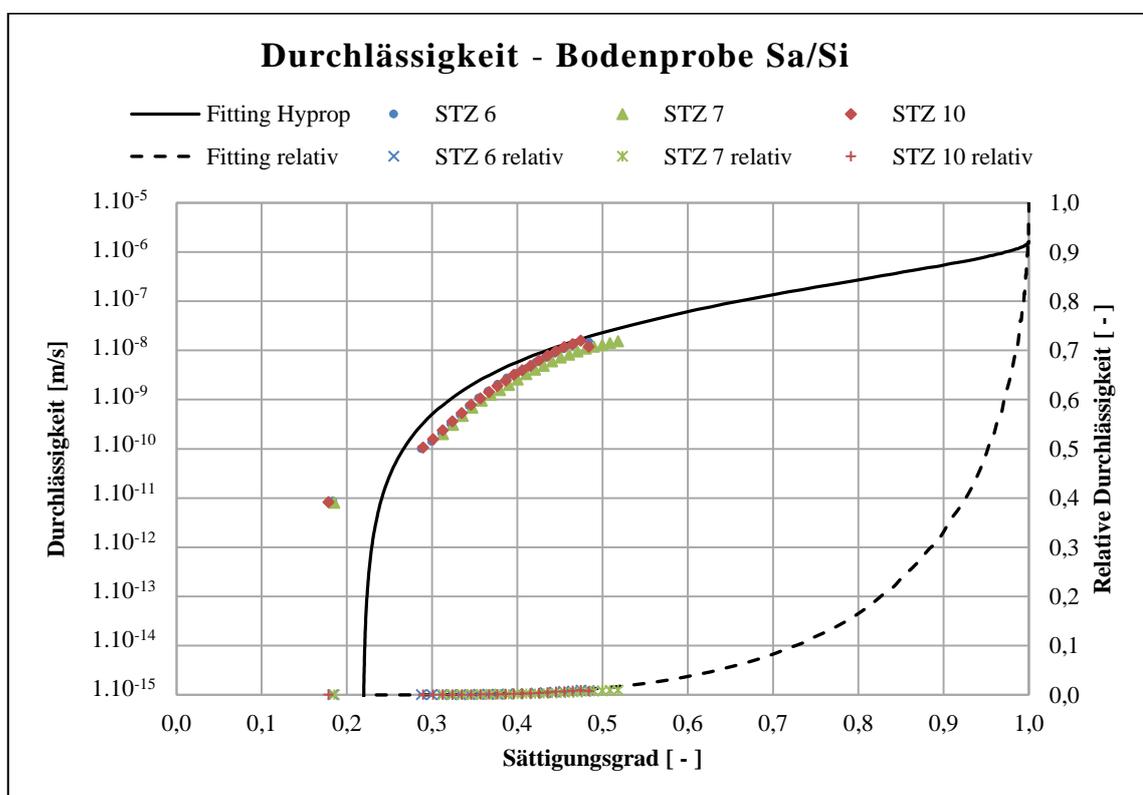


Abb. 49: Durchlässigkeit der Bodenprobe Sa/Si in m/s

6.4 Bodenprobe Si/Sa (Versuchsreihe 4)

Bei der Versuchsreihe 4 wurden die hydraulischen Eigenschaften einer Bodenprobe mit schichtweisem Aufbau anhand des HYPROP[®]-Versuches überprüft. Dazu wurde die Bodenprobe Si/Sa erstellt, welche dieselbe Probe wie die Bodenprobe Sa/Si ist, nur auf dem Kopf gestellt. Die obere Schicht der Bodenprobe Si/Sa besteht aus dem tonige Schluff cl Si (siehe Kapitel 3.3), die untere Schicht besteht aus dem schluffigen Sand si Sa (siehe Kapitel 3.2). Es wurden drei Bodenproben in Stechzylinder mit einer Höhe von 5 cm und einem Volumen von 250 cm³ gepresst. Die für den HYPROP[®]-Versuch relevanten Parameter können der folgenden Tabelle (Tab. 8) entnommen werden.

Tab. 8 Parameter der Bodenprobe Si/Sa für den HYPROP[®]-Versuch

STZ	w [M-%]	θ [Vol.-%]	m_d [g]	ρ_d [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	n [-]	S_r [%]
25	28,3	42,3	372,5	1,50	2,78	0,46	91,5
26	28,0	42,0	373,1	1,50	2,78	0,46	91,0
28	28,2	42,3	373,4	1,50	2,78	0,46	91,8
\bar{x}	28,1	42,2	373,0	1,50	2,78	0,46	91,4

*Stechzylinder

Für den HYPROP[®]-Versuch wurde die Bodenprobe Si/Sa mit einer Trockendichte ρ_d von 1,50 g/cm³ in die Stechzylinder eingebaut.

Als Korndichte ρ_s der Bodenprobe Si/Sa wurde dieselbe Dichte wie bei der Bodenprobe Sa&Si verwendet, welche mittels Kapillarpknometerverfahren bestimmt wurde. Die Korndichte ρ_s der Bodenprobe Si/Sa beträgt somit 2,78 g/cm³. Mit einer Trockenmasse m_d von 373,0 g und einem Volumen V von 249 cm³ errechnet sich ein Porenanteil n zu 46 %.

Anhand des Sättigungsgrades S_r von 91,4 % ist erkennbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Porenwassers während der Probenvorbereitung verdunstet ist. Daher wurde der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert und als Fittingparameter θ_s im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] vorgegeben.

Bei vollständiger Sättigung der Bodenprobe beträgt der Anfangswassergehalt $w_s = 30,7$ M-%, oder $\theta_s = 46,0$ Vol.-%

Anhand des Drucktopfversuches wurde bei einer Druckstufe von 1.500 kPa ein Restwassergehalt von $w_r = 6,8$ M-%, oder $\theta_r = 11,2$ Vol.-% ermittelt.

In der folgenden Abbildung ist die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si/Sa bezogen auf deren Sättigungsgrad dargestellt. Es ist sehr gut sichtbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren.

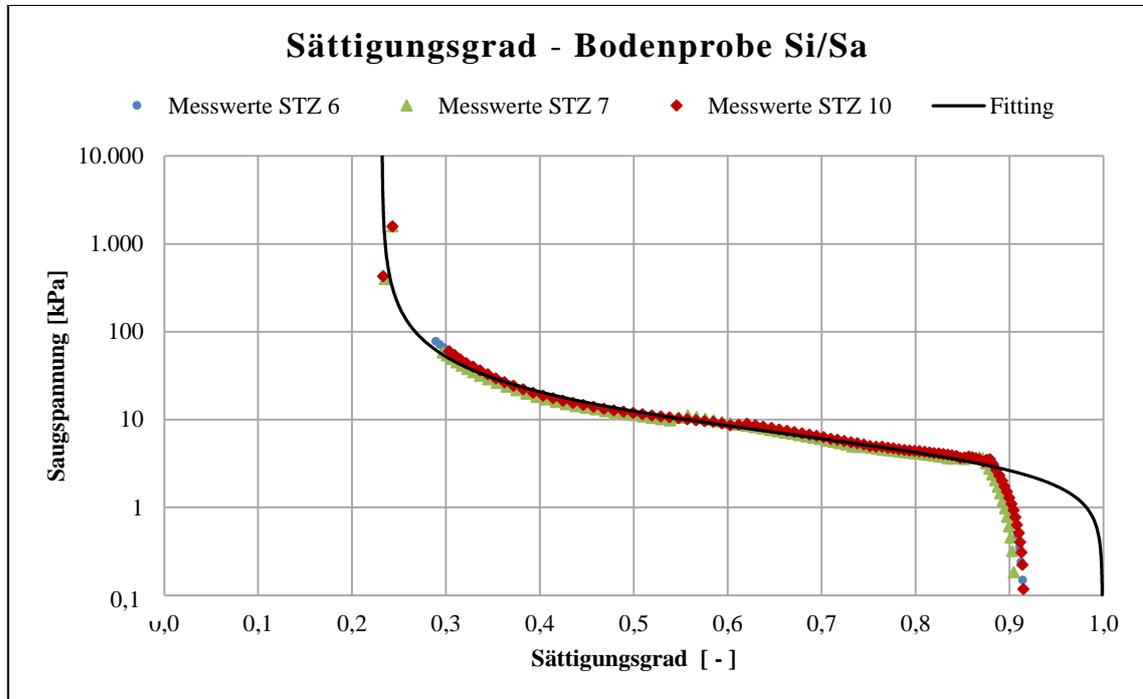


Abb. 50: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si/Sa bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Messwerte der Bodenproben sind farblich dargestellt und reichen bis zu einer Saugspannung von 100 kPa. Der Lufttrittspunkt der Tensiometer wird bei einer Saugspannung von 880 kPa erreicht. Ein weiterer Messpunkt wurde anhand des Drucktopfversuches bei einer Druckstufe von 1.500 kPa bestimmt. In schwarz ist das Fitting der Modelfunktion nach van Genuchten-Mualem dargestellt. Das Fitting trifft die Messdaten der Bodenproben sehr gut und repräsentiert den zusammengefassten Verlauf der Bodenprobe Si/Sa.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve bei der Bodenprobe Si/Sa ist fast ident mit dem Verlauf der Bodenprobe Sa/Si. Er liegt zwischen den Wasserretentionskurven der beiden Bodenproben Sa und Si und stellt eine Kombination der beiden Verläufe dar. Der Anfangswassergehalt als auch der Restwassergehalt bei einer Druckstufe von 1.500 kPa befinden sich daher zwischen den Wassergehalten der einzelnen Bodenproben. Die Entwässerung der Poren beginnt ab einer Saugspannung von ca. 1 kPa. Ähnlich wie bei der Bodenprobe Sa lässt sich das restliche Porenwasser ab einer Saugspannung von 100 kPa nur sehr schwer entwässern. Diese hohe Bindungsstärke des Porenwassers führt auch dazu, dass die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Si/Sa in diesem Bereich stark abnimmt.

Die folgenden 2 Abbildungen stellen die Wasserretentionskurven der Bodenprobe Si/Sa bezogen auf den Wassergehalt in Masseprozent und Volumenprozent dar.

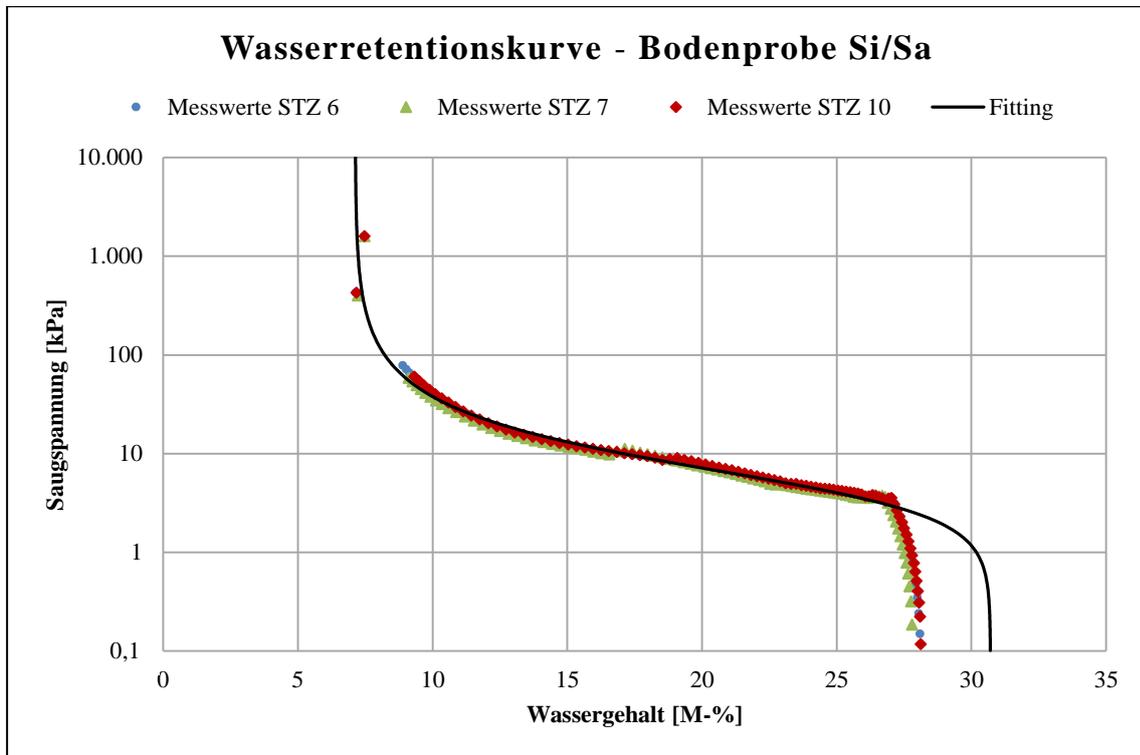


Abb. 51: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si/Sa in Masseprozent

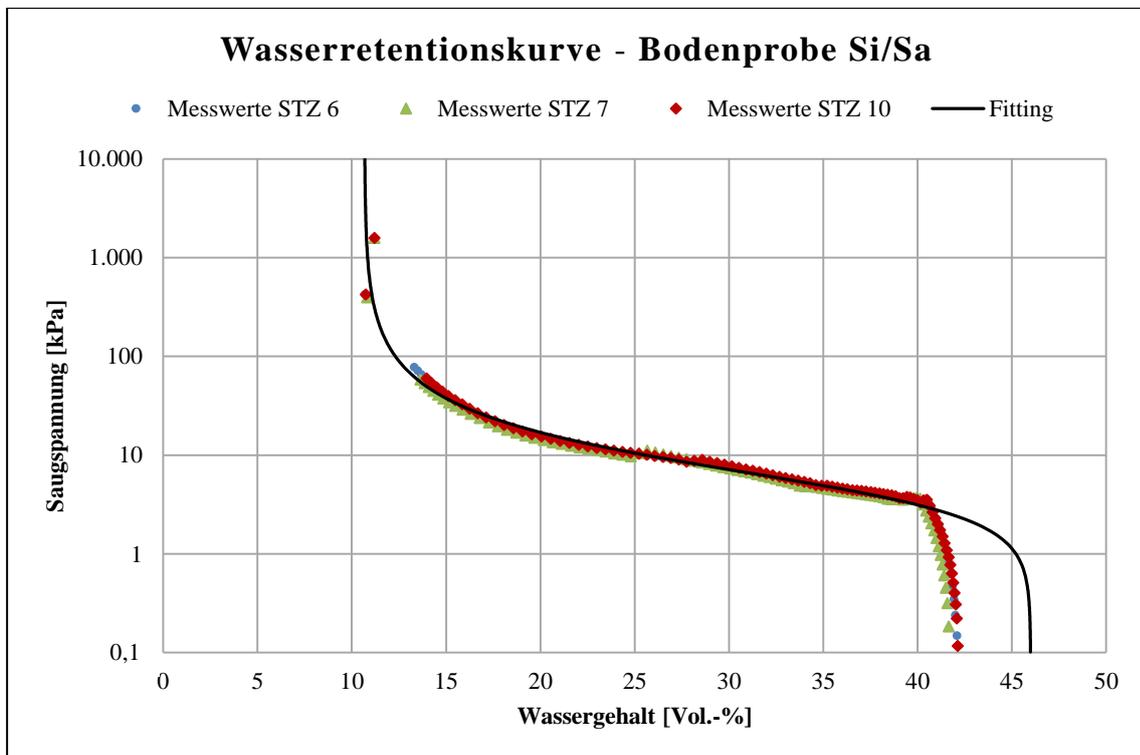


Abb. 52: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Si/Sa in Volumsprozent

Die folgende Tabelle (Tab. 7Tab. 9) stellt die Ergebnisse der gesättigten hydraulischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k im Permeameter und in der Triaxialzelle bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C für die Bodenprobe Si/Sa dar.

Für den geschichteten Aufbau der Bodenprobe wurde auf die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle verzichtet, da die Messergebnisse des Permeameterveruches sehr gut waren und die Bedingungen des HYPROP-Versuches besser wiedergeben. Bei den Messergebnissen ist gut sichtbar, dass die Abweichungen zwischen stationärer und instationärer Messung sehr gering sind.

Tab. 9 Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte k der Bodenprobe Si/Sa

Bodenprobe Si/Sa	Permeameter St. [m/s]	Permeameter Inst. [m/s]	Triaxialzelle $i = 8$ [m/s]	Triaxialzelle $i = 30$ [m/s]
1	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	-	-
2	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	-	-
3	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-6}$	-	-
\bar{x}	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	-	-

In der folgenden Abbildung ist die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit k_h bezogen auf den Sättigungsgrad S_r der Bodenprobe Si/Sa dargestellt. Dabei ist gut zu sehen, dass die hydraulische Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung am größten ist, und mit abnehmender Sättigung abnimmt. Um die Genauigkeit der Modellfunktion zu erhöhen, wurde die gesättigte Durchlässigkeit mit $k = 1,8 \cdot 10^{-6}$ m/s vorgegeben.

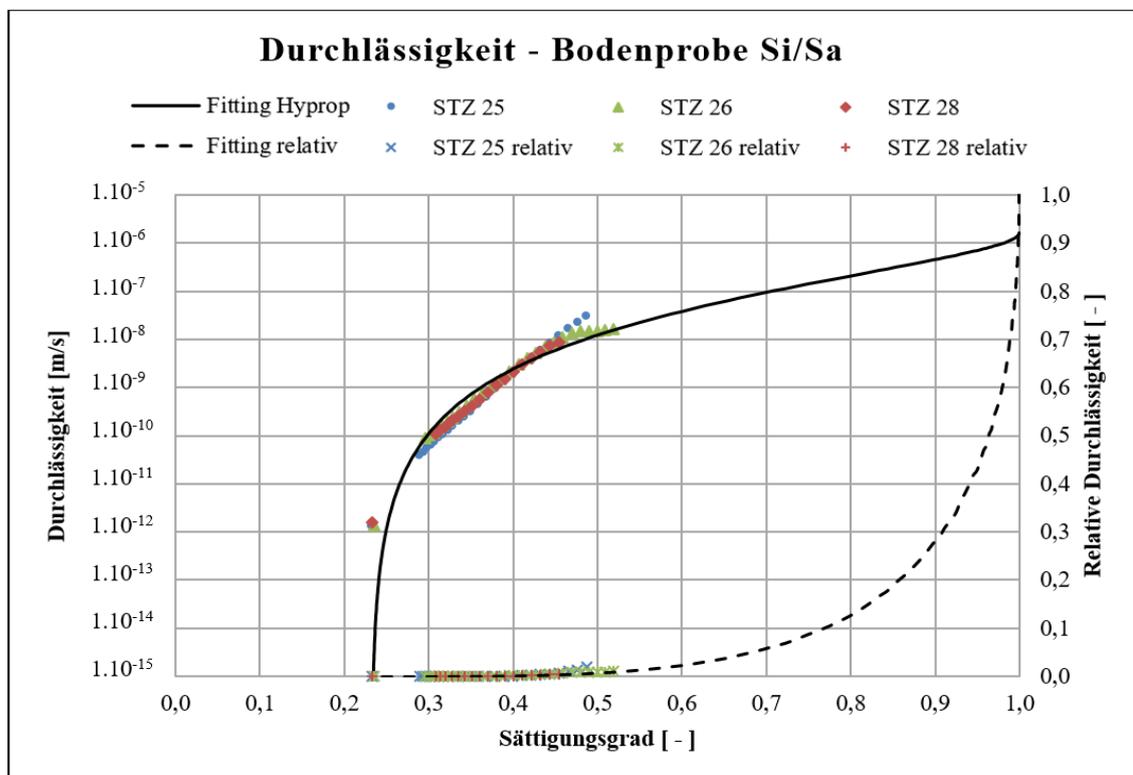


Abb. 53: Durchlässigkeit der Bodenprobe Si/Sa in m/s

6.5 Bodenprobe Sa&Si (Versuchsreihe 5)

Bei der Versuchsreihe 5 wurden die hydraulischen Eigenschaften der Bodenprobe Sa&Si anhand des HYPROP[®]-Versuches überprüft. Die Bodenprobe besteht zu 50 M-% aus dem schluffigen Sand si Sa (siehe Kapitel 3.2) und zu 50 M-% aus dem tonigen Schluff cl Si (siehe Kapitel 3.3). Die beiden Böden wurden miteinander vermischt und in drei Stechzylinder mit einer Höhe von 5 cm und einem Volumen von 250 cm³ gepresst. Anhand der Bodenprobe Sa&Si wurde untersucht, in wie fern sich das hydraulische Verhalten zu den geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa unterscheidet. Die für den HYPROP[®]-Versuch relevanten Parameter können der folgenden Tabelle (Tab. 10) entnommen werden.

Tab. 10 Parameter der Bodenprobe Sa&Si für den HYPROP[®]-Versuch

STZ	w [M-%]	θ [Vol.-%]	m_d [g]	ρ_d [g/cm ³]	ρ_s [g/cm ³]	n [-]	S_r [%]
3	22,6	37,4	411,9	1,65	2,78	0,40	92,3
4	22,6	37,7	415,3	1,67	2,78	0,40	94,3
5	22,4	37,3	415,3	1,67	2,78	0,40	93,2
\bar{x}	22,5	37,5	414,1	1,66	2,78	0,40	93,3

*Stechzylinder

Für den HYPROP[®]-Versuch wurde die Bodenprobe Sa&Si mit einer Trockendichte ρ_d von 1,66 g/cm³ in die Stechzylinder eingebaut.

Die Korndichte ρ_s der Bodenprobe wurde mittels Kapillarpknometerverfahren bestimmt und beträgt 2,78 g/cm³. Mit einer Trockenmasse m_d von 414,1 g und einem Volumen V von 249 cm³ errechnet sich ein Porenanteil n zu 40 %.

Anhand des Sättigungsgrades S_r von 93,3 % ist erkennbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ein Teil des Porenwassers während der Probenvorbereitung verdunstet ist. Daher wurde der Anfangswassergehalt linear auf 100% Sättigung interpoliert und als Fittingparameter θ_s im Auswertungsprogramm HYPROP-FIT[®] vorgegeben.

Bei vollständiger Sättigung der Bodenprobe Sa beträgt der Anfangswassergehalt $w_s = 24,4$ M-%, oder $\theta_s = 40,5$ Vol.-%

Anhand des Drucktopfversuches wurde bei einer Druckstufe von 1.500 kPa ein Restwassergehalt von $w_r = 5,7$ M-%, oder $\theta_r = 9,4$ Vol.-% ermittelt.

In der folgenden Abbildung ist die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa&Si bezogen auf deren Sättigungsgrad dargestellt. Es ist sehr gut sichtbar, dass die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren.

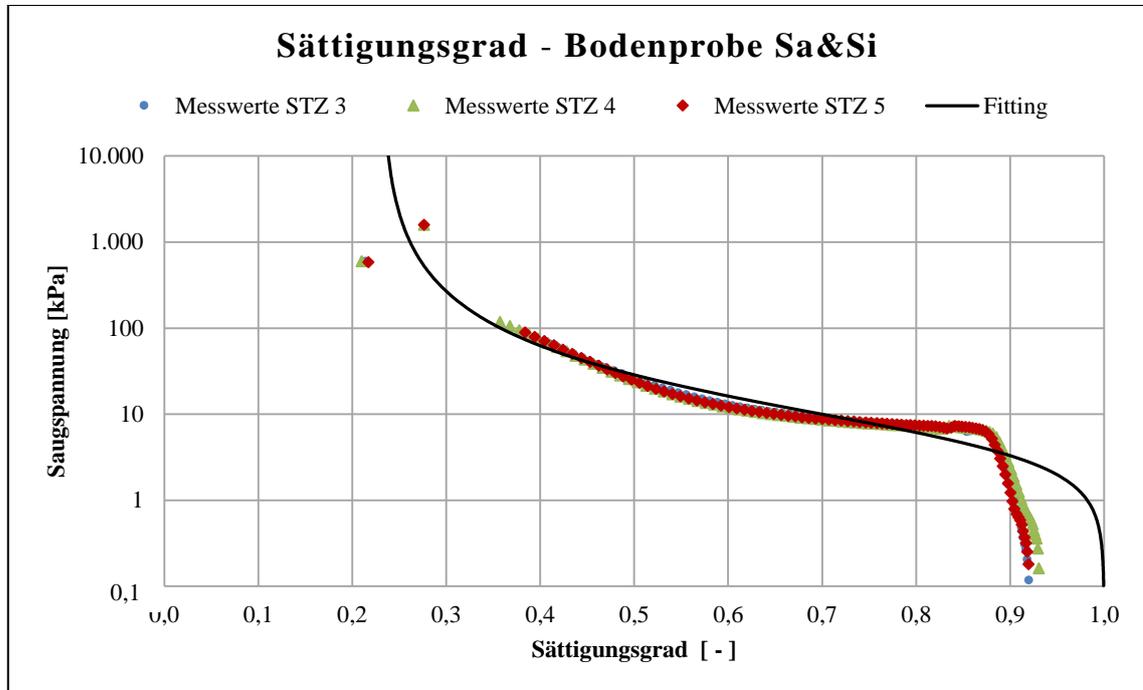


Abb. 54: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa&Si bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Messwerte der Bodenproben sind farblich dargestellt und reichen bis zu einer Saugspannung von 100 kPa. Der Lufteintrittspunkt der Tensiometer wird bei einer Saugspannung von 880 kPa erreicht. Ein weiterer Messpunkt wurde anhand des Drucktopfversuches bei einer Druckstufe von 1.500 kPa bestimmt. In schwarz ist das Fitting der Modelfunktion nach van Genuchten-Mualem dargestellt. Ähnlich wie bei der Bodenprobe Si trifft das Fitting die Messdaten der Bodenproben nicht perfekt. Auch der Sättigungsgrad des Lufteintrittspunktes weicht stark vom dem des Messpunktes des Drucktopfversuches ab.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve bei der Bodenprobe Sa&Si ähnelt stark dem Verlauf der geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa. Er liegt ebenfalls zwischen den Wasserretentionskurven der beiden Bodenproben Sa und Si und stellt eine Kombination der beiden Verläufe dar. Jedoch ist der Verlauf der Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa&Si nicht ganz so steil wie bei den geschichteten Bodenproben, da die Porengrößenverteilung aufgrund der Durchmischung feiner abgestuft ist. Ab einer Saugspannung von 1.000 kPa lässt sich das Porenwasser der Bodenprobe nur sehr schwer entwässern. Diese hohe Bindungsstärke des Porenwassers führt dazu, dass die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Sa&Si in diesem Bereich stark abnimmt.

Die folgenden 2 Abbildungen stellen die Wasserretentionskurven der Bodenprobe Sa&Si bezogen auf den Wassergehalt in Masseprozent und Volumenprozent dar.

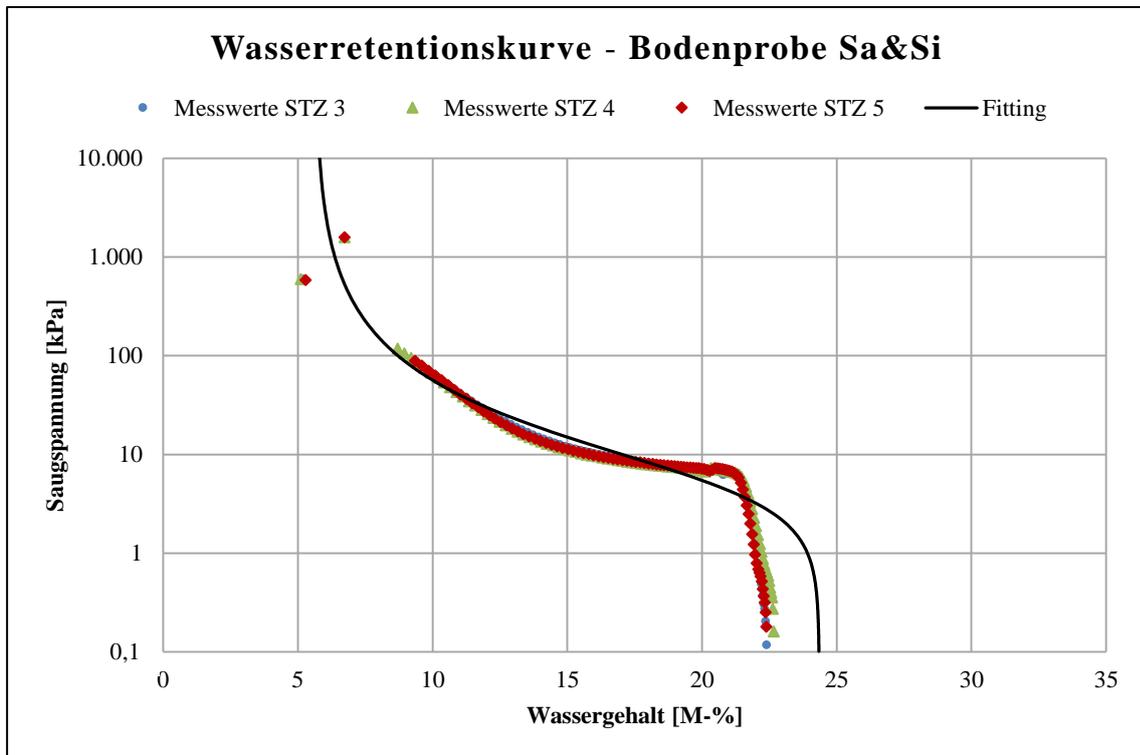


Abb. 55: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa&Si in Masseprozent

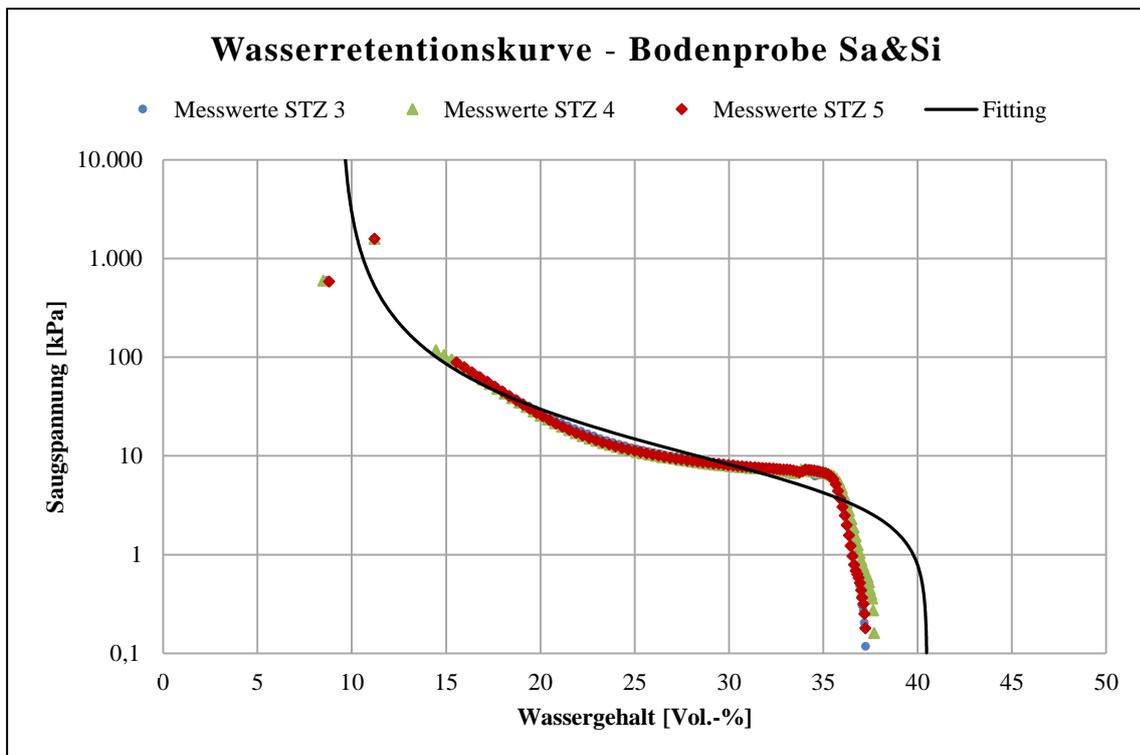


Abb. 56: Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa&Si in Volumsprozent

Die folgende Tabelle (Tab. 11) stellt die Ergebnisse der gesättigten hydraulischen Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k im Permeameter und in der Triaxialzelle bei einer Vergleichstemperatur von 10 °C für die Bodenprobe Sa&Si dar.

Dabei ist gut zu sehen, dass es Abweichungen der Durchlässigkeitsbeiwerte k zwischen Permeameter und Triaxialzelle gibt. Dies deutet darauf hin, dass die Bodenproben in der Triaxialzelle womöglich nicht vollständig gesättigt waren. Nachdem der Gradient i in der Triaxialzelle erhöht wurde, nahm auch die Wasserdurchlässigkeit zu.

Tab. 11 Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte k der Bodenprobe Sa&Si

Bodenprobe Sa&Si	Permeameter St. [m/s]	Permeameter Inst. [m/s]	Triaxialzelle $i = 8$ [m/s]	Triaxialzelle $i = 30$ [m/s]
1	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$
2	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$
3	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$
\bar{x}	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$

In der folgenden Abbildung ist die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit k_h bezogen auf den Sättigungsgrad S_r der Bodenprobe Sa&Si dargestellt. Dabei ist gut zu sehen, dass die hydraulische Leitfähigkeit bei gesättigter Probe am größten ist, und mit abnehmender Sättigung abnimmt. Um die Genauigkeit der Modellfunktion zu erhöhen, wurde die gesättigte Durchlässigkeit mit $k = 2,6 \cdot 10^{-6}$ m/s vorgegeben.

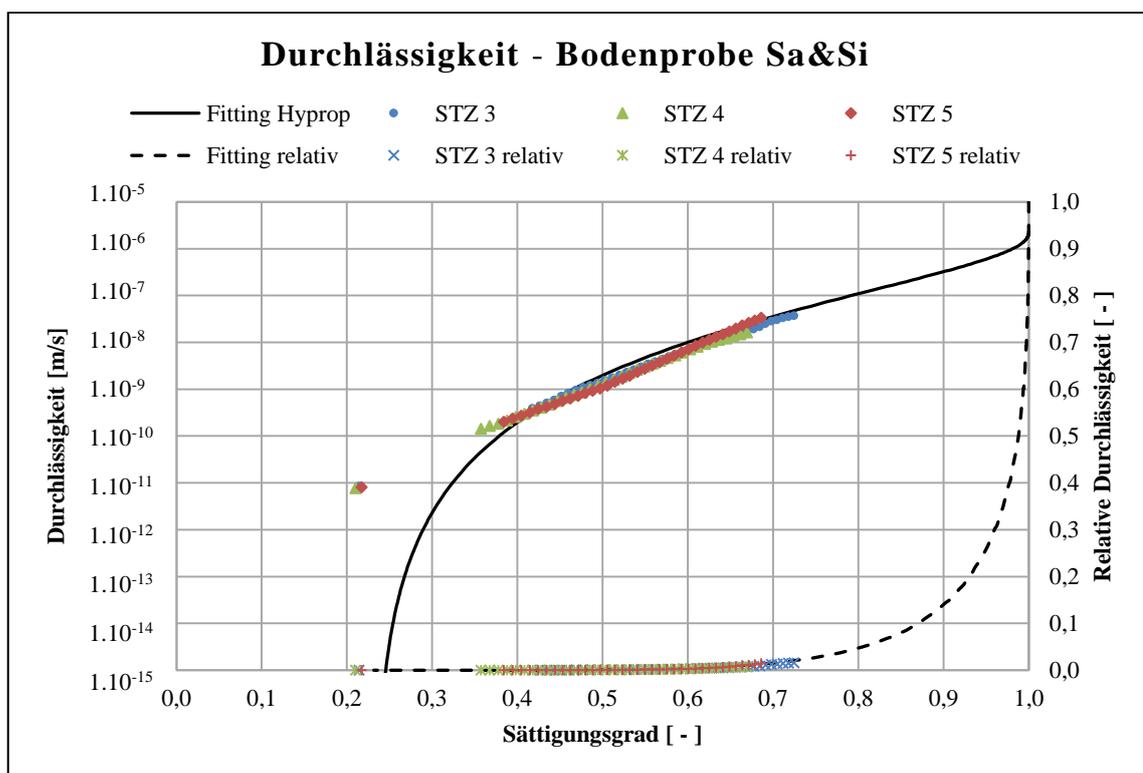


Abb. 57: Durchlässigkeit der Bodenprobe Sa&Si in m/s

7 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Anhand der Gegenüberstellung der Ergebnisse werden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik veranschaulicht. Dazu werden die Wasserretentionskurven und die hydraulische Wasserdurchlässigkeit aller einzelnen Bodenproben (Sa, Si, Sa/Si, Si/Sa, Sa&Si) gegenübergestellt.

In der ersten Gegenüberstellung (siehe Abb. 58) werden die Wasserretentionskurven der Bodenproben bezogen auf deren Sättigungsgrad dargestellt. Da der Sättigungsgrad der Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches auf 100 % interpoliert wurde, spielt der Anfangswassergehalt der Bodenproben keine Rolle. Alle Bodenproben starten daher bei einem Sättigungsgrad von $S_r = 1,0$. Dadurch können die Bodenproben sehr gut miteinander verglichen werden.

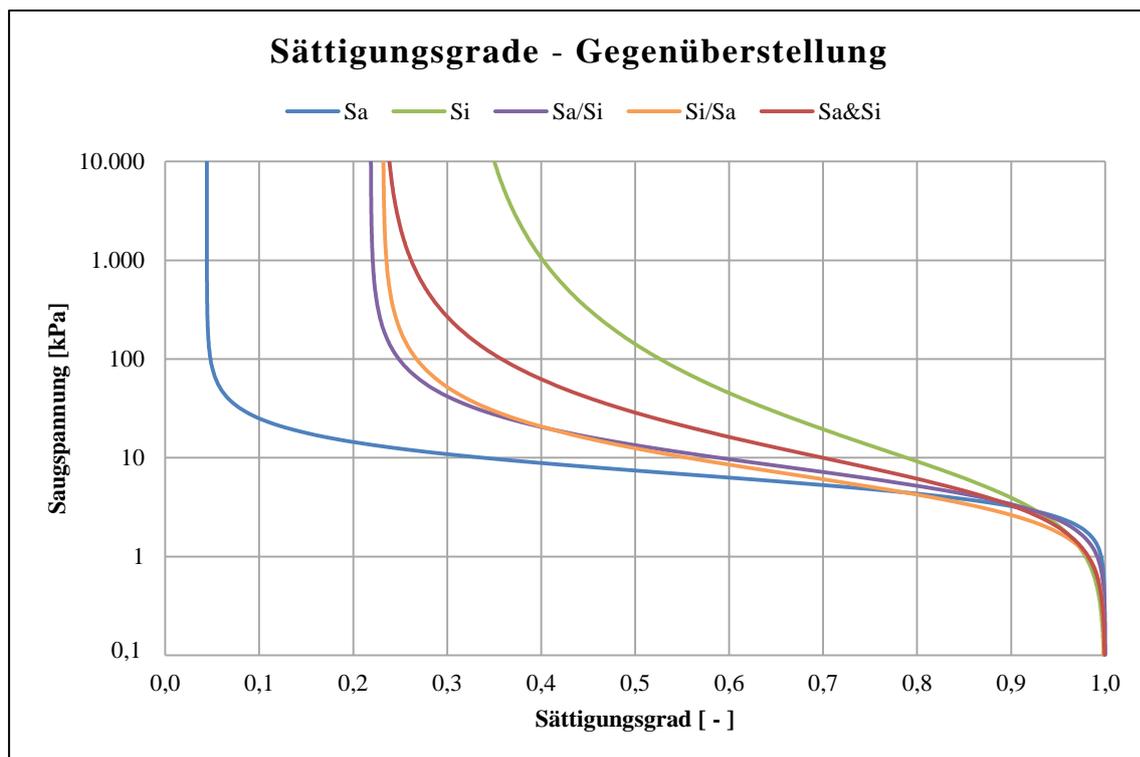


Abb. 58: Gegenüberstellung der Wasserretentionskurven bezogen auf den Sättigungsgrad S_r

Es ist sehr gut sichtbar, dass die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa am steilsten verläuft. Der Großteil des Porenwassers der Bodenprobe Sa ist nur sehr schwach gebunden und weist eine einheitliche Bindungsstärke von 1-50 kPa auf. Die restlichen 5 % des Porenwassers sind in Form von Adsorptionswasser stärker an die Poren der Bodenprobe Sa gebunden und lassen sich auch bei Saugspannungen größer als 100 kPa nur sehr schwer entwässern.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve bei der Bodenprobe Si ist wesentlich flacher als bei der Bodenprobe Sa. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der tonige Schluff eine viel feinere Abstufung der Porengrößenverteilung aufweist als der schluffige Sand. Aufgrund des hohen Tonanteiles von ca. 15% sind rund 40 % des Porenwassers bei einer Saugspannung von 1.000 kPa noch in der Bodenprobe Si gebunden. Mit steigender Saugspannung nimmt auch der Restwassergehalt kontinuierlich ab. Ab einer Saugspannung von 1.000.000 kPa sind für gewöhnlich alle Poren von Böden entleert und als Schranktrocken anzusehen.

In der Gegenüberstellung der Wasserretentionskurven ist sehr gut zu sehen, dass sich die geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa sehr ähnlich sind. Die Wasserretentionskurven liegen wie erwartet zwischen den Kurven der einzelnen Bodenproben Sa und Si. Bei den geschichteten Bodenproben befindet sich beim HYPROP[®]-Versuch jeweils eine Tensiometerspitze im schluffigen Sand und eine im tonigen Schluff. Da sich das Wasserrückhaltevermögen beider Böden unterscheidet werden unterschiedliche Saugspannungen gemessen. Diese werden vom Messprogramm tensioVIEW[®] jedoch gemittelt. Daher kann der Einfluss der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik bei geschichteten Bodenproben nur bedingt mit dem HYPROP[®]-Versuch bestimmt werden. Bei genauerer Betrachtung fällt jedoch auf, dass sich bei sehr geringen Saugspannungen von 0 bis 1 kPa die Bodenprobe Sa/Si wie die Bodenprobe Sa verhält und sich die Bodenprobe Si/Sa wie die Bodenprobe Si verhält. Die bedeutet, dass bei geschichteten Bodenproben bei sehr geringen Saugspannungen die obere Schicht maßgebend für das Wasserrückhaltevermögen ist. Mit abnehmenden Sättigungsgrad der geschichteten Bodenproben steigen die Saugspannungen, welche einen Mittelwert der Saugspannungen der einzelnen Bodenproben bilden. Ebenso ist erkennbar, dass die Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa/Si steiler verläuft als die der Bodenprobe Si/Sa. Weitere geringe Abweichungen der beiden Kurven sind bei der Restwassermenge der geschichteten Bodenproben festzustellen. Die Bodenprobe Sa/Si hat eine leicht geringere Restwassermenge als die Bodenprobe Si/Sa.

Der Verlauf der Wasserretentionskurve der Bodenprobe Sa&Si liegt ebenfalls zwischen den Wasserretentionskurven der einzelnen Bodenproben Sa und Si. Die Bodenprobe Sa&Si stellt eine Durchmischung der einzelnen Bodenproben Sa und Si dar. Die Porengrößenverteilung ist daher feiner als bei den geschichteten, nicht durchmischten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa. Dies führt zu einem flacheren Verlauf der Wasserretentionskurve als bei den geschichteten Proben.

In der zweiten Gegenüberstellung (siehe Abb. 59) werden die Wasserretentionskurven der Bodenproben bezogen auf deren effektiven Sättigungsgrad S_e dargestellt. Anhand dieser Darstellung beginnen die Wasserretentionskurven bei einem Anfangswassergehalt von 100 % effektiver Sättigung und enden bei einem Restwassergehalt von 0 % effektiver Sättigung. Diese Darstellung ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Wasserretentionskurven der Bodenproben bezüglich deren Porengrößenverteilung, da deren Anfangswassergehalt und deren Restwassergehalt vernachlässigt werden. Je flacher die Kurve ist, desto feiner ist die Abstufung der Porengrößen.

Der effektive Sättigungsgrad S_e errechnet sich wie folgt:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (42)$$

S_e	[-]	effektiver Sättigungsgrad der Bodenprobe
θ	[Vol.-%]	volumetrischer Wassergehalt der Bodenprobe
θ_r	[Vol.-%]	residualer Wassergehalt der Bodenprobe
θ_s	[Vol.-%]	Wassergehalt bei Sättigung der Bodenprobe

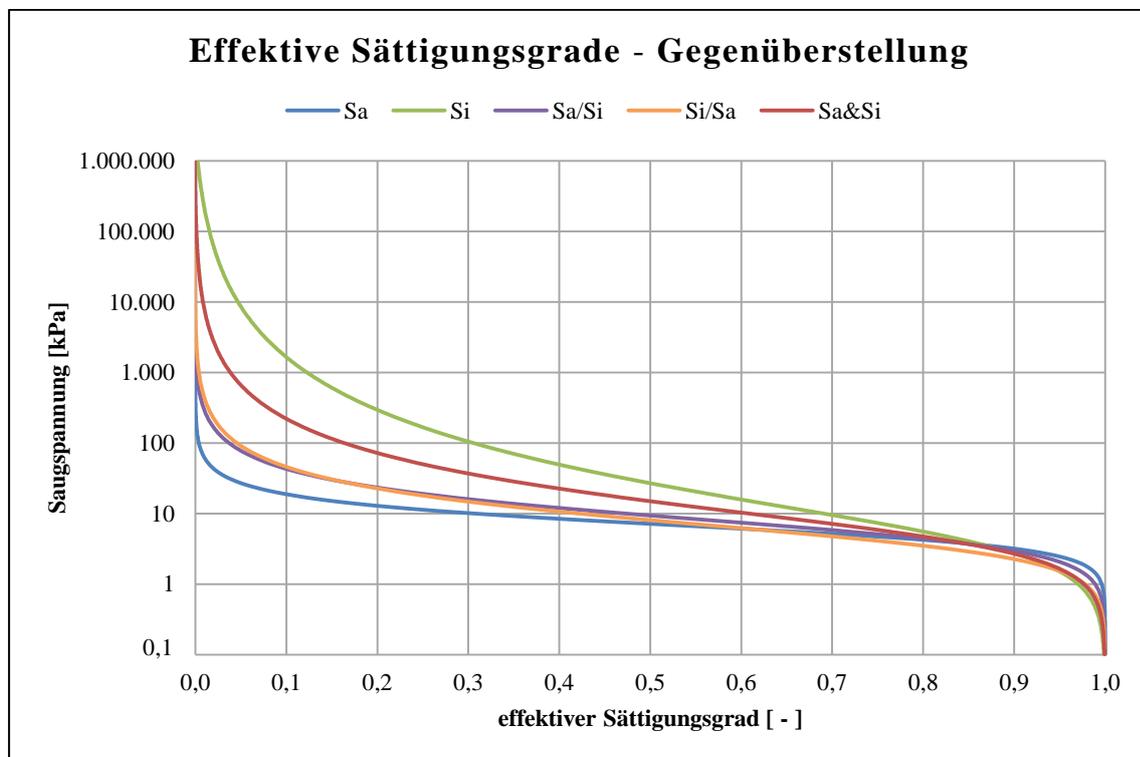


Abb. 59: Gegenüberstellung der Wasserretentionskurven bezogen auf den effektiven Sättigungsgrad S_e

In den folgenden Abbildungen (Abb. 60 und 61) werden die Wasserretentionskurven der Bodenproben bezogen auf deren Wassergehalt in Masseprozent und in Volumsprozent dargestellt. Es ist sehr gut sichtbar, dass sich die Anfangswassergehalte und die Restwassergehalte zwischen den einzelnen Bodenproben unterscheiden. Wie stark das Restwasser in den Poren der Bodenproben gebunden ist hängt vor allem von deren Porengröße ab. Der tonige Schluff der Bodenprobe Si hat die geringsten Porengrößen und somit den größten Restwassergehalt. Der schluffige Sand der Bodenprobe Sa hat hingegen den geringsten Restwassergehalt. Die Höhe des Anfangswassergehaltes der gesättigten Bodenproben ist ausschließlich abhängig von deren Porenanteil n . Der Porenanteil n einer Bodenprobe ist definiert als das Verhältnis zwischen Porenvolumen V_0 zum Gesamtvolumen V (siehe Gleichung 5). Daraus leitet sich der Porenanteil n wie folgt ab:

$$n = \frac{V_0}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (43)$$

n	[-]	Porenanteil
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte

Da die Korndichten der Bodenproben ρ_s mit 2,77 g/cm³ und 2,78 g/cm³ fast gleich groß sind, hängt der Porenanteil n ausschließlich von der Trockendichte ρ_d der Bodenproben ab. Je höher die Trockendichte ρ_d ist, desto geringer ist der Porenanteil n , desto geringer ist der Anfangswassergehalt der Bodenproben. In der folgenden Tabelle (Tab. 12) sind die Trockendichten ρ_d der Bodenproben dargestellt.

Tab. 12 Übersicht der Trockendichten ρ_d der Bodenproben

Bodenprobe	Sa	Si	Sa/Si	Si/Sa	Sa&Si
Trockendichte ρ_d [g/cm ³]	1,40	1,65	1,50	1,50	1,66

Die Bodenprobe Sa hat die geringste Trockendichte und somit den größten Anfangswassergehalt. Den geringsten Anfangswassergehalt haben die Bodenproben Si und Sa&Si. Der Anfangswassergehalt der geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa befindet sich zwischen den Anfangswassergehalten der einzelnen Bodenproben Sa und Si.

Der gravimetrische Wassergehalt w bezieht sich auf die Trockenmasse der Bodenproben und auf den zu Verfügung stehenden Porenraum. Multipliziert man den gravimetrischen Wassergehalt w mit der Trockendichte ρ_d der Bodenproben, so ergibt sich der volumetrische Wassergehalt θ , welcher sich auf das Gesamtvolumen der Bodenproben bezieht.

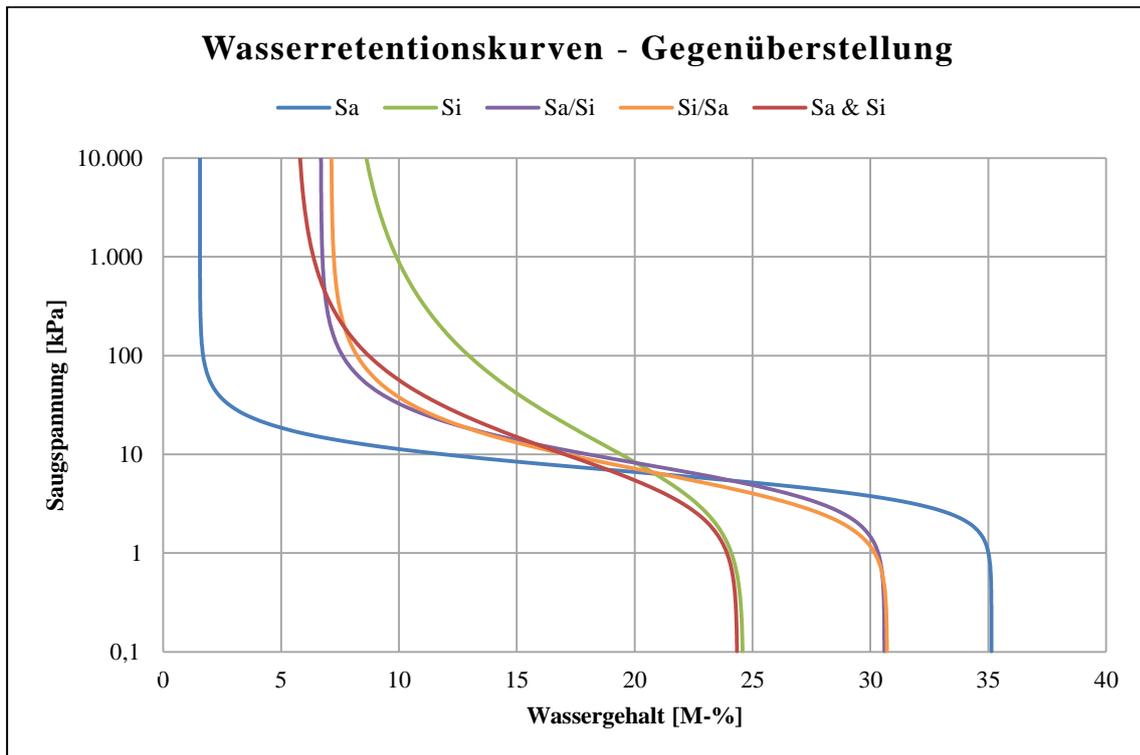


Abb. 60: Gegenüberstellung der Wasserretentionskurven in Masseprozent

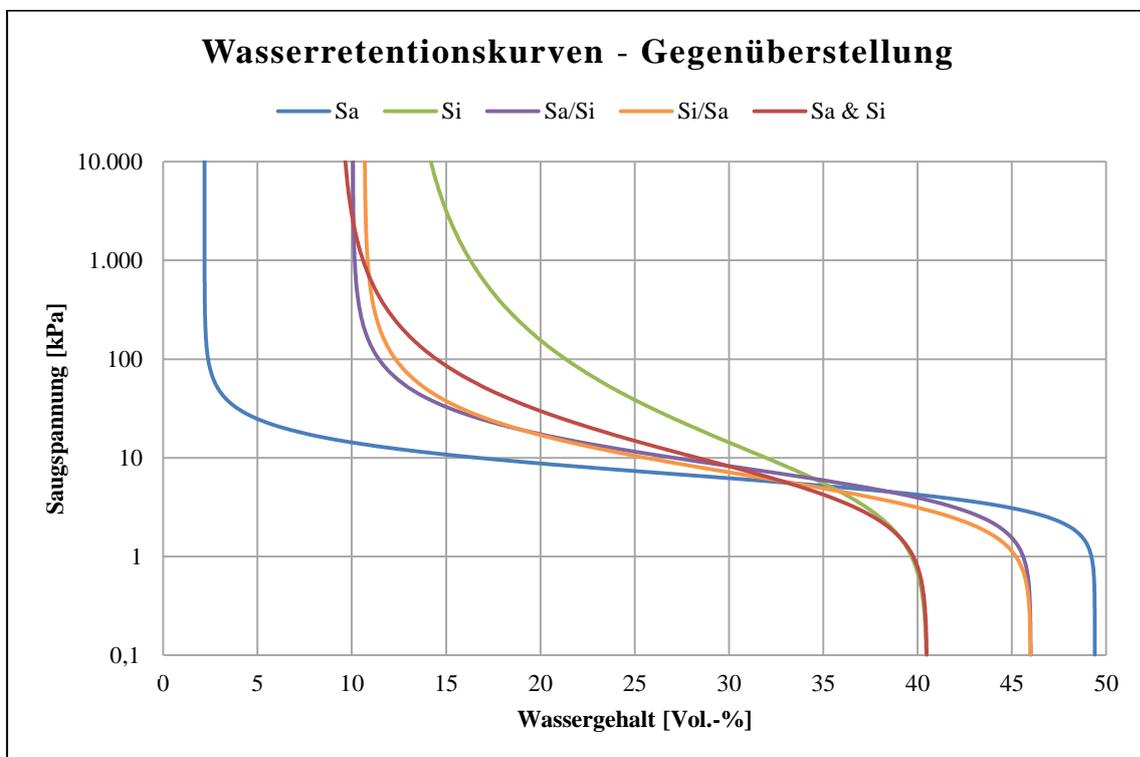


Abb. 61: Gegenüberstellung der Wasserretentionskurven in Volumsprozent

In der folgenden Abbildung (Abb. 62) ist die hydraulische Wasserdurchlässigkeit der einzelnen Bodenproben bezogen auf deren Sättigungsgrad S_r dargestellt. Auf der linken Ordinate ist die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit $k_{(h)}$ abgebildet, auf der rechten Ordinate die relative ungesättigte Wasserdurchlässigkeit $k_{r(h)}$.

Anhand HYPROP[®]-Versuch wurde die relative ungesättigte Durchlässigkeit $k_{r(h)}$ der Bodenproben bestimmt. Die ungesättigte Wasserdurchlässigkeit $k_{(h)}$ errechnet sich durch die Multiplikation der gesättigten Durchlässigkeit k mit der relativen ungesättigten Durchlässigkeit $k_{r(h)}$ (siehe Gleichung 41)

Bei vollständiger Sättigung ist die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenproben am größten. Mit abnehmender Sättigung steigt die Saugspannung zwischen den Wassermolekülen und den Bodenteilchen, was zur Folge hat, dass die hydraulische Leitfähigkeit der Böden abnimmt. Sobald der Wassergehalt der Bodenprobe dem residualen Wassergehalt entspricht, findet laut dem Constrained van Genuchten-Mualem Modell keine Wasserbewegung in den Böden statt.

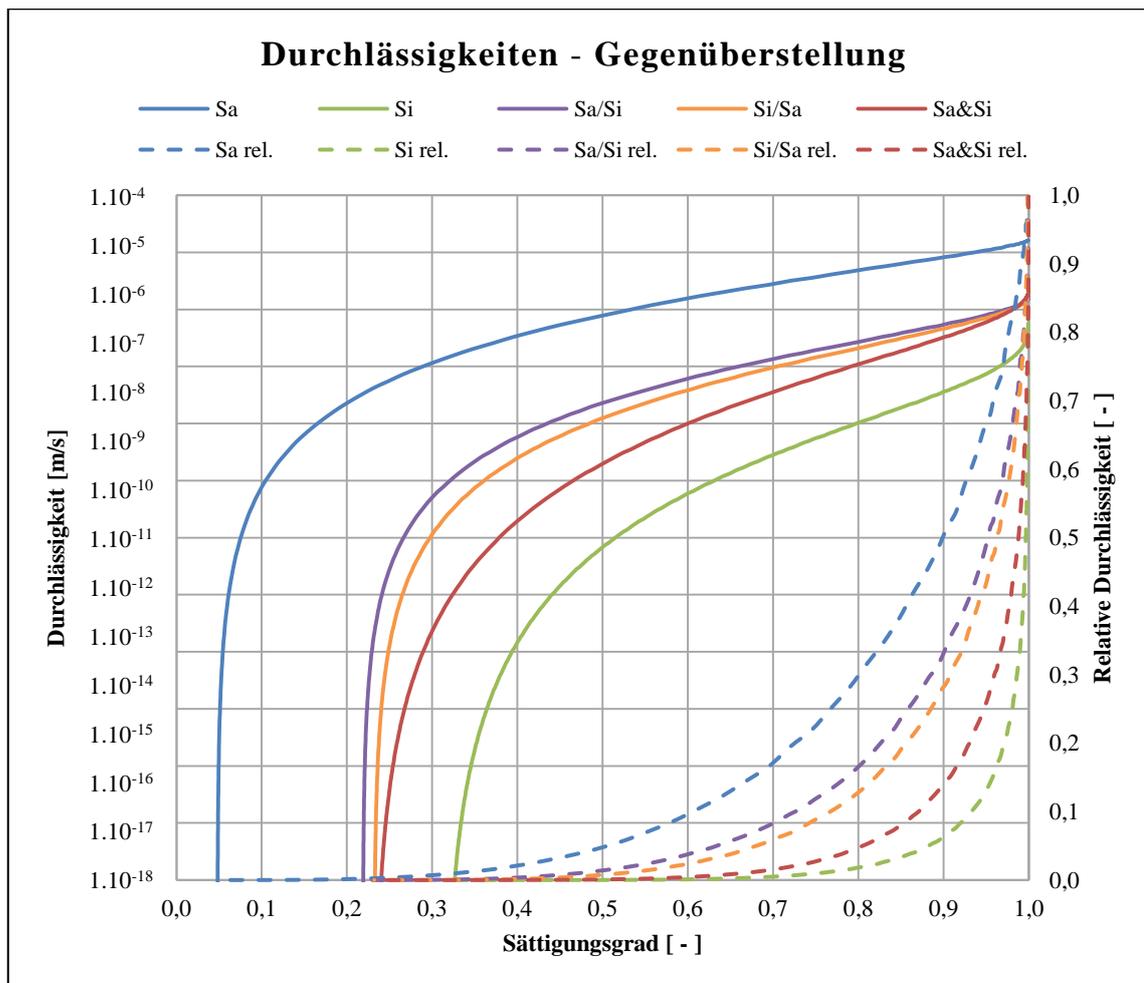


Abb. 62: Gegenüberstellung der Durchlässigkeiten bezogen auf den Sättigungsgrad S_r

Die Bodenprobe Sa hat mit einem gesättigten Durchlässigkeitskoeffizienten von $k = 1,6 \cdot 10^{-5}$ m/s die größte hydraulische Leitfähigkeit. Ab einem Sättigungsgrad von ca. 10 % nimmt die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Sa stark ab, was aufgrund der starken Saugspannungszunahme in der Wasserretentionskurve zurückzuführen ist. Nimmt der Sättigungsgrad der Bodenprobe Sa weiter ab, so nähert sich deren Wassergehalt dem residualen Wassergehalt bei einem Sättigungsgrad von 4 %, was zur Folge hat, dass die hydraulische Leitfähigkeit gegen null geht.

Mit der am feinsten abgestuften Korngrößenverteilung und dem größten Anteil an Feinkörnern weist die Bodenprobe Si die geringste gesättigte Wasserdurchlässigkeit von $k = 5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s auf. Die feine Abstufung der Korngrößenverteilung als auch die Porengrößenverteilung der Bodenprobe Si verlaufen flacher als bei der Bodenprobe Sa. Diese feine Abstufung der Porenverteilung führt dazu, dass sich die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Si bei einer Reduktion des Sättigungsgrades stärker verringert als die hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Sa. Ab einem Sättigungsgrad von 31 % entspricht der Wassergehalt dem residualen Wassergehalt und die Bodenprobe Si leitet kein Wasser mehr.

Der gesättigte Durchlässigkeitskoeffizient der geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa beträgt ca. $k = 1,6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Die Wasserretentionskurven als auch die hydraulische Leitfähigkeit der geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa stellen eine Kombination der einzelnen Bodenproben Sa und Si dar und ähneln sich stark. Ab einem Sättigungsgrad von ca. 25 % nimmt die hydraulische Leitfähigkeit der geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa stark ab, was aufgrund der starken Saugspannungszunahme in den Wasserretentionskurven zurückzuführen ist. Ab einem Sättigungsgrad von 22 % bis 23 % entspricht der Wassergehalt der Bodenproben dem residualen Wassergehalt, so dass die hydraulische Leitfähigkeit gegen null geht. Die teilgesättigte hydraulische Leitfähigkeit der Bodenprobe Si/Sa ist gering höher als bei der Bodenprobe Sa/Si da die Bodenprobe Si/Sa bei gleichem Sättigungsgrad etwas höhere Saugspannungen aufweist, als die Bodenprobe Sa/Si.

Die Bodenprobe Sa&Si hat einen gesättigten Durchlässigkeitskoeffizienten von $k = 2,6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Die Kurve der hydraulischen Leitfähigkeit der Bodenprobe Sa&Si verläuft ähnlich wie die Kurven der geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa. Aufgrund der feineren Porengrößenverteilung der durchmischten Bodenprobe Sa&Si verringert sie deren hydraulische Leitfähigkeit bei einer Reduktion des Sättigungsgrades stärker, als bei den geschichteten Bodenproben Sa/Si und Si/Sa. Ab einem Sättigungsgrad von 23 % entspricht der Wassergehalt dem residualen Wassergehalt und die Bodenprobe Si leitet kein Wasser mehr.

Die folgende Tabelle (Tab. 13) stellt die anhand des HYPROP[®]-Versuches ermittelten Parameter der Bodenproben dar. In je fünf Versuchsreihen wurden die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik anhand der folgenden fünf Bodenproben Sa, Si, Sa/Si, Si/Sa, Sa&Si untersucht. Die Messpunkte wurden mit dem Constrained van Genuchten-Mualem Modell angenähert (gefittet).

In der Spalte gefittet steht die 1 dafür, dass die Parameter nach dem Constrained van Genuchten-Mualem Modell angenähert wurden und die 0 dafür, dass die Parameter händisch vorgegeben wurden. Der Anfangswassergehalt bei Sättigung der Bodenproben θ_s und w_s wurde vorgegeben, da die Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches nicht vollständig gesättigt waren. Ebenso wurde der Wasserdurchlässigkeitskoeffizient k vorgegeben, da er anhand der Wasserdurchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle und Permeameter bestimmt wurde.

Die ermittelten Parameter repräsentieren die bereits beschriebenen Gegenüberstellungen der Bodenproben bezüglich deren Wasserretentionskurven und deren Wasserdurchlässigkeit.

α ist ein Parameter, welcher die Lage des Wendepunktes der Retentionskurve bestimmt. n bestimmt die Steilheit der Retentionskurve. Beim Constrained-Modell ist der zusätzliche Kurvenparameter m definiert als Funktion des Parameters n (siehe Gleichung 39). Der residuale Wassergehalt in Volumsprozent θ_r und in Masseprozent w_r ist nach dem Modell von van Genuchten-Mualem definiert bei einer Saugspannung von 15.000 kPa. Der Anfangswassergehalt in Volumsprozent θ_s und in Masseprozent w_s stellt den Wassergehalt der Bodenproben zu Beginn des HYPROP[®]-Versuches bei vollständiger Wassersättigung dar. k ist die Wasserdurchlässigkeit der Bodenproben bei vollständiger Wassersättigung.

Tab. 13 Gegenüberstellung der Parameter des HYPROP[®]-Versuches

Parameter der Verdunstungsmethode - Gegenüberstellung							
Fitting	Parameter	Sa	Si	Sa/Si	Si/Sa	Sa&Si	Einheit
1	α	1,73	2,08	1,67	2,14	1,83	1/m
1	n	2,94	1,38	2,16	2,00	1,62	-
1	m	0,66	0,28	0,54	0,50	0,38	-
1	θ_r	2,2	12,7	10,1	10,7	9,4	Vol.-%
1	w_r	1,6	7,7	6,7	7,1	5,7	M-%
0	θ_s	49,4	40,5	46,0	46,0	40,5	Vol.-%
0	w_s	35,1	24,6	30,6	30,7	24,4	M-%
0	k	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	m/s

8 Schlussfolgerung und Ausblick

Ziel dieser Masterarbeit war es, die Auswirkungen der Bodenheterogenität auf die ungesättigte Bodenhydraulik zu untersuchen. Dabei wurden die Wasserdurchlässigkeit und das Wasserrückhaltevermögen für gesättigte als auch für teilgesättigte Böden anhand des HYPROP[®]-Versuches bestimmt.

Anhand des HYPROP[®]-Versuches wurde festgestellt, dass das Wasserrückhaltevermögen sowie die Wasserdurchlässigkeit bei teilgesättigten Böden von der Saugspannung zwischen den Wassermolekülen und den Bodenteilchen abhängig ist. Die Höhe der Saugspannung unterscheidet sich je nach Bodenart und Trockendichte. Je kleiner die Poren des Bodens sind, desto größer ist die Saugspannung mit der die Bodenteilchen das gespeicherte Porenwasser zurückhalten und umso geringer ist die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens. Die Korngrößenverteilung spiegelt die Porengrößenverteilung eines Bodens wider. Je mehr Feinkörner ein Boden aufweist, desto mehr Feinporen besitzt der Boden. Auch die Trockendichte wirkt sich auf die Porengrößen des Bodens aus, da eine Erhöhung der Trockendichte zu geringeren Porengrößen führt. Die Auswirkungen von geschichteten Böden auf die ungesättigte Bodenhydraulik konnte anhand des HYPROP[®]-Versuches nur zum Teil bestimmt werden, da die Messwerte der beiden Tensiometer von der Auswertungssoftware HYPROP-FIT[®] gemittelt wurden. Somit stellten die gemessenen Saugspannungen eine Kombination der Saugspannungen aus den einzelnen Böden dar. Aus diesem Grund ergab die Anordnung der Schichtreihenfolge auch keine signifikanten Unterschiede.

Das Wasserrückhaltevermögen der Böden wurde anhand der Wasserretentionskurven bestimmt. Die Wasserretentionskurve kennzeichnet die Wasserspeichereigenschaften des Bodens und spiegelt die Porengrößenverteilung wider. Sie stellt die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung dar. Anhand der Versuche wurde festgestellt, dass der Anfangswassergehalt eines vollständig gesättigten Bodens deren Porenanteil entspricht. Der residuale Wassergehalt ist hingegen ausschließlich von den Feinporen des Bodens abhängig.

Die Wasserdurchlässigkeit von Böden ist bei vollständiger Sättigung am größten. Mit abnehmender Sättigung steigt die Saugspannung zwischen den Wassermolekülen und den Bodenteilchen, was zur Folge hat, dass die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens abnimmt, da ein Teil des eingeströmten Wassers zur Sättigung der Poren dient. Bei den Durchlässigkeitsversuchen mittels Triaxialzelle und Permeameter wurde festgestellt, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte bei den feinkörnigen Bodenproben leichte Abweichungen zeigten. Diese Abweichungen deuten darauf hin, dass die Bodenproben in der Triaxialzelle nicht vollständig gesättigt waren.

Im Permeameter wurden die Poren der Bodenproben durch regelmäßige Wasserzugabe von unten nach oben, zufolge der Kapillarität, gesättigt. Hingegen wurden die Poren der Bodenproben in der triaxialen Zelle nicht wie im Permeameter vorgesättigt, sondern anhand des Durchströmungsdruckes gesättigt. Dabei ist anzunehmen, dass der Durchströmungsdruck in der triaxialen Zelle nicht hoch genug für eine vollständige Sättigung der Feinporen war und eine höhere Sättigung im Permeameter zufolge Kapillarität erreicht wurde.

Da es in der Literatur noch sehr wenig Auskunft über das Aufsättigungsverhalten von teilgesättigten Böden gibt, glaube ich, dass es in diesem Bereich noch viele Möglichkeiten für zukünftige Forschung gibt. Forschung in diesem Bereich würde ebenfalls dazu führen, das Hysterese Verhalten von Böden besser zu verstehen. Mehr Kenntnis über das Wasserrückhaltevermögen und die Wasserdurchlässigkeit im gesättigten als auch im teilgesättigten Bereich könnten dazu führen, ein mögliches Versagen im Hinblick auf die Böschungstabilität von Hängen besser voraussagen zu können.

9 Literaturverzeichnis

ÖNORM B 4422-1:1992

ÖNORM B 4422-1 (1992-07-01), Erd- und Grundbau – Untersuchung von Bodenproben – Teil 1: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit – Laborprüfungen, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN 13286-2:2012

ÖNORM EN 13286-2 (2012-10-01), Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz- Trockendichte und der Wassergehaltes – Proctorversuch, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 14688-1:2002 + A1:2013

ÖNORM EN ISO 14688-1 + A1 (2013-11-15), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 1: Benennung und Beschreibung – Änderung 1 (ISO 14688 1:2002 + Amd 1:2013), Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 + A1:2013

ÖNORM EN ISO 14688-2 + A1 (2013-07-29), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen – Änderung 1 (ISO 14688 2:2004 + Amd 1:2013), Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 17892-1:2014

ÖNORM EN ISO 17892-1 (2015-06-15), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 1: Bestimmung des Wassergehaltes, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 17892-2:2014

ÖNORM EN ISO 17892-2 (2015-06-15), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 2: Bestimmung der Dichte des Bodens, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 17892-3:2015

ÖNORM EN ISO 17892-3 (2015-12-15), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 3: Bestimmung der Korndichte, Ausgabe 2016-08-15, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN ISO 17892-4:2016

ÖNORM EN ISO 17892-4 (2017-05-01), Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM L 1063:2006

ÖNORM L 1063 (2006-04-01), Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Drucktopf mit keramischer Platte, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM L 1065:2006

ÖNORM L 1063 (2006-12-01), Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in gesättigten Stechzylinderproben, Österreichisches Normeninstitut, Wien

Boley, C. (Hrsg.) (2012)

Handbuch der Geotechnik – Grundlagen – Anwendungen – Praxiserfahrungen, Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

Coldewey, W.G., Hölting B. (2013)

Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

Eijkelkamp (2017)

Labor Permeameter, Gebrauchsanleitung, Version 2017-03, Eijkelkamp Soil & Water Foundation, P.O. Box 4, 6987 ZG Giesbeek

Mualem, Y. (June 1976)

A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resour. Res.* 12 (3):513-522

Scheffer, F., Schachtschabel, P. (2010)

Lehrbuch der Bodenkunde, 16. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

Schindler, U. (2010)

The evaporation method: Extending the measurement range of soil hydraulic properties using the air-entry pressure of the ceramic cup, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 173:563-572

Tarantino, A., Jommi, C. (2005)

Proceedings of the Hydraulic and Mechanical Behaviour of Unsaturated Soils – Experimental Evidence and Constitutive Modelling, Trento

UMS (2015)

Bedienungsanleitung HYPROP®, Version 2015-01, 96 pp. UMS-GmbH, Gmunder Straße 37, 81379 München

Van Genuchten, M. Th (1980)

A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal* 44:892-898

Vanapalli, S.K., Fredlund, D.G., Pufahl, D.E. (1999)

The influence of soil structure and stress history on the soil- water characteristics of a compacted till, *Geotechnique*, 49 (2): 143-159

Wyckoff, R.D., Botset, H.G. (1936)

The flow of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands, *Physics*, Vol. 7, pp. 325 -345

Anhang

- Anhang A:
Bestimmung der Korngrößenverteilung gemäß
ÖNORM EN ISO 17892-4:2017
- Anhang B:
Bestimmung der Korndichte gemäß
ÖNORM EN ISO 17892-3:2016
- Anhang C:
Ermittlung der Standard-Proctorkurve gemäß
ÖNORM EN 13286-2:2012
- Anhang D:
Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Triaxialzelle gemäß
ÖNORM B 4422-1:1992
- Anhang E:
Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit mittels Permeameter gemäß
ÖNORM L 1065:2006
- Anhang F:
Drucktopfversuch gemäß
ÖNORM L 1063:2006
- Anhang G:
HYPROP[®]-Versuch gemäß
Bedienungsanleitung HYPROP[®], Version 2015-01

A 1 Kornverteilungskurve schluffiger Sand



INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU
GEOTECHNISCHES LABOR

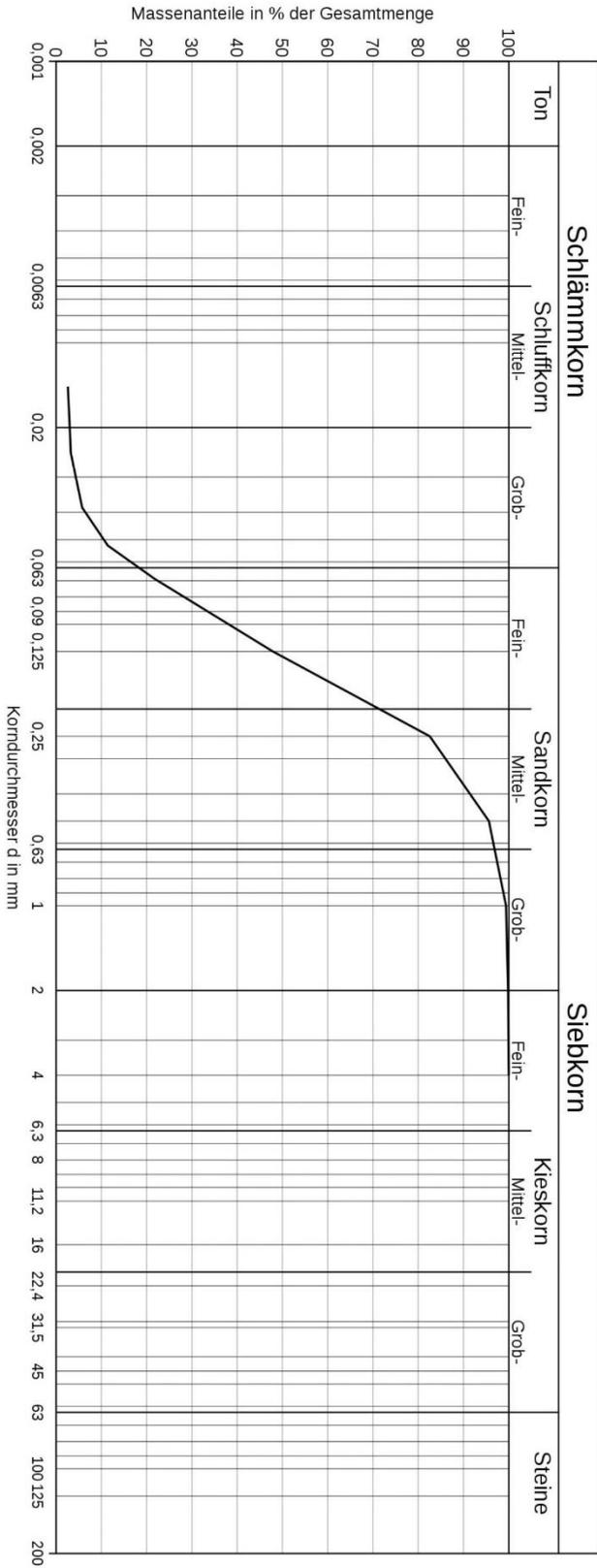
A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA
Tel.: +43 (0) 316 873-6237 Fax: +43 (0) 316 873-6238



IBG

Auftraggeber Institut für Bodenmechanik und Grundbau	Projekt Masterarbeit	Proj. Nr. 1	Bezeichnung Kornverteilung	Tiefe -	Bearb. Gruber	Datum 30.03.17 - 04.04.17
---	-------------------------	----------------	-------------------------------	------------	------------------	------------------------------

KÖRnungSLINIE



Lab.Nr. 19738	Signatur —	Anteile kleiner Ø [mm] 0,063: 18,3	Ton -	Schluff -	Sand 81,5	Kies 0,2	Steine -	Anteile größer Ø [mm] -	Bodenart Sa	D10 0,0486mm	D30 0,0832mm	D60 0,1592mm	Cu 3,28	Cc 0,89
------------------	---------------	---------------------------------------	----------	--------------	--------------	-------------	-------------	----------------------------	----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------	------------

A 1 Messprotokoll Kornverteilung schluffiger Sand

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 1	LABORNUMMER: 19738
	BODENART: si Sa	AUFTRAGSNUMMER -
PROJEKT: Masterarbeit	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 04.04.2017

Kornverteilung

Siebanalyse		
Maschenweite	Rückstand	Σ Rückstand
[mm]	[g]	[g]
63		
45		
31,5		
16		
8		
4	-	
2	1,4	
1	5,2	
0,5	38	
0,25	150,9	
0,125	450,6	
0,063		
0,05		
0,04		
0,032		
0,02		
Summe		
Durchgang durch feinstes Sieb trocken	414,8	
Masse des Siebgutes trocken	865,4	

Durchgang durch feinstes Sieb feucht	
Wassergehalt	
Druch durch feinstes Sieb trocken	

Schlammalyse				
Zylindernummer				18
Einwaage trocken		[g]		45,0
Korndichte		[g/cm ³]		2,78
Datum	Uhrzeit	Zeit	Temp.	Lesung R
04.04.2017	7:40	[min]	[°C]	
		0,5	23,0	11,5
		1,0	23,0	5,3
		2,0	23,0	1,9
		5,0	23,0	0,4
		15	23,0	0,0
		45		
		120		
		360		
		1440		

Wassergehalt		
Masse Probe feucht + Behälter		
Masse Probe trocken + Behälter	1074,6	
Masse Behälter	659,8	
Masse Probe feucht		
Masse Probe trocken	414,8	
Masse Wasser		
Wassergehalt		
Einwaage feucht		
Einwaage trocken		

A 2 Kornverteilungskurve toniger Schluff

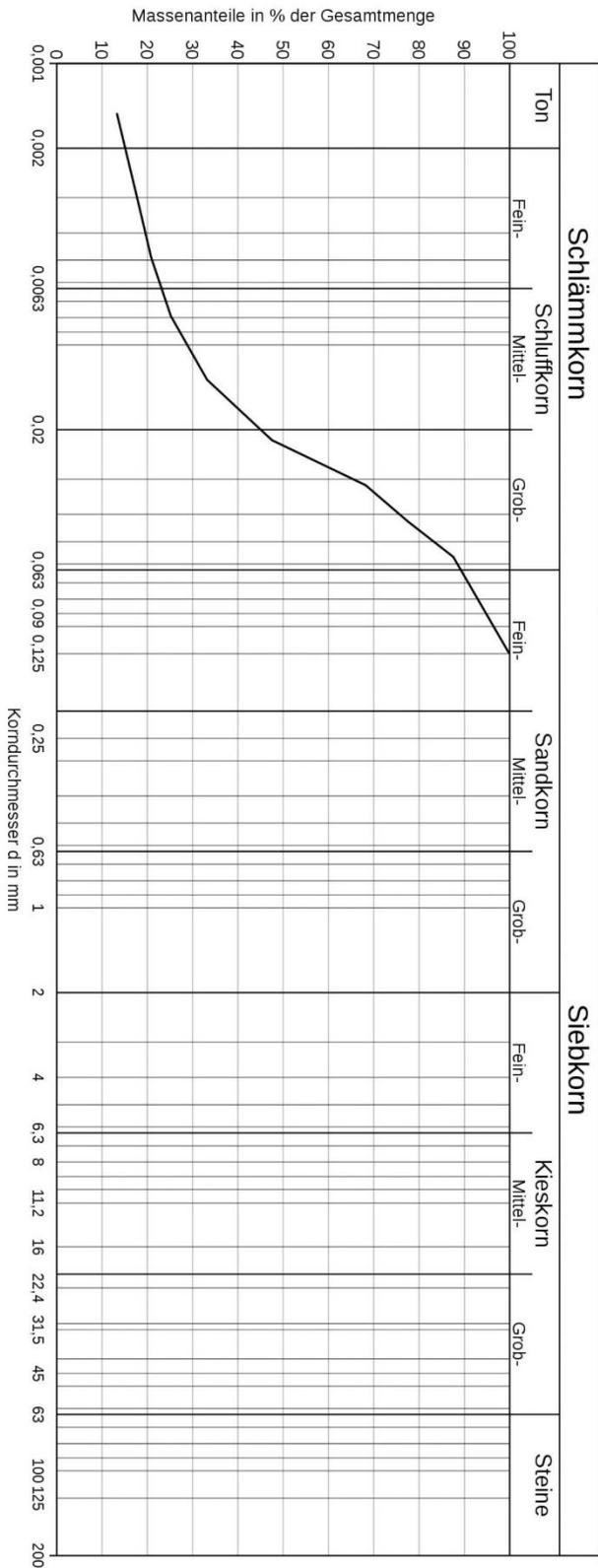


INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU
GEOTECHNISCHES LABOR
 A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12, AUSTRIA
 Tel.: +43 (0) 316 873-6237 Fax: +43 (0) 316 873-6238



Auftraggeber Institut für Bodenmechanik und Grundbau	Projekt Masterarbeit	Proj. Nr. 1	Bezeichnung Kornverteilung	Tiefe -	Bearb. Grüßer	Datum 05.04.17 - 06.04.17
---	-------------------------	----------------	-------------------------------	------------	------------------	------------------------------

KÖRNUINGSLINIE



Lab.Nr.	Signatur	Anteile kleiner ϕ [mm]	Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine	Anteile größer ϕ [mm]	Bodenart	D10	D30	D60	Cu	Cc
197381	—	-	15,1	74,2	-	-	-	0,063; 10,8	clSl	<0,002	0,0108mm	0,0272mm	-	-

A 2 Messprotokoll Kornverteilung toniger Schluff

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 2	LABORNUMMER: 19738
PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: cl Si	AUFTRAGSNUMMER -
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 04.04.2017

Kornverteilung

Siebanalyse		
Maschenweite	Rückstand	Σ Rückstand
[mm]	[g]	[g]
63		
45		
31,5		
16		
8		
4		
2		
1		
0,5		
0,25		
0,125	0,5	
0,063		
0,05		
0,04		
0,032		
0,02		
Summe		
Durchgang durch feinstes Sieb trocken	642,1	
Masse des Siebgutes trocken	642,6	

Durchgang durch feinstes Sieb feucht	
Wassergehalt	
Druch durch feinstes Sieb trocken	

Schlammalyse				
Zylindernummer				16
Einwaage trocken	[g]			47,0
Korndichte	[g/cm ³]			2,76
Datum	Uhrzeit	Zeit	Temp.	Lesung R
04.04.2017		[min]	[°C]	
		0,5	21,0	25,0
		1,0		22,0
		2,0		19,3
		5,0		13,0
		15		8,8
	h	45		6,4
	2	120		4,9
	6	360		4,0
	24	1440	20,0	3,0

Wassergehalt		
Masse Probe feucht + Behälter		
Masse Probe trocken + Behälter	1296,4	
Masse Behälter	654,3	
Masse Probe feucht		
Masse Probe trocken	642,1	
Masse Wasser		
Wassergehalt		
Einwaage feucht		
Einwaage trocken		

B1 Messprotokoll Korndichte schluffiger Sand

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 1	LABORNUMMER: 197380
PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: si Sa	AUFTRAGSNUMMER: -
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 06.04.2017

Korndichte ÖNORM B 4413:2010

1	Pyknometer-Nr.				25	107	110
2	Volumen Pyknometer	cm ³	VP	T	100,125	100,357	100,029
3	Tara	g	m0	T	44,2500	43,9116	44,0226
4	Trockenmasse Probe + Tara	g	m1	L	62,4754	61,6135	62,1548
5	Trockenmasse Probe	g	m2	4-3	18,2254	17,7019	18,1322
6	Masse Pyknometer + Wasser + Probe (unter Auftrieb) bei t °C	g	m3	L	155,7847	155,3300	155,4257
7	Versuchstemperatur Probe + Wasser	°C	t	L	23,5	24,6	23,9
8	Temperaturkorrektur von 20 °C zu t °C	g	Δm	T	-0,079	-0,106	-0,089
9	Masse Pyknometer + Wasser bei 20 °C	g	m4	T	144,195	144,088	143,872
10	Masse Pyknometer + Wasser bei t °C	g	m5	8+9	144,116	143,982	143,783
11	Dichte Wasser bei t °C	g/cm ³	rw	T	0,99742	0,99714	0,99725
12	Bodenvolumen	cm ³	Vk	(10+5-6)/11	6,573	6,372	6,507
13	Korndichte	Mg/cm ³	rs	5/12	2,773	2,778	2,787
14	Mittelwert aus allen Versuchen	Mg/cm ³	rs,i.M.		2,78		

ANMERKUNG:

B2 Messprotokoll Korndichte toniger Schluff

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 2	LABORNUMMER: 197381
PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: cl Si	AUFTRAGSNUMMER: -
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 06.04.2017

Korndichte ÖNORM B 4413:2010

1	Pyknometer-Nr.				110	103	109	
2	Volumen Pyknometer	cm ³	VP	T	100,029	99,093	99,741	
3	Tara	g	m0	T	44,0210	44,2432	43,9926	
4	Trockenmasse Probe + Tara	g	m1	L	64,0268	64,3206	64,5044	
5	Trockenmasse Probe	g	m2	4-3	20,0058	20,0774	20,5118	
6	Masse Pyknometer + Wasser + Probe (unter Auftrieb) bei t °C	g	m3	L	156,5124	155,8422	156,5499	
7	Versuchstemperatur Probe + Wasser	°C	t	L	26,7	26,9	26,7	
8	Temperaturkorrektur von 20 °C zu t °C	g	Δm	T	-0,165	-0,171	-0,165	
9	Masse Pyknometer + Wasser bei 20 °C	g	m4	T	143,870	143,158	143,554	
10	Masse Pyknometer + Wasser bei t °C	g	m5	8+9	143,705	142,987	143,389	
11	Dichte Wasser bei t °C	g/cm ³	rw	T	0,9966	0,9965	0,9966	
12	Bodenvolumen	cm ³	Vk	(10+5-6)/11	7,223	7,247	7,376	
13	ndichte	VZ cm ³	Mg/cm ³	rs	5/12	2,770	2,770	2,781
14	s allen Versuchen	ρ g/cm ³	Mg/cm ³	rs,i.M.		2,77		

ANMERKUNG:

B3 Messprotokoll Korndichte toniger Schluff-Sand

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: 1/2 M1 & 1/2 M2	LABORNUMMER: 197382
PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: cl Si-Sa	AUFTRAGSNUMMER: -
	BEARBEITER: Gruber Patrick	DATUM: 06.07.2017

Korndichte ÖNORM B 4413:2010

1	Pyknometer-Nr.				68	127	74
2	Volumen Pyknometer	cm ³	VP	T	102,968	100,702	101,918
3	Tara	g	m0	T	48,2253	43,9599	48,8699
4	Trockenmasse Probe + Tara	g	m1	L	68,9078	64,2332	69,1236
5	Trockenmasse Probe	g	m2	4-3	20,6825	20,2733	20,2537
6	Masse Pyknometer + Wasser + Probe (unter Auftrieb) bei t °C	g	m3	L	164,1249	157,3361	163,4501
7	Versuchstemperatur Probe + Wasser	°C	t	L	26,3	26,2	26,3
8	Temperaturkorrektur von 20 °C zu t °C	g	Δm	T	-0,153	-0,150	-0,153
9	Masse Pyknometer + Wasser bei 20 °C	g	m4	T	151,008	144,481	150,604
10	Masse Pyknometer + Wasser bei t °C	g	m5	8+9	150,855	144,331	150,451
11	Dichte Wasser bei t °C	g/cm ³	rw	T	0,9967	0,9967	0,9967
12	Bodenvolumen	cm ³	Vk	(10+5-6)/11	7,437	7,292	7,279
13	Korndichte	Mg/cm ³	rs	5/12	2,781	2,780	2,782
14	Mittelwert aus allen Versuchen	Mg/cm ³	rs,i.M.		2,78		

ANMERKUNG:

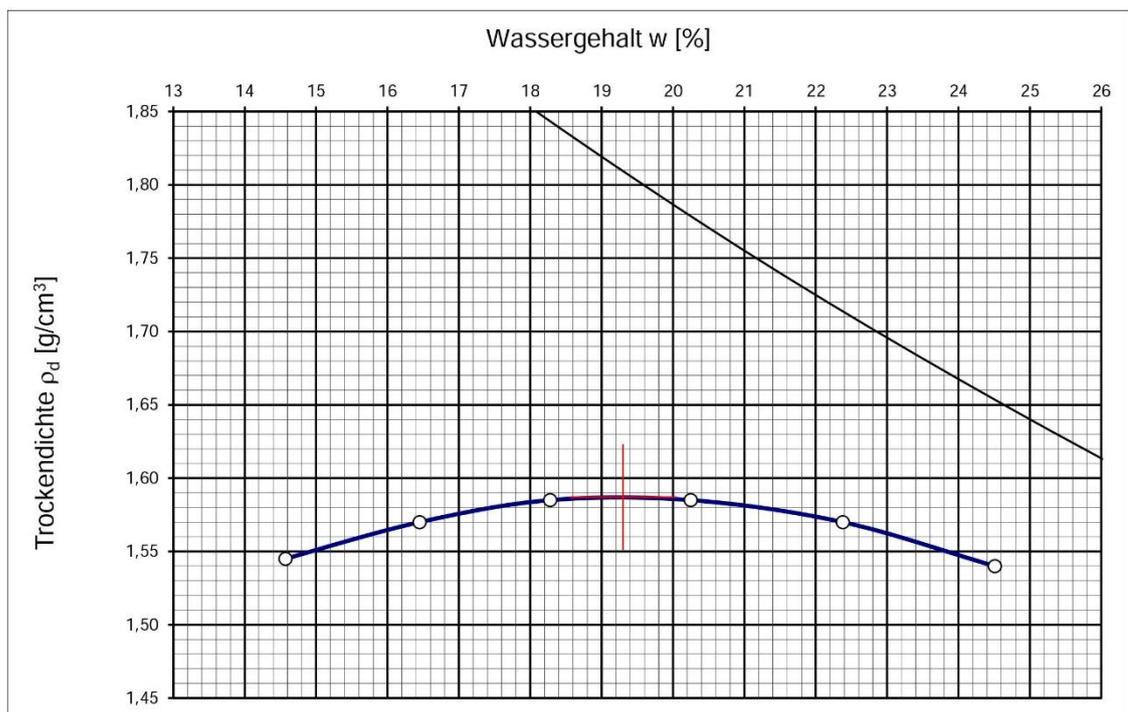
C1 Proctorkurve schluffiger Sand

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 1	LABORNUMMER: 197380
	PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: si Sa
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 05.04.2017

PROCTOR-VERSUCH

GERÄT			Verdichtungsenergie	MN/m ³	0,6
Durchmesser	mm	100	Überkornanteil	%	-
Höhe	mm	120			



ERGEBNIS		
w_{Pr}	%	19,30
ρ_{Pr}	g/cm ³	1,59

ANMERKUNG:

C1 Messprotokoll Proctor-Versuch schluffiger Sand

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 1	LABORNUMMER: 197380
PROJEKT: Masterarbeit	TIEFE: -	AUFTRAGSNUMMER: -
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 05.04.2017

PROCTOR-VERSUCH

Versuch Nr.				1	2	3	4	5	6	
Behälter Nr.										
1	Probe feucht + Behälter	mf + mB	g		416,1	720,9	501,1	498,0	504,7	646,48
2	Probe trocken + Behälter	md + mB	g		379,7	646	442,3	434,3	434,3	553,3
3	Masse Behälter	mB	g		129,8	190,6	120,6	119,8	119,8	173,2
4	Masse Probe feucht	mf	g	1-3	286,3	530,3	380,5	378,2	384,9	473,3
5	Masse Probe trocken	md	g	2-3	249,9	455,4	321,7	314,5	314,5	380,1
6	Masse Wasser	mW	g	4-5	36,4	74,9	58,8	63,7	70,4	93,2
7	Wassergehalt	W	%	6:5	14,57	16,45	18,28	20,25	22,38	24,51
8	Masse Zylinder + Probe feucht	mZ + mf	g		11829	11883	11928	11957	11972	11970
9	Masse Zylinder	mZ	g		10161	10161	10161	10161	10161	10161
10	Masse Probe feucht	mf	g	8-9	1668,0	1722,0	1767,0	1796,0	1811,0	1809,0
11	Volumen Zylinder	VZ	cm ³		942,48	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48
12	Dichte der Probe	ρ	g/cm ³	10:11	1,770	1,827	1,875	1,906	1,922	1,919
13	Dichte der trockenen Probe	ρ	g/cm ³	12:(1+w)	1,545	1,569	1,585	1,585	1,570	1,542

ANMERKUNG:

C2 Proctorkurve toniger Schluff

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 2	LABORNUMMER: 197381
	PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: cl Si
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 05.04.2017

PROCTOR-VERSUCH

GERÄT			Verdichtungsenergie	MN/m ³	0,6
Durchmesser	mm	100	Überkornanteil	%	-
Höhe	mm	120			



ERGEBNIS		
w_{Pr}	%	14,30
ρ_{Pr}	g/cm ³	1,90

ANMERKUNG:

C2 Messprotokoll Proctor-Versuch toniger Schluff

 TU Graz Graz University of Technology	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau		BEZEICHNUNG: Material 2	LABORNUMMER: 197381
PROJEKT: Masterarbeit		TIEFE: -	AUFTRAGSNUMMER: -
		BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 05.04.2017

PROCTOR-VERSUCH

Versuch Nr.				1	2	3	4	5	6	
Behälter Nr.										
1	Probe feucht + Behälter	mf + mB	g		394,9	372,6	448,9	449,4	388,2	676,5
2	Probe trocken + Behälter	md + mB	g		369,2	344,9	420,4	419	364,7	629,6
3	Masse Behälter	mB	g		158,7	131	210,2	204,8	205,8	328,3
4	Masse Probe feucht	mf	g	1-3	236,2	241,6	238,7	244,6	182,4	348,2
5	Masse Probe trocken	md	g	2-3	210,5	213,9	210,2	214,2	158,9	301,3
6	Masse Wasser	mW	g	4-5	25,7	27,7	28,5	30,4	23,5	46,9
7	Wassergehalt	W	%	6:5	12,209	12,95	13,559	14,192	14,789	15,57
8	Masse Zylinder + Probe feucht	mZ + mf	g		12103	12143	12177	12205	12208	12198
9	Masse Zylinder	mZ	g		10161	10161	10161	10161	10161	10161
10	Masse Probe feucht	mf	g	8-9	1942,0	1982,0	2016,0	2044,0	2047,0	2037,0
11	Volumen Zylinder	VZ	cm ³		942,48	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48
12	Dichte der Probe	ρ	g/cm ³	10:11	2,061	2,103	2,139	2,169	2,172	2,161
13	Dichte der trockenen Probe	ρ	g/cm ³	12:(1+w)	1,836	1,862	1,884	1,899	1,892	1,870

ANMERKUNG:

C3 Proctorkurve toniger Schluff-Sand

 TU Graz <small>Graz University of Technology</small>	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	
---	--	---

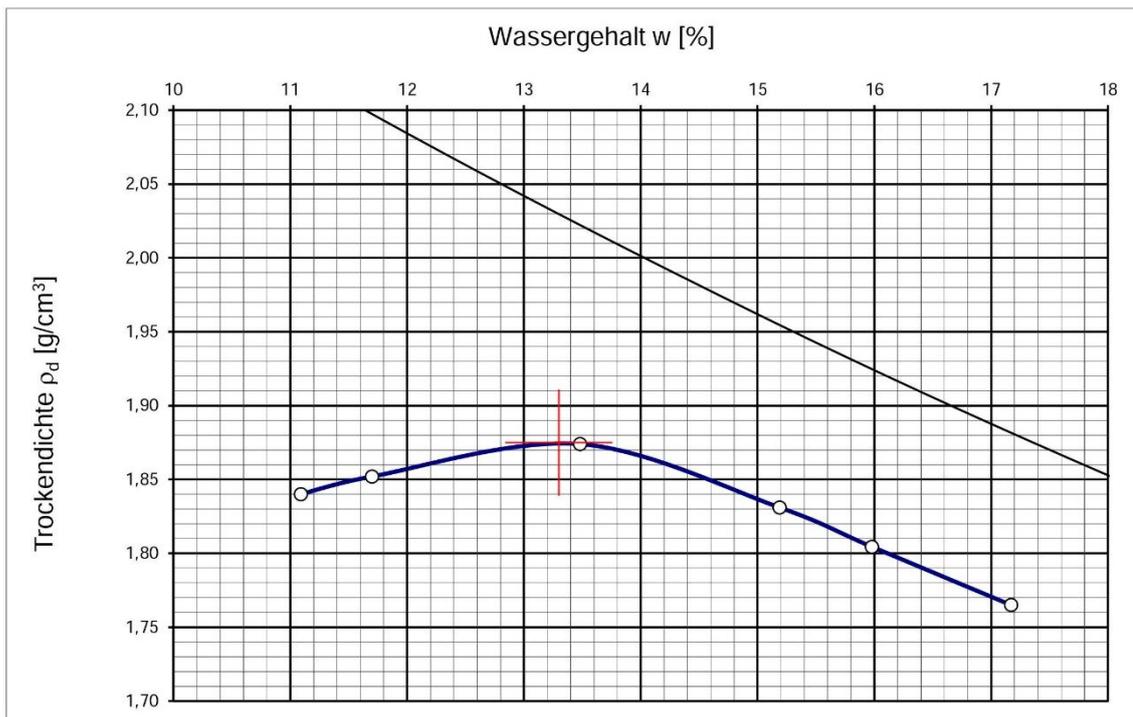
AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 3	LABORNUMMER: 197382
PROJEKT: Masterarbeit	BODENART: cl Si-Sa	AUFTRAGSNUMMER: -
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 07.07.2017

PROCTOR-VERSUCH

GERÄT		
Durchmesser	mm	100
Höhe	mm	120

Verdichtungsenergie	MN/m ³	0,6
---------------------	-------------------	-----

Überkornanteil	%	-
----------------	---	---



ERGEBNIS		
w _{Pr}	%	13,30
ρ _{Pr}	g/cm ³	1,88

ANMERKUNG:

C3 Messprotokoll Proctor-Versuch toniger Schluff-Sand

 TU Graz <small>Graz University of Technology</small>	INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU GEOTECHNISCHES LABOR RECHBAUERSTRASSE 12, 8010 GRAZ, AUSTRIA Tel: +43(0)316/873-6237 Fax: +43(0)316/873-6238	

AUFTRAGGEBER: Institut für Bodenmechanik und Grundbau	BEZEICHNUNG: Material 3	LABORNUMMER: 197382
PROJEKT: Masterarbeit	TIEFE: -	AUFTRAGSNUMMER: -
	BEARBEITER: Patrick Gruber	DATUM: 07.07.2017

PROCTOR-VERSUCH

Versuch Nr.				1	2	3	4	5	6	
Behälter Nr.										
1	Probe feucht + Behälter	mf + mB	g		496,6	386,1	383	455	351,8	580,7
2	Probe trocken + Behälter	md + mB	g		465,5	361,7	352,2	410,9	316,3	522,6
3	Masse Behälter	mB	g		185,1	153,2	123,7	120,6	94,1	184,2
4	Masse Probe feucht	mf	g	1-3	311,5	232,9	259,3	334,4	257,7	396,5
5	Masse Probe trocken	md	g	2-3	280,4	208,5	228,5	290,3	222,2	338,4
6	Masse Wasser	mW	g	4-5	31,1	24,4	30,8	44,1	35,5	58,1
7	Wassergehalt	W	%	6:5	11,09	11,70	13,48	15,19	15,98	17,17
8	Masse Zylinder + Probe feucht	mZ + mf	g		12097	12111	12165	12148	12130	12110
9	Masse Zylinder	mZ	g		10161	10161	10161	10161	10161	10161
10	Masse Probe feucht	mf	g	8-9	1935,8	1949,7	2004,0	1987,4	1969,1	1949,4
11	Volumen Zylinder	VZ	cm ³		942,48	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48
12	Dichte der Probe	ρ	g/cm ³	10:11	2,054	2,069	2,126	2,109	2,089	2,068
13	Dichte der trockenen Probe	ρ	g/cm ³	12:(1+w)	1,849	1,852	1,874	1,831	1,801	1,765

ANMERKUNG:

D1 Messprotokoll Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle $i = 8,0$
 schluffiger Sand

Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Messdatum: 08.08.2017 Bearbeiter: Patrick Gruber
 Bodenprobe: Sa Temperatur: 24,5 °C

Triaxialzelle	Volumen STZ [cm ³]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Messglas Versuchsbg. [g]	Messglas Versuchsende [g]	Durchflussmenge [cm ³]
1	942,5	15:35	15:40	105,7	486,1	380,4
2	942,5	15:35	15:40	106,6	500,0	393,4
3	942,5	15:35	15:40	105,6	595,1	489,5

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$$

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied:

Triaxialzelle	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
1	78,5	12,0	96,0	8,0	300	380,4
2	78,5	12,0	96,0	8,0	300	393,4
3	78,5	12,0	96,0	8,0	300	489,5

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T / \theta_{10}$$

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

Triaxialzelle	$k_{24,5^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{24,5^\circ\text{C}}$ [m/d]	v_T [Pa*s]	v_{10} [Pa*s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/d]
1	2,0E-05	1,7E+00	0,90	1,31	1,4E-05	1,2E+00
2	2,1E-05	1,8E+00	0,90	1,31	1,4E-05	1,2E+00
3	2,6E-05	2,2E+00	0,90	1,31	1,8E-05	1,5E+00

D2 Messprotokoll Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle $i = 8,0$
toniger Schluff (Bodenprobe Si)

Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Messdatum: 08.08.2017
Bodenprobe: Si

Bearbeiter: Patrick Gruber
Temperatur: 24,0 °C

Triaxialzelle	Volumen STZ [cm ³]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Messglas Versuchshg. [g]	Messglas Versuchshg. [g]	Durchflussmenge [cm ³]
4	942,5	12:15	15:15	106,0	334,3	228,3
5	942,5	12:15	15:15	105,7	306,1	200,4
6	942,5	12:15	15:15	105,6	317,6	212,0

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$$

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied:

Triaxialzelle	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
4	78,5	12,0	96,0	8,0	10800	228,3
5	78,5	12,0	96,0	8,0	10800	200,4
6	78,5	12,0	96,0	8,0	10800	212,0

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \vartheta_T / \vartheta_{10}$$

Triaxialzelle	$k_{24,0^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{24,0^\circ\text{C}}$ [m/d]	v_T [Pa*s]	v_{10} [Pa*s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/d]
4	3,4E-07	2,9E-02	0,91	1,31	2,3E-07	2,0E-02
5	3,0E-07	2,6E-02	0,91	1,31	2,1E-07	1,8E-02
6	3,1E-07	2,7E-02	0,91	1,31	2,2E-07	1,9E-02

D2 Messprotokoll Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle $i = 30,0$ toniger Schluff (Bodenprobe Si)

Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Messdatum: 09.08.2017 Bearbeiter: Patrick Gruber
 Bodenprobe: Si Temperatur: 24,1 °C

Triaxialzelle	Volumen STZ [cm ³]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Messglas Versuchsbg. [g]	Messglas Versuchsende [g]	Durchflussmenge [cm ³]
4	942,5	10:50	11:50	105,7	513,8	408,1
5	942,5	10:50	11:50	105,6	501,1	395,5
6	942,5	10:50	11:50	106,0	490,3	384,3

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$$

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied:

Triaxialzelle	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
4	78,5	12,0	360,0	30,0	3600	408,1
5	78,5	12,0	360,0	30,0	3600	395,5
6	78,5	12,0	360,0	30,0	3600	384,3

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T / \theta_{10}$$

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

Triaxialzelle	$k_{24,1^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{24,1^\circ\text{C}}$ [m/d]	v_T [Pa*s]	v_{10} [Pa*s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/d]
4	4,8E-07	4,2E-02	0,91	1,31	3,3E-07	2,9E-02
5	4,7E-07	4,0E-02	0,91	1,31	3,2E-07	2,8E-02
6	4,5E-07	3,9E-02	0,91	1,31	3,2E-07	2,7E-02

D3 Messprotokoll Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle $i = 8,0$
toniger Schluff-Sand (Bodenprobe Sa&Si)

Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Messdatum: 07.08.2017
Bodenprobe: Sa & Si

Bearbeiter: Patrick Gruber
Temperatur: 23,9 °C

Triaxialzelle	Volumen STZ [cm ³]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Messglas Versuchshg. [g]	Messglas Versuchsende [g]	Durchflussmenge [cm ³]
7	942,5	13:00	15:00	105,3	534,8	429,5
8	942,5	13:00	15:00	106,0	515,2	409,2
9	942,5	13:00	15:00	105,9	499,7	393,8

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$$

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied:

Stechzylinder Nummer	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
7	78,5	12,0	96,0	8,0	7200	429,5
8	78,5	12,0	96,0	8,0	7200	409,2
9	78,5	12,0	96,0	8,0	7200	393,8

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \vartheta_T / \vartheta_{10}$$

Stechzylinder Nummer	$k_{23,9^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{23,9^\circ\text{C}}$ [m/d]	v_T [Pa*s]	v_{10} [Pa*s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/d]
7	9,5E-07	8,2E-02	0,92	1,31	6,6E-07	5,7E-02
8	9,0E-07	7,8E-02	0,92	1,31	6,3E-07	5,5E-02
9	8,7E-07	7,5E-02	0,92	1,31	6,1E-07	5,3E-02

D3 Messprotokoll Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle $i = 30,0$ toniger Schluff-Sand (Bodenprobe Sa&Si)

Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Messdatum: 08.08.2017
Bodenprobe: Sa & Si

Bearbeiter: Patrick Gruber
Temperatur: 24,8 °C

Triaxialzelle	Volumen STZ [cm ³]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Messglas Versuchsbg. [g]	Messglas Versuchsende [g]	Durchflussmenge [cm ³]
7	942,5	16:15	16:30	106,3	532,8	426,5
8	942,5	16:15	16:30	105,8	454,8	349,0
9	942,5	16:15	16:30	105,6	441,2	335,6

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$$

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied:

Stechzylinder Nummer	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
7	78,5	12,0	360,0	30,0	900	426,5
8	78,5	12,0	360,0	30,0	900	349,0
9	78,5	12,0	360,0	30,0	900	335,6

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T / \theta_{10}$$

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

Stechzylinder Nummer	$k_{24,8^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{24,8^\circ\text{C}}$ [m/d]	v_T [Pa*s]	v_{10} [Pa*s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/s]	$k_{10^\circ\text{C}}$ [m/d]
7	2,0E-06	1,7E-01	0,90	1,31	1,4E-06	1,2E-01
8	1,6E-06	1,4E-01	0,90	1,31	1,1E-06	9,7E-02
9	1,6E-06	1,4E-01	0,90	1,31	1,1E-06	9,4E-02

E1 Messprotokoll Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter stationär Bodenprobe Sa

Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 04.05.2017 Bodenprobe: Sa Bearbeiter: Patrick Gruber
 Einbaudatum: 02.05.2017 Temperatur: 22,8 °C Versuchsreihe: 1

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm³]	WS Innen [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Durchflussmenge [cm³]
21	19	250	6,00	5,75	-	-	4,0
23	18	250	6,65	5,80	-	-	10,0
24	16	250	6,65	5,85	-	-	10,0

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied: $k = \frac{V * l}{A * t * h}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche [cm²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm³]
21	19	50	5	0,25	0,05	606	4,0
23	18	50	5	0,85	0,17	464	10,0
24	16	50	5	0,80	0,16	704	10,0

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T * \theta_T / \theta_{10}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	$k_{22,8°C}$ [m/s]	$k_{22,8°C}$ [m/d]	v_T [Pa*s]	v_{10} [Pa*s]	$k_{10°C}$ [m/s]	$k_{10°C}$ [m/d]
21	19	2,6E-05	2,3E+00	0,94	1,31	1,9E-05	1,6E+00
23	18	2,5E-05	2,2E+00	0,94	1,31	1,8E-05	1,6E+00
24	16	1,8E-05	1,5E+00	0,94	1,31	1,3E-05	1,1E+00

E2 Messprotokoll Bodenprobe Si
Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 04.05.2017 Bodenprobe: Si Bearbeiter: Patrick Gruber
Einbaudatum: 02.05.2017 Temperatur: 22,6 °C Versuchsreihe: 2

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Durchflussmenge [cm ³]
25	7	250	6,55	5,75	07:30	20:00	28,9
28	9	250	6,35	5,80	07:30	20:00	22,1
30	10	250	6,45	5,85	07:30	20:00	20,5

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied:

$$k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
25	7	50	5	0,80	0,16	45000	28,9
28	9	50	5	0,55	0,11	45000	22,1
30	10	50	5	0,60	0,12	45000	20,5

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T / \theta_{10}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{22,6°C} [m/s]	k _{22,6°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
25	7	8,0E-07	6,9E-02	0,95	1,31	5,8E-07	5,0E-02
28	9	8,9E-07	7,7E-02	0,95	1,31	6,4E-07	5,6E-02
30	10	7,6E-07	6,6E-02	0,95	1,31	5,5E-07	4,7E-02

E2 Messprotokoll Bodenprobe Si
 Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 04.05.2017 Bodenprobe: Si Bearbeiter: Patrick Gruber
 Einbaudatum: 02.05.2017 Temperatur: 22,6 °C Versuchsreihe: 2

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen t1 [cm]	WS Innen t2 [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung
25	7	250	6,55	6,20	5,75	11:00	19:00
28	9	250	6,40	6,10	5,80	11:00	19:00
30	10	250	6,40	6,15	5,85	11:00	19:00

Durchlässigkeitsbestimmung mit abnehmendem Höhenunterschied: $k = \frac{\alpha \cdot l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{\alpha \cdot \alpha \cdot l}{A \cdot \sqrt{h_1 \cdot h_2}}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche A [cm ²]	QS Fläche a [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz t1 [cm]	WS Differenz t2 [cm]	Messzeit [s]
25	7	50,00	33,18	5,00	0,80	0,45	28800
28	9	50,00	33,18	5,00	0,60	0,30	28800
30	10	50,00	33,18	5,00	0,55	0,30	28800

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T / \theta_{10}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{22,6°C} [m/s]	k _{22,6°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
25	7	7,2E-07	6,2E-02	0,95	1,31	5,2E-07	4,5E-02
28	9	8,8E-07	7,6E-02	0,95	1,31	6,3E-07	5,5E-02
30	10	7,8E-07	6,7E-02	0,95	1,31	5,6E-07	4,9E-02

E3 Messprotokoll Bodenprobe Sa/Si
Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 18.05.2017 Bodenprobe: Sa/Si Bearbeiter: Patrick Gruber
Einbaudatum: 12.05.2017 Temperatur: 23,8 °C Versuchsreihe: 3

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Durchflussmenge [cm ³]
6	16	250	6,30	5,85	07:00	17:00	30,4
7	17	250	6,20	5,90	07:00	17:00	21,1
10	19	250	6,55	5,95	07:00	17:00	40,2

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied: $k = \frac{V * l}{A * t * h}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
6	16	50	5	0,45	0,09	36000	30,4
7	17	50	5	0,30	0,06	36000	21,1
10	19	50	5	0,60	0,12	36000	40,2

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{1,0} = k_T * \theta_T / \theta_{1,0}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{23,8°C} [m/s]	k _{23,8°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
6	16	1,9E-06	1,6E-01	0,92	1,31	1,3E-06	1,1E-01
7	17	2,0E-06	1,7E-01	0,92	1,31	1,4E-06	1,2E-01
10	19	1,9E-06	1,6E-01	0,92	1,31	1,3E-06	1,1E-01

E3 Messprotokoll Bodenprobe Sa/Si
 Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 16.05.2017 Bodenprobe: Sa/Si Bearbeiter: Patrick Gruber
 Einbaudatum: 12.05.2017 Temperatur: 23,6 °C Versuchsreihe: 3

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen t1 [cm]	WS Innen t2 [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung
6	16	250	7,05	6,05	5,85	09:30	17:30
7	17	250	7,10	6,15	5,90	09:30	17:30
10	19	250	7,15	6,20	5,95	09:30	17:30

Durchlässigkeitsbestimmung mit abnehmendem Höhenunterschied: $k = \frac{\alpha \cdot l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{\alpha \cdot \alpha \cdot l}{A \cdot \sqrt{h_1 \cdot h_2}}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche A [cm ²]	QS Fläche a [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz t1 [cm]	WS Differenz t2 [cm]	Messzeit [s]
6	16	50,00	33,18	5,00	1,20	0,20	28800
7	17	50,00	33,18	5,00	1,20	0,25	28800
10	19	50,00	33,18	5,00	1,20	0,25	28800

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T / \theta_{10}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{23,6°C} [m/s]	k _{23,6°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
6	16	2,1E-06	1,8E-01	0,92	1,31	1,5E-06	1,3E-01
7	17	1,9E-06	1,6E-01	0,92	1,31	1,3E-06	1,1E-01
10	19	1,9E-06	1,6E-01	0,92	1,31	1,3E-06	1,1E-01

E4 Messprotokoll Bodenprobe Si/Sa
Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 26.06.2017 Bodenprobe: Si/Sa Bearbeiter: Patrick Gruber
Einbaudatum: 21.06.2017 Temperatur: 25,6 °C Versuchsreihe: 4

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Durchflussmenge [cm ³]
25	16	250	6,25	6,00	17:30	22:00	11,1
26	17	250	6,55	6,00	16:00	21:00	32,4
28	18	250	6,70	6,00	16:00	21:00	37,2

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied: $k = \frac{V \cdot l}{A \cdot t \cdot h}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
25	16	50	5	0,25	0,05	16200	11,1
26	17	50	5	0,55	0,11	18000	32,4
28	18	50	5	0,70	0,14	18000	37,2

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \frac{\nu_T}{\nu_{10}}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{25,6°C} [m/s]	k _{25,6°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
25	16	2,7E-06	2,4E-01	0,88	1,31	1,8E-06	1,6E-01
26	17	3,3E-06	2,8E-01	0,88	1,31	2,2E-06	1,9E-01
28	18	3,0E-06	2,6E-01	0,88	1,31	2,0E-06	1,7E-01

E4 Messprotokoll Bodenprobe Si/Sa
 Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 25.06.2017 Bodenprobe: Si/Sa Bearbeiter: Patrick Gruber
 Einbaudatum: 21.06.2017 Temperatur: 25,8 °C Versuchsreihe: 4

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen t1 [cm]	WS Innen t2 [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung
25	16	250	8,65	8,20	8,10	11:00	18:00
26	17	250	8,65	8,20	8,10	11:00	18:00
28	18	250	8,70	8,20	8,10	11:00	18:00

Durchlässigkeitsbestimmung mit abnehmendem Höhenunterschied: $k = \frac{\alpha \cdot l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{\alpha \cdot \alpha \cdot l}{A \cdot \sqrt{h_1 \cdot h_2}}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche A [cm ²]	QS Fläche a [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz t1 [cm]	WS Differenz t2 [cm]	Messzeit [s]
25	16	50,00	33,18	5,00	0,55	0,10	25200
26	17	50,00	33,18	5,00	0,55	0,10	25200
28	18	50,00	33,18	5,00	0,60	0,10	25200

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \theta_T^{\theta_T} / \theta_{10}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{25,8°C} [m/s]	k _{25,8°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
25	16	2,4E-06	2,1E-01	0,88	1,31	1,6E-06	1,4E-01
26	17	2,4E-06	2,1E-01	0,88	1,31	1,6E-06	1,4E-01
28	18	2,5E-06	2,2E-01	0,88	1,31	1,7E-06	1,4E-01

E5 Messprotokoll Bodenprobe Sa&Si
Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Stationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 13.07.2017 Bodenprobe: Sa & Si Bearbeiter: Patrick Gruber
Einbaudatum: 07.07.2017 Temperatur: 26,4 °C Versuchsreihe: 5

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung	Durchflussmenge [cm ³]
3	8	250	6,55	6,15	09:15	13:30	25,0
4	9	250	6,75	6,15	09:15	13:30	38,1
5	10	250	6,50	6,15	09:15	13:30	22,2

Durchlässigkeitsbestimmung bei konstantem Höhenunterschied: $k = \frac{V * l}{A * t * h}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz [cm]	Gradient [-]	Messzeit [s]	Durchflussmenge [cm ³]
3	8	50	5	0,40	0,08	15300	25,0
4	9	50	5	0,60	0,12	15300	38,1
5	10	50	5	0,35	0,07	15300	22,2

$$k_{10} = k_T * \frac{v_T}{\rho_{10}}$$

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{26,4°C} [m/s]	k _{26,4°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
3	8	4,1E-06	3,5E-01	0,87	1,31	2,7E-06	2,3E-01
4	9	4,2E-06	3,6E-01	0,87	1,31	2,7E-06	2,4E-01
5	10	4,1E-06	3,6E-01	0,87	1,31	2,7E-06	2,4E-01

E5 Messprotokoll Bodenprobe Sa&Si
 Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Instationäre Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

Messdatum: 12.07.2017 Bodenprobe: Sa & Si Bearbeiter: Patrick Gruber
 Einbaudatum: 07.07.2017 Temperatur: 26,3 °C Versuchsreihe: 5

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	Volumen STZ [cm ³]	WS Innen t1 [cm]	WS Innen t2 [cm]	WS Außen [cm]	Beginn der Messung	Ende der Messung
3	8	250	8,25	7,50	7,45	09:15	16:45
4	9	250	8,25	7,50	7,45	09:15	16:45
5	10	250	8,25	7,50	7,45	09:15	16:45

Durchlässigkeitsbestimmung mit abnehmendem Höhenunterschied: $k = \frac{\alpha \cdot l}{A \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{\alpha \cdot \alpha \cdot l}{A \cdot \alpha \cdot (h_1 + h_2)}$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	QS Fläche A [cm ²]	QS Fläche a [cm ²]	Probenlänge [cm]	WS Differenz t1 [cm]	WS Differenz t2 [cm]	Messzeit [s]
3	8	50,00	33,18	5,00	0,80	0,05	27000
4	9	50,00	33,18	5,00	0,80	0,05	27000
5	10	50,00	33,18	5,00	0,80	0,05	27000

Ergebnisse mit und ohne Temperaturkorrektur:

$$k_{10} = k_T \cdot \frac{\theta_T}{\theta_{10}}$$

Stechzylinder Nummer	Permeameter Nummer	k _{26,3°C} [m/s]	k _{26,3°C} [m/d]	v _T [Pa*s]	v ₁₀ [Pa*s]	k _{10°C} [m/s]	k _{10°C} [m/d]
3	8	3,6E-06	3,1E-01	0,87	1,31	2,4E-06	2,0E-01
4	9	3,6E-06	3,1E-01	0,87	1,31	2,4E-06	2,0E-01
5	10	3,6E-06	3,1E-01	0,87	1,31	2,4E-06	2,0E-01

F Messprotokoll Drucktopfversuch Bodenprobe Sa, Si und Sa&Si

Wiegeliste Drucktopf 15 bar

Bodenprobe Sa

Probe:	Feucht	Trocken		Ring + Tuch [g]	Masse feucht [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [g]	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol.-%]
	Gesamtmasse [g]	Gesamtmasse [g]	Schale [g]						
18 a	188,10	187,55	145,62	12,70	29,78	29,23	0,55	1,9	2,5
19 a	185,50	184,95	143,05	12,80	29,65	29,10	0,55	1,9	2,5
20 a	183,29	182,71	140,83	12,70	29,76	29,18	0,58	2,0	2,6
18 b	184,25	183,67	141,62	12,80	29,83	29,25	0,58	2,0	2,6
19 b	182,75	182,18	140,15	12,80	29,80	29,23	0,57	2,0	2,6
20 b	187,76	187,15	145,22	12,80	29,74	29,13	0,61	2,1	2,8
								2,0	2,6

Bodenprobe Si

Probe:	Feucht	Trocken		Ring + Tuch [g]	Masse feucht [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [g]	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol.-%]
	Gesamtmasse [g]	Gesamtmasse [g]	Schale [g]						
18 c	195,35	191,77	142,88	12,70	39,77	36,19	3,58	9,9	16,2
19 c	198,08	194,46	145,47	12,80	39,81	36,19	3,62	10,0	16,4
20 c	199,57	196,00	147,23	12,70	39,64	36,07	3,57	9,9	16,2
25 a	194,50	190,97	142,09	12,80	39,61	36,08	3,53	9,8	16,0
25 b	195,18	191,64	143,45	12,80	38,93	35,39	3,54	10,0	16,0
25 c	189,67	186,05	136,89	12,80	39,98	36,36	3,62	10,0	16,4
								9,9	16,2

Bodenprobe Sa&Si (Sa/Si und Si/Sa)

Probe:	Feucht	Trocken		Ring + Tuch [g]	Masse feucht [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [g]	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol.-%]
	Gesamtmasse [g]	Gesamtmasse [g]	Schale [g]						
21 a	194,25	191,78	143,08	12,55	38,62	36,15	2,47	6,8	11,2
21 b	194,86	192,41	143,67	12,45	38,74	36,29	2,45	6,8	11,1
21 c	196,79	194,35	145,47	12,45	38,87	36,43	2,44	6,7	11,1
24 a	196,36	193,90	145,07	12,55	38,74	36,28	2,46	6,8	11,2
24 b	197,25	194,65	145,66	12,55	39,04	36,44	2,60	7,1	11,8
24 c	196,51	194,05	145,16	12,55	38,80	36,34	2,46	6,8	11,2
								6,8	11,2

G1 Messprotokoll HYPROP[®]-Versuch Gesamtübersicht der Bodenproben

Übersicht Bodenprobe Sa

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Permeameter Nr.:	27.04.2017		05.05.2017		16.05.2017				
			Probe+STZ feucht [g]	Probe feucht [g]	Hyprop+STZ+Probe [g]	Probe sat [g]	Hyprop [g]	Probe+STZ+Schale trocken [g]	Probe trocken [g]	STZ [g]	Schale [g]
21	32	19	600,87	394,63	995,54	420,86	368,44	723,66	330,01	206,24	187,41
23	33	17	602,00	394,26	1002,14	425,13	369,27	726,87	329,86	207,74	189,27
24	21	16	597,91	395,17	994,91	425,72	366,45	720,16	331,37	202,74	186,05

Übersicht Bodenprobe Si

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Permeameter Nr.:	27.04.2017		05.05.2017		16.05.2017				
			Probe+STZ feucht [g]	Probe feucht [g]	Hyprop+STZ+Probe [g]	Probe sat [g]	Hyprop [g]	Probe+STZ+Schale trocken [g]	Probe trocken [g]	STZ [g]	Schale [g]
25	675	7	682,04	473,71	1069,32	501,49	359,50	802,95	408,49	208,33	186,13
28	676	9	679,24	472,81	1069,26	502,08	360,75	797,49	409,78	206,43	181,28
30	705	10	682,12	474,10	1071,58	503,31	360,25	808,28	411,51	208,02	188,75

Übersicht Bodenprobe Sa/Si

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Permeameter Nr.:	12.05.2017		18.05.2017		31.05.2017				
			Probe+STZ feucht [g]	Probe feucht [g]	Hyprop+STZ+Probe [g]	Probe sat [g]	Hyprop [g]	Probe+STZ+Schale trocken [g]	Probe trocken [g]	STZ [g]	Schale [g]
6	676	16	640,08	435,90	1040,56	476,51	359,87	767,96	375,03	204,18	188,75
7	705	17	640,64	436,60	1040,85	477,12	359,69	760,03	374,72	204,04	181,27
10	675	19	642,23	437,00	1038,11	473,41	359,47	764,74	373,38	205,23	186,13

Übersicht Bodenprobe Si/Sa

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Permeameter Nr.:	21.06.2017		27.06.2017		07.07.2017				
			Probe+STZ feucht [g]	Probe feucht [g]	Hyprop+STZ+Probe [g]	Probe sat [g]	Hyprop [g]	Probe+STZ+Schale trocken [g]	Probe trocken [g]	STZ [g]	Schale [g]
25	675	16	644,58	436,20	1046,33	477,74	360,21	768,27	372,47	208,38	187,42
26	705	17	641,68	436,40	1042,81	477,59	359,94	767,67	373,12	205,28	189,27
28	676	18	642,37	435,90	1045,19	478,64	360,08	765,93	373,41	206,47	186,05

Übersicht Bodenprobe Sa & Si

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Permeameter Nr.:	07.07.2017		14.07.2017		24.07.2017				
			Probe+STZ feucht [g]	Probe feucht [g]	Hyprop+STZ+Probe [g]	Probe sat [g]	Hyprop [g]	Probe+STZ+Schale trocken [g]	Probe trocken [g]	STZ [g]	Schale [g]
3	705	8	674,52	469,20	1070,37	504,95	360,10	804,63	411,89	205,32	187,42
4	676	9	674,25	470,90	1072,79	509,24	360,20	807,88	415,26	203,35	189,27
5	675	10	673,48	470,30	1071,10	508,11	359,81	804,48	415,26	203,18	186,04

G2 Messprotokoll HYPROP[®]-Versuch
Berechnung der Trockenmasse und Trockendichte der Bodenproben

Trockenmasse & Trockendichte Bodenprobe Sa

STZ Nr.:	Schale + STZ+ Probe [g]	Schale [g]	STZ [g]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
21	723,7	187,4	206,2	330,0	235,0	1,40
23	726,9	189,3	207,7	329,9	235,0	1,40
24	720,2	186,1	202,7	331,4	235,0	1,41

Trockenmasse & Trockendichte Bodenprobe Si

STZ Nr.:	Schale + STZ+ Probe [g]	Schale [g]	STZ [g]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
25	803,0	186,1	208,3	408,5	249,0	1,64
28	797,5	181,3	206,4	409,8	249,0	1,65
30	808,3	188,8	208,0	411,5	249,0	1,65

Trockenmasse & Trockendichte Sa/Si

STZ Nr.:	Schale + STZ+ Probe [g]	Schale [g]	STZ [g]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
6	768,0	188,8	204,2	375,0	249,0	1,51
7	760,0	181,3	204,0	374,7	249,0	1,50
10	764,7	186,1	205,2	373,4	249,0	1,50

Trockenmasse & Trockendichte Si/Sa

STZ Nr.:	Schale + STZ+ Probe [g]	Schale [g]	STZ [g]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
25	768,3	187,4	208,4	372,5	249,0	1,50
26	767,7	189,3	205,3	373,1	249,0	1,50
28	765,9	186,1	206,5	373,4	249,0	1,50

Trockenmasse & Trockendichte Sa & Si

STZ Nr.:	Schale + STZ+ Probe [g]	Schale [g]	STZ [g]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]
3	804,6	187,4	205,3	411,9	249,0	1,65
4	807,9	189,3	203,4	415,3	249,0	1,67
5	804,5	186,0	203,2	415,3	249,0	1,67

G3 Messprotokoll HYPROP®-Versuch Berechnung des Anfangswassergehaltes der Bodenproben

Anfangswassergehalt Bodenprobe Sa

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Gesättigt		Trocken		Wassergehalt [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [M-%]
		Hyprop+STZ+Probe [g]	Hyprop [g]	STZ [g]	Probe [g]			
21	32	995,5	368,4	206,2	330,0	90,8	330,0	27,5
23	33	1002,1	369,3	207,7	329,9	95,3	329,9	28,9
24	21	994,9	366,5	202,7	331,4	94,4	331,4	28,5

Anfangswassergehalt Bodenprobe Si

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Gesättigt		Trocken		Wassergehalt [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [M-%]
		Hyprop+STZ+Probe [g]	Hyprop [g]	STZ [g]	Probe [g]			
25	675	1069,3	359,5	208,3	408,5	93,0	408,5	22,8
28	676	1069,3	360,8	206,4	409,8	92,3	409,8	22,5
30	705	1071,6	360,3	208,0	411,5	91,8	411,5	22,3

Anfangswassergehalt Bodenprobe Sa/Si

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Gesättigt		Trocken		Wassergehalt [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [M-%]
		Hyprop+STZ+Probe [g]	Hyprop [g]	STZ [g]	Probe [g]			
6	676	1040,6	359,9	204,2	375,0	101,5	375,0	27,1
7	705	1040,9	359,7	204,0	374,7	102,4	374,7	27,3
10	675	1038,1	359,5	205,2	373,4	100,0	373,4	26,8

Anfangswassergehalt Bodenprobe Si/Sa

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Gesättigt		Trocken		Wassergehalt [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [M-%]
		Hyprop+STZ+Probe [g]	Hyprop [g]	STZ [g]	Probe [g]			
25	675	1046,3	360,2	208,4	372,5	105,3	372,5	28,3
26	705	1042,8	359,9	205,3	373,1	104,5	373,1	28,0
28	676	1045,2	360,1	206,5	373,4	105,2	373,4	28,2

Anfangswassergehalt Bodenprobe Sa & Si

STZ Nr.:	Hyprop Nr.:	Gesättigt		Trocken		Wassergehalt [g]	Trockenmasse [g]	Wassergehalt [M-%]
		Hyprop+STZ+Probe [g]	Hyprop [g]	STZ [g]	Probe [g]			
3	705	1070,4	360,1	205,3	411,9	93,1	411,9	22,6
4	676	1072,8	360,2	203,4	415,3	94,0	415,3	22,6
5	675	1071,1	359,8	203,2	415,3	92,8	415,3	22,4

G4 Messprotokoll HYPROP®-Versuch Berechnung des Sättigungsgrades der Bodenproben

Sättigungsgrad Bodenprobe Sa

STZ Nr.:	Korndichte [g/cm ³]	Wassergehalt [M-%]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Porenziffer e [-]	Porosität n [-]	Sättigungsgrad Sr [%]
21	2,78	27,5	330,0	235,0	0,98	0,49	78,1
23	2,78	28,9	329,9	235,0	0,98	0,50	81,9
24	2,78	28,5	331,4	235,0	0,97	0,49	81,5

Sättigungsgrad Bodenprobe Si

STZ Nr.:	Korndichte [g/cm ³]	Wassergehalt [M-%]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Porenziffer e [-]	Porosität n [-]	Sättigungsgrad Sr [%]
25	2,77	22,8	408,5	249,0	0,69	0,41	91,6
28	2,77	22,5	409,8	249,0	0,68	0,41	91,3
30	2,77	22,3	411,5	249,0	0,68	0,40	91,4

Sättigungsgrad Bodenprobe Sa/Si

STZ Nr.:	Korndichte [g/cm ³]	Wassergehalt [M-%]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Porenziffer e [-]	Porosität n [-]	Sättigungsgrad Sr [%]
6	2,78	27,1	375,0	249,0	0,85	0,46	88,9
7	2,78	27,3	374,7	249,0	0,85	0,46	89,7
10	2,78	26,8	373,4	249,0	0,85	0,46	87,2

Sättigungsgrad Bodenprobe Si/Sa

STZ Nr.:	Korndichte [g/cm ³]	Wassergehalt [M-%]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Porenziffer e [-]	Porosität n [-]	Sättigungsgrad Sr [%]
25	2,78	28,3	372,5	249,0	0,86	0,46	91,5
26	2,78	28,0	373,1	249,0	0,86	0,46	91,0
28	2,78	28,2	373,4	249,0	0,85	0,46	91,8

Sättigungsgrad Bodenprobe Sa & Si

STZ Nr.:	Korndichte [g/cm ³]	Wassergehalt [M-%]	Trockenmasse [g]	Volumen [cm ³]	Porenziffer e [-]	Porosität n [-]	Sättigungsgrad Sr [%]
3	2,78	22,6	411,9	249,0	0,68	0,40	92,3
4	2,78	22,6	415,3	249,0	0,67	0,40	94,3
5	2,78	22,4	415,3	249,0	0,67	0,40	93,2