

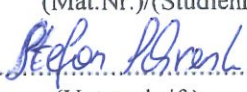



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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: SCHRENK Stefan (Name)	1230690 F 066 466 (Mat.Nr.)/(Studienrichtung)  (Unterschrift)
THEMA der Masterarbeit: Auswirkungen von Dichteunterschieden 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 einem Material mit einer festen Gesamtkorngrößenverteilung und Herstellung homogener (strukturloser) Proben mit unterschiedlicher Einbaudichte- 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 Dichteveränderung auf das hydraulische Verhalten ermöglichen.	
FACHGEBIET:	Bodenmechanik und Grundbau
ggf. 2. FACHGEBIET:	
BETREUER: O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roman Marte (Name)	 (Unterschrift)
2. BETREUER: Ass.-Prof. Mag. Dr.rer.nat. Gerfried Winkler (Name)	 (Unterschrift)
mitbetreuender Assistent: Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz (Name)	 (Unterschrift)
AUSGABEDATUM:	13.03.2017
INSTITUT FÜR BODENMECHANIK UND GRUNDBAU TECHNISCHE UNIVERSITÄT GRAZ A-8010 GRAZ, RECHBAUERSTRASSE 12	
SPÄTESTER ABGABETERMIN:	31.08.2017

Beurteilung:

Beurteilung erfolgt durch die Betreuer
--

18.7.17 

.....
Datum und Unterschrift des Studiendekans

Vorwort

Die folgende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Auswirkung von Dichteänderungen auf die hydraulischen Eigenschaften von teilgesättigten Böden. Im Zuge dieser Arbeit kam es zu einer Kooperation der Technischen Universität Graz und der Karl Franzens - Universität Graz, da die Versuche auf beide Universitäten aufgeteilt wurden.

Die Indexversuche sowie die Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Triaxialzelle, wurden im geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Der Verdunstungsversuch, der Drucktopfversuch und die Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Permeameter wurden im Labor des Institutes für Erdwissenschaften der Karl Franzens - Universität Graz durchgeführt.

Nach Beendigung der Versuche und Auswertung der Ergebnisse, konnte eine Aussage über die Einwirkung von unterschiedlichen Dichten auf die hydraulischen Eigenschaften des Bodens getroffen werden.

Graz, im [Monat Jahr]

[Stefan Schrenk]

Kurzfassung

Zu Beginn dieser Arbeit wurden im geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz, später nur mehr TUG genannt die Indexversuche zur Bestimmung der Korngrößenverteilung, der Korndichte, der Proctordichte mit dazugehörigem Wassergehalt sowie die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle durchgeführt.

Währenddessen wurden im Labor des Institutes für Erdwissenschaften der Karl Franzens - Universität Graz, später nur mehr KFU genannt die Vorbereitungen für den Permeameterversuch und den Verdunstungsversuch mittels HYPROP® vorbereitet. Ein „Trockentest“ des Verdunstungsversuchs wurde gestartet, um vor allem den Entgasungsprozess und das Ansprechverhalten der Tensiometer zu prüfen.

Die Probenherstellung erfolgte im geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG. Es wurden in Summe vier Probenserien, mit jeweils drei in Stechzylinder gepresste Bodenproben, mit unterschiedlicher Dichte und Einbauart für den Verdunstungs- und Permeameterversuch hergestellt. Für den Drucktopfversuch wurde das Bodenmaterial in sechs Kunststoffringe gepresst und bei der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle wurden drei Probenkörper benötigt.

Die Äufsättigung der Proben, Durchführung der Versuche und Auswertung der Ergebnisse erfolgte im Labor des Institutes für Erdwissenschaften der KFU.

Nach Beendigung der Versuche wurden die Ergebnisse ausgewertet und die Probenserien miteinander verglichen, um den Einfluss der Dichte und der Einbauart zu verdeutlichen.

Abstract

Reason for this Master thesis is to show the influence of density at the hydraulic properties of a partially saturated soil.

At the beginning of this Master thesis the properties of the chosen material were tested in the geotechnical laboratory of the Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering at the Technical University Graz.

Also the production of the samples was done at the Technical University Graz. Furthermore the hydraulic conductivity with the triaxialcell was estimated there.

In the laboratory of the institute of Earth Science at the Karl Franzens - University the whole sample saturation, the permeability trial with permeameter, the suction test, called HYPROP[®] and the pressure plate trial were done.

In total 12 samples for the permeameter and suction test, six samples for the pressure bottle trials and three samples for the permeability test with the triaxial-cell were produced. All results were summarised and compared together.

After determination of the results it is possible to show the dependency of the density and also the influence of the sample layering of the hydraulic properties of the material.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Untersuchungsziel dieser Arbeit	1
1.2	Allgemeiner Versuchsablauf	2
2	Teilgesättigter Boden	3
2.1	Allgemein	3
2.2	Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften	6
3	Probenherstellung und Versuche	8
3.1	Indexversuche des Bodenmaterials	8
3.1.1	Korngrößenverteilung (ÖNORM B 4400-1:2010)	9
3.1.2	Korndichtebestimmung (ÖNORM EN ISO 17892-3:2015)	12
3.1.3	Proctorversuch (ÖNORM EN 13286-2:2010)	14
3.2	Herstellung der Bodenproben	15
3.3	Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften	17
3.3.1	Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle (ÖNORM B 4422-1:1992)	19
3.3.2	Durchlässigkeitsversuch mittels Permeameter	20
3.3.3	Drucktopfmethode (ÖNORM L 1063)	23
3.3.4	Verdunstungsversuch HYPROP® (UMS, 2015)	25

4	Ergebnisse der Versuche	33
4.1	Ergebnisse der Korngrößenverteilung	33
4.2	Ergebnisse der Korndichtebestimmung	35
4.3	Ergebnisse des Proctorversuchs	36
4.4	Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle	37
4.5	Ergebnisse des Durchlässigkeitsversuchs mittels Permeameter	38
4.5.1	Erste Probenserie (Einbaudichte = 1,58 g/cm ³)	38
4.5.2	Zweite Probenserie (1,75 g/cm ³ und 1,58 g/cm ³)	39
4.5.3	Dritte Probenserie (1,58 g/cm ³ und 1,75 g/cm ³)	40
4.5.4	Vierte Probenserie (Einbaudichte = 1,67 g/cm ³)	41
4.6	Ergebnisse der Drucktopfmethode	42
4.7	Ergebnisse des Verdunstungsversuchs	43
4.7.1	Probenserie 1	44
4.7.2	Probenserie 2	48
4.7.3	Probenserie 3	52
4.7.4	Probenserie 4	56
4.8	Ergebnisgegenüberstellung	60
4.8.1	Permeameter und Triaxialzelle	60
4.8.2	Wasserretentionskurven der Probenserien	62

4.8.3	Durchlässigkeitskurven der Probenserien	67
4.9	Ergebniszusammenfassung	68
5	Diskussion	69
6	Fazit	73
6.1	Persönliche Sichtweise	73
6.2	Hinweise für zukünftige Forschung	74
	Literaturverzeichnis	75
	Anhang	78

Formelzeichen und Abkürzungen

Abkürzungen

<i>HYPROP</i> [®]	Hydraulic Property Analyser
<i>KFU</i>	Karl Franzens – Universität
<i>PWP</i>	Permanenter Welkepunkt
<i>STZ</i>	Stechzylinder
<i>TUG</i>	Technische Universität Graz

Große Buchstaben

<i>A</i>	[cm ²];[m ²]	Querschnittsfläche der Probe
<i>C_U</i>	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
<i>C_C</i>	[-]	Krümmungszahl
<i>D₁₀</i>	[mm]	Korndurchmesser bei 10 % Masseanteil der Gesamtmasse
<i>D₃₀</i>	[mm]	Korndurchmesser bei 30 % Masseanteil der Gesamtmasse
<i>D₆₀</i>	[mm]	Korndurchmesser bei 60 % Masseanteil der Gesamtmasse
<i>H</i>	[-]	Zahl von <i>Henry</i> ($H \approx 0,02$ bei 20 °C)
<i>K(h)</i>	[cm/d]	ungesättigte Durchlässigkeit
<i>K_s</i>	[cm/d]	gesättigte Durchlässigkeit
<i>K_r(h)</i>	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit
<i>L</i>	[m]	Durchströmungslänge
<i>R</i>	[m]	Meniskusradius
<i>S_r</i>	[-];[%]	Sättigungszahl; Sättigungsgrad
<i>T_s</i>	[N/m]	Grenzflächenspannung bzw. freie Oberflächenenergie
<i>V</i>	[cm ³]	Volumen der Bodenprobe (249 cm ³)
<i>V_w</i>	[cm ³];[m ³]	Wasservolumen

Kleine Buchstaben

e	[-]	Porenzahl
h_{10}	[mPa*s]	dynamische Viskosität von Wasser bei 10 °C
h	[1/hPa]	Saugspannung bzw. Matrixpotential
h_T	[mPa*s]	dynamische Viskosität von Wasser bei T °C
h_w	[m]	hydraulische Druckhöhe
Δh	[cm]	Wasserspiegeldifferenz
i	[-]	hydraulischer Gradient
k_{10}	[cm/s]	Durchlässigkeitsbeiwert k bei 10 °C
k_T	[cm/s]	k-Faktor bei Ist-Temperatur
k_g	[m/s]	Durchlässigkeit bei ϑ
m	[-]	zusätzlicher Kurvenparameter
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
m_w	[g]	Wassermasse
n	[-]	Kurvenparameter, bestimmt die Kurvensteigung
n	[%]	Porosität
p_a	[bar]	Luftdruck
p_w	[bar]	Wasserdruck
pF	[-]	dekadischer Logarithmus der Höhe der Wassersäule in cm
Δp^{kap}	[bar]	Differenzdruck
s	[bar]	Saugspannung oder Kapillarsaugspannung (matrix suction)
s_e	[hPa]	Lufttrittspunkt
t	[sec]	Messzeitraum bei der Prüfung
u_a	[hPa]	Luftdruck
u_{cap}	[hPa]	Druckdifferenz
u_w	[hPa]	Wasserdruck
w	[M-%]	gravimetrischer Wassergehalt
w_{opt}	[%]	optimaler Wassergehalt

Griechische Buchstaben

α	[1/cm]	Kurvenparameter, bestimmt den Kurvenwendepunkt
ψ_m	[hPa]	Matrixpotential bzw. Saugspannung
ρ_d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ	[g/cm ³]	Bodendichte
ρ_{Pr}	[g/cm ³]	Proctordichte, höchste Trockendichte
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wasser ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$)
Θ	[cm ³ /cm ³]	momentaner volumetrischer Wassergehalt
Θ_r	[cm ³ /cm ³]	residualer volumetrischer Wassergehalt
Θ_s	[cm ³ /cm ³]	volumetrischer Wassergehalt bei Bodensättigung
ϑ	[°C]	Wassertemperatur

Erklärung der Begriffe

Aufsättigung (ÖNORM L 1065)

Die Poren der Bodenproben werden durch regelmäßige Wasserzugabe von unten nach oben, zufolge der Kapillarität mit Wasser gefüllt, bis diese kein Wasser mehr aufnehmen können und sich ein Wasserfilm auf der Probenoberseite bildet.

Bodendichte ρ (ÖNORM EN ISO 17892-2:2014)

Masse des Bodens je Volumeneinheit des Materials einschließlich des darin enthaltenen Wassers oder Gases.

Dispergierung (ÖNORM EN ISO 17892-4:2016)

Mechanische oder chemische Behandlung einer Bodenprobe zu deren Trennung in Einzelkörner.

Drucktopf (ÖNORM L 1063)

Prüfgerät zur Bestimmung des Wassergehaltes bei verschiedenen Druckstufen (5 bis 15 bar).

Durchlässigkeitskoeffizient k_d

Gibt an mit welcher Geschwindigkeit das Wasser, bei einer bestimmten Temperatur durch den Boden fließt.

Fitting / Fittingparameter

In der Auswertungssoftware werden die berechneten Kurven als Fitting bezeichnet und die, für die Berechnung verwendeten Parameter folglich Fittingparameter genannt.

Hydraulischer Gradient i

Entspricht dem Verhältnis zwischen Wasserspiegeldifferenz Δh und der durchströmten Probenlänge L .

HYPROP® (UMS, 2015)

HYdraulic PROPerty analyser der Firma UMS zur Bestimmung der Saugspannungen und der Leitfähigkeit von Bodenproben.

HYPROP® - Topf

Darunter wird die Messeinheit für den Verdunstungsversuch verstanden. Der integrierte Druckaufnehmer (Manometer) zeichnet die in den Tensiometerkerzen auftretenden Saugspannungen auf.

Keramikplatte

Platte aus Keramik mit bestimmtem Lufteintrittswert und integriertem Wasserablassventil (Wasser der Proben wird über die Platte aus dem Drucktopf geleitet).

Korndichte ρ_s (ÖNORM EN ISO 17892-3:2015)

Trockenmasse der Kornteilchen, bezogen auf ihr Volumen.

Korngrößenverteilung (ÖNORM EN ISO 14688-1:2002 + A1:2013)

Maß der Korngrößen des Bodens und ihre Verteilung.

Krümmungszahl C_c (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 + A1:2013)

Maß für den Verlauf der Körnungslinie im Bereich zwischen d_{10} und d_{60} .

Lufteintrittspunkt s_e

Entspricht jenem Druck der den Unterdruck u_{cap} überschreitet und Luft in die Bodenporen eindringt.

Massenkonstanz (ÖNORM EN 933-1:2012)

Aufeinanderfolgende Wägungen nach dem Trocknen im zeitlichen Abstand von mindestens 1 h differieren nicht mehr als 0,1 %.

Matrixpotential ψ_m (ÖNORM L 1063:2006)

Arbeit, die verrichtet werden müsste, um eine infinitesimale Masse an Wasser, geteilt durch ihr Volumen, ihre Masse od. ihr Gewicht, von einem Vorrat auf gleicher Höhe und bei gleichem Gasdruck reversibel und isothermal in den betrachteten Punkt im Boden überzuführen.

Mittelwertdichte

Entspricht dem Mittelwert aus mindestens zwei verschiedenen Dichten.

Permeameter

Versuchsapparat zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k_d .

pF – Wert (Clodewey, Hölting, 2013)

wird in der Erdwissenschaft als Druckeinheit verwendet und entspricht dem dekadischen Logarithmus der Höhe der Wassersäule in cm (hPa).

Porenziffer e (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 + A1:2013)

Verhältnis des Porenvolumens zum Feststoffvolumen eines Bodens.

Proctordichte (ÖNORM EN 13286-2:2010)

Im Labor erreichbare Referenz-Trockendichte, die beim Proctorversuch bei einer spezifischen Energie von etwa $0,6 \text{ MJ/m}^3$ aus der ermittelten Beziehung Trockendichte/Wassergehalt bestimmt wird.

Proctorkurve

Eine Kurve die durch Verbinden der einzelnen Verdichtungspunkte, bestehend aus der berechneten Dichte und dem zugehörigem Wassergehalt, entsteht.

Sättigungsgrad

Beschreibt den prozentuellen Wassergehalt in den Bodenporen bezogen auf die Porosität, 100 % Sättigung entspricht einer vollständigen Wasserfüllung der Poren ($\Theta = n$).

Schichtaufbau

Das Einbringen des Bodenmaterials in die Stechzylinder erfolgt schichtweise (mind. zwei Schichten). Dieser Probenaufbau kann aus nur einer oder mehreren unterschiedlichen Dichten bestehen.

Stechzylinder (STZ) (ÖNORM L 1065:2006)

Dünnwandiger Metallzylinder mit bestimmten Abmessungen.

Teilweise bzw. ungesättigter Boden

Darunter wird ein Boden dessen Poren sowohl mit Wasser als auch Luft gefüllt sind verstanden.

Tensiometer (UMS, 2015)

Bestehen aus einem Kapillarröhrchen mit aufgesetzter Keramikspitze (Lufteintrittswert = 8,8 bar) und eingefrästem Gewinde für den Druckaufnehmer im HYPROP®-Topf. Sie werden ebenfalls Tensiometerkerzen oder nur Kerzen genannt.

Triaxialzelle (ÖNORM B 4422-1:1992)

Versuchsapparat zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten k_d .

Trockendichte ρ_d (ÖNORM EN ISO 17892-2:2014)

Masse des ofengetrockneten Bodens je Volumeneinheit des Materials.

Ungleichförmigkeitszahl C_U (ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 + A1:2013)

Maß für die Steilheit der Körnungslinie im Bereich d_{10} bis d_{60} .

Vergleichskoeffizient k_{10}

Durchlässigkeitsbeiwert k_{θ} , der auf eine Vergleichstemperatur von 10 °C nach ÖNORM B 4422-1:1992 oder Wit, 1963 umgerechnet wird.

Wassergehalt w (ÖNORM EN ISO 17892-1:2014)

Verhältnis der Masse des freien Wassers zur Masse der trockenen Bodenbestandteile.

Wasserretentionskurve

Stellt den Wasserverlust einer Bodenprobe, zufolge Evaporation, bezogen auf die entstehenden Saugspannungen dar.

Wasserrückhaltevermögen (ÖNORM L 1063:2006)

Beziehung zwischen dem Wasseranteil und dem Matrixpotential einer Bodenprobe (auch pF – Kurve oder Bodenwasserretentionskennlinie genannt).

Zelldruck („Backpressure“)

Darunter wird jener Druck verstanden welcher in der Triaxialzelle aufgebracht wird um ein Ausdehnen des Probekörpers, zufolge des Durchströmungsdruckes zu verhindern.

1 Einleitung

1.1 Untersuchungsziel dieser Arbeit

Das Ziel dieser Masterarbeit ist es zu untersuchen wie sich Dichteänderungen auf die hydraulischen Eigenschaften wie Durchlässigkeit und Saugspannungen des teilgesättigten Bodens auswirken.

Nach den Indexversuchen wurden die Proben für die zwei Hauptversuche, die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter und der Verdunstungsversuch durch den HYPROP[®] hergestellt. Nebenbei wurden die Versuchsvorbereitungen zur Bestimmung der Bodendurchlässigkeit mittels Triaxialzelle und der Drucktopfmethode getroffen und die Versuche ausgeführt.

Bei der Herstellung wurden in Summe 21 Proben mit unterschiedlicher Dichte in unterschiedliche Behälter (Stechzylinder, Proctortopf A nach ÖNORM EN 13286-2:2010 und Kunststoffringe), deren Volumen bekannt ist mittels hydraulischer Presse eingepresst. Neben der Dichte wurde auch der Schichtaufbau variiert.

Für die beiden Hauptversuche wurden Stechzylinder (STZ) mit einem Volumen von 250 cm³, für die Drucktopfmethode Kunststoffringe mit einem Volumen von 22,06 cm³ und für die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle der Proctortopf A (ÖNORM EN 13286-2, 2010) mit einem Volumen von 942,48 cm³ verwendet.

Die Auswertung des Verdunstungsversuchs erfolgte mittels HYPROP-FIT[®] Software Version 3.5.1.13951. Nach Beendigung der Versuche wurden die Ergebnisse zusammengefasst und einander gegenübergestellt um den Einfluss der Dichte und des Schichtaufbaus zu verdeutlichen.

1.2 Allgemeiner Versuchsablauf

Zuerst wurden die Indexversuche zu denen die Korngrößenbestimmung, die Bestimmung der Korndichte und der Proctorversuch zählen, im geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG durchgeführt. Die Herstellung der Proben sowie die Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Triaxialzelle erfolgten ebenfalls auf der TUG.

Alle weiteren Versuche wie die beiden Hauptversuche mittels Permeameter oder HYPROP[®] und der Drucktopfversuch wurden im Labor des Institutes für Erdwissenschaften der KFU durchgeführt.

Somit erfolgte diese Masterarbeit als eine Kooperation beider Universitäten.

- **Der allgemeine Versuchsablauf schaute wie folgt aus:**

1. Einpressen der Versuchsproben auf der TUG.
2. Aufsättigung der Proben im Permeameter und anschließende Durchlässigkeitsprüfung, währenddessen konnten alle Vorbereitungen für den Verdunstungsversuch durchgeführt werden.
3. Einbau der aufgesättigten Proben in die HYPROP[®] - Töpfe und Start der Saugspannungsprüfung.
4. Auswertung der Ergebnisse und Trockenlegung des HYPROP[®] - Equipments.
5. Wiederholung der Schritte 1 - 4 mit den nächsten drei Versuchsproben.

Neben den oben angeführten Schritten wurden noch eine Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle auf der TUG und der Drucktopfversuch auf der KFU, für die erste Probenserie durchgeführt.

Alle eben genannten Verfahren sowie die Herstellung der Probenserien werden im Kapitel 3 näher beschrieben.

2 Teilgesättigter Boden

2.1 Allgemein

Der Aufbau eines teilgesättigten bzw. ungesättigten Bodens besteht aus den drei folgenden Phasen und ist in Abb. 1 abgebildet.

1. Feststoffphase → bestehend aus den Bodenkörnern
2. Flüssige Phase → Wasser in den Bodenporen
3. Gasförmige Phase → Luft in den Bodenporen

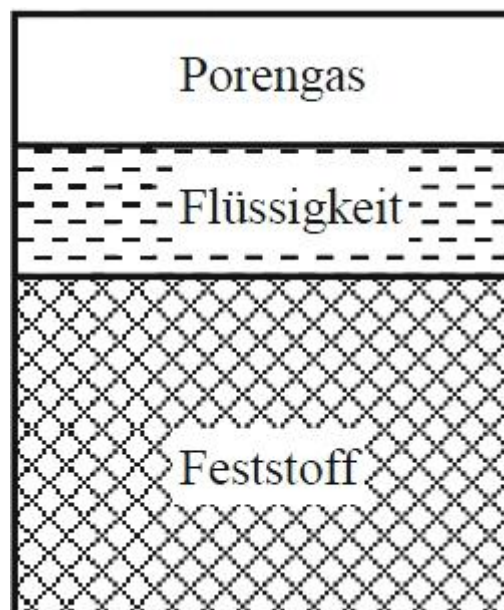


Abb. 1: Drei Phasensystem eines ungesättigten Bodens (Boley, 2012)

Im vollständig gesättigten Zustand besteht der Boden nur aus der festen und flüssigen Phase, im trockenen Zustand werden die Poren der Festsubstanz mit Luft gefüllt.

Nimmt die Sättigung des Bodens ab, kommt es zum Kontakt zwischen der gasförmigen und flüssigen Phase in den Bodenporen. An der Kontaktfläche trifft der Luftdruck u_a und der Wasserdruck u_w aufeinander, jedoch differieren die Drücke um die Druckdifferenz u_{cap} . An der Grenzfläche der beiden Phasen bildet sich aufgrund der Porenbeschaffenheit und der Druckdifferenz der beiden Phasen ein Meniskus, wie in Abb. 2 dargestellt aus.

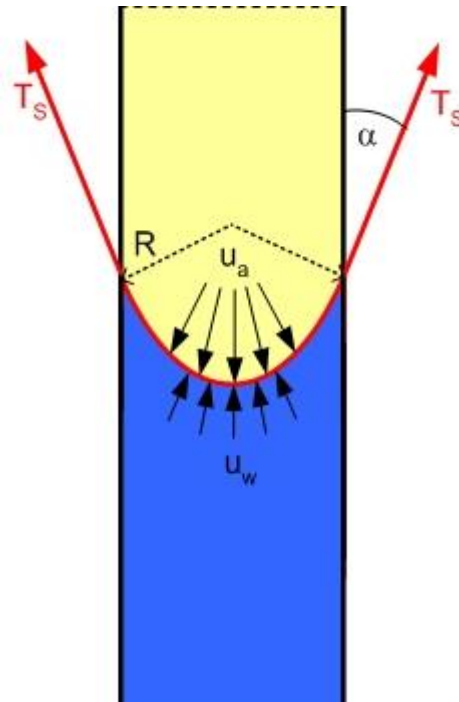


Abb. 2: Meniskusbildung in einem Kapillarrohr (Leibniz, 2013)

Die durch die Krümmung des Meniskus resultierende Grenzflächenspannung T_s hängt vom Benetzungswinkel α , dem Radius des Meniskus und der Druckdifferenz zwischen u_w und u_a ab.

Der Zusammenhang zwischen der Druckdifferenz und der Grenzflächenspannung wird durch Formel (1) dargestellt.

$$u_{cap} = u_a - u_w = \frac{2 \cdot T_s}{R} \quad (1)$$

u_{cap}	[hPa]	Druckdifferenz
u_a	[hPa]	Luftdruck
u_w	[hPa]	Wasserdruck
T_s	[N/m]	Grenzflächenspannung bzw. freie Oberflächenenergie
R	[m]	Meniskusradius

Die Druckdifferenz u_{cap} erzeugt auf der konkaven Seite der Grenzfläche, einen Unterdruck welcher auch als Saugspannung bzw. Kapillarsaugspannung bekannt ist. Somit kann davon ausgegangen werden, dass sich die Saugspannungen im Boden durch eine Reduzierung des Poren- und zugleich Meniskusdurchmesser erhöhen und die Wassersäule in den Poren ansteigt.

Die wirkenden Saugspannungen werden auch als Matrixpotential ψ_m (matrix suction) bezeichnet und erhöhen sich durch Abnahme des Sättigungsgrades zufolge von Evaporation. Mittels Formel (2) (Clodewey, Hölting, 2013) wird die Abhängigkeit des Matrixpotentials vom Sättigungsgrad und des pF-Wertes dargestellt.

$$\{pF\} = \lg\{\psi_m\} = f(S_r) \quad (2)$$

pF	[-]	dekadischer Logarithmus der Höhe der Wassersäule in cm
ψ_m	[hPa]	Matrixpotential bzw. Saugspannung
S_r	[-]	Sättigungsgrad

In den Erdwissenschaften wird für die Saugspannung der pF-Wert (p wie Potential, F wie freie Energie) (Clodewey, Hölting, 2013) und in der Bodenmechanik die Druckeinheit hPa oder kPa als Einheit verwendet.

Eine Darstellung der Saugspannung erfolgt mittels Wasserretentionskurve und kann auf den gravimetrischen bzw. volumetrischen Wassergehalt, sowie den Sättigungsgrad bezogen werden. Der Anfangswassergehalt des Bodens bleibt beim Erhöhen der Saugspannungen bis zum Erreichen des Lufteintrittspunktes s_e annähernd konstant und beginnt dann abzufallen. In Kapitel 4.7 wird näher auf die Wasserretentionskurven eingegangen.

Luft kann nur in die Pore mit einem Durchmesser von $2R$ eindringen, wenn der Luftüberdruck den Wert der Saugspannung u_{cap} überschreitet und der sogenannte Lufteintrittspunkt s_e erreicht ist. Die formelle Darstellung des Lufteintrittspunktes erfolgt mittels Formel (3) (Kolymbas, 2011).

$$s_e = \frac{2 \cdot T_s}{R} = u_{cap} \quad (3)$$

s_e	[hPa]	Lufteintrittspunkt
T_s	[N/m]	Grenzflächenspannung bzw. freie Oberflächenenergie
R	[m]	Meniskusradius
u_{cap}	[hPa]	Druckdifferenz

Neben der Kapillarsaugspannung gibt es noch die osmotische Saugspannung aufgrund des Salzgehalts im Boden. Enthält eine Pore Wasser mit erhöhtem Salzgehalt und steht im Kontakt mit einem Wasserreservoir mit niedriger Salzkonzentration, wird das Wasser mit geringerem Salzanteil in die Pore hineingezogen, bis es zu einem Konzentrationsausgleich kommt und die osmotische Saugspannung gleich null wird.

2.2 Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften

Durch die Abnahme des Sättigungsgrades erhöhen sich die Saugspannungen und Luft dringt zunehmenden in den Porenraum ein. Das resultierende Luftvolumen V_L in den Poren kann durch die Formel (4) (Amann et.al., 2011) berechnet werden.

$$V_L = (1 - S_r) * V_P + S_r * V_P * H \quad (4)$$

V_L	[cm ³]	Luftvolumen in den Poren
V_P	[cm ³]	Porenvolumen
S_r	[-]	Sättigungsgrad
H	[-]	Zahl von <i>Henry</i> ($H \approx 0,02$ bei 20 °C)

Für die Berechnung des Porendruckes unter Berücksichtigung des Sättigungsgrades, kann die Formel (5) (Kolymbas, 2011) mit der unter Kapitel 2 angeführten Konvention herangezogen werden.

$$u = (1 - S_r) * u_a + S_r * u_w \quad (5)$$

u	[hPa]	Porenwasserdruck
u_a	[hPa]	Luftdruck
u_w	[hPa]	Wasserdruck
S_r	[-]	Sättigungsgrad

Durch die Veränderung des Porenwasserdruckes kommt es ebenfalls zu Veränderungen der effektiven Spannungen im Boden. Wird in die Definition der effektiven Spannungen für wassergesättigte Böden die Formel (5) für den Porenwasserdruck eingesetzt, erhält man Formel (6) (Kolymbas, 2011).

$$\sigma' = \sigma - u = \sigma - u_a + S_r * (u_a - u_w) \quad (6)$$

σ'	[hPa]	effektive Spannungen
σ	[hPa]	totale Spannungen
u	[hPa]	Porenwasserdruck
u_a	[hPa]	Luftdruck
u_w	[hPa]	Wasserdruck
S_r	[-]	Sättigungsgrad

Durch den in der Klammer geführten Ausdruck ($u_a - u_w$) wird die Saugspannung in die Gleichung mit einbezogen und ist folglich negativ einzusetzen.

Im Fall der Wasserretentionskurve, welche dem Entfeuchtungsprozess entspricht wird die Sättigungsgrad – Saugspannungsbeziehung durch Formel (7) (Kolymbas, 2011) dargestellt und kann für Formel (6) herangezogen werden.

$$S_r = \begin{cases} 1 & \text{für } u_{cap} < s_e \\ (s_e/u_{cap})^{T_s} & \text{für } u_{cap} > s_e \end{cases} \quad (7)$$

S_r	[-]	Sättigungsgrad
u_{cap}	[hPa]	Druckdifferenz
s_e	[hPa]	Lufteintrittspunkt
T_s	[N/m]	Grenzflächenspannung bzw. freie Oberflächenenergie

Zusammenfassend gilt, dass sich die effektiven Spannungen durch die Abnahme des Sättigungsgrades und die damit verbundene Erhöhung der Saugspannungen vergrößern. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass sich durch den zunehmenden Luftanteil in den Poren die Kompressibilität des Bodens erhöht.

Der Lufteintritt in den Boden verändert ebenfalls dessen hydraulische Durchlässigkeit. Grund hierfür ist, dass der Boden unter Sättigung am besten leitfähig ist, da das Wasser eine zusammenhängende Säule bildet. Durch die entstehenden Lufteinschlüsse muss das zu transportierende Wasser darum herumgeleitet werden, dies hat eine Verringerung der Leitfähigkeit mit abnehmendem Sättigungsgrad zur Folge.

Ebenfalls beachtet werden muss das feinporige Böden wie Tone, das Wasser über die Kapillarspannung aus bis zu 150 m Tiefe (Amann et.al., 2011) ansaugen können und die ermittelten Saugspannungen somit ebenfalls von Grundwasserspiegeländerungen abhängen.

3 Probenherstellung und Versuche

In den folgenden Kapiteln wird näher auf die Indexversuche, die Herstellung der Bodenproben und die Versuche zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften eingegangen.

3.1 Indexversuche des Bodenmaterials

Die Indexversuche wurden im geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG durchgeführt.

Darunter fallen die Korngrößenverteilung, die Korndichtebestimmung und der Proctorversuch.

Für die Kornverteilungskurve wurde das Bodenmaterial in zwei Fraktionen geteilt. Die Erste entspricht einem Korndurchmesser größer 0,063 mm (ÖNORM EN 933-1,2012) und wurde mit der Siebmethode untersucht. Die Zweite Fraktion besteht aus Korndurchmesser kleiner 0,063 mm (ÖNORM EN 933-1,2012) und wurde mit der Sedimentationsanalyse (Aräometerverfahren) nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2016 analysiert.

Bei der Korndichtebestimmung wurden ein Vakuumgerät und drei 100 ml Pyknometer verwendet. Die Pyknometer bestehen aus einer Glasbirne und einem konisch geschliffenen Glasstopfen.

Zur Ermittlung der Proctorkurve wurde der Proctorversuch nach ÖNORM EN 13286-2:2010 durchgeführt. Am Scheitelpunkt der Kurve kann die höchste Trockendichte ρ_{Pr} auf der Ordinate und der dazugehörige Wassergehalt w_{opt} auf der Abszisse abgelesen werden.

3.1.1 Korngrößenverteilung (ÖNORM B 4400-1:2010)

3.1.1.1 Allgemein

Mit der Korngrößenverteilung werden die Masseanteile einer Bodenart prozentuell über die verschiedenen Korndurchmesser angegeben. Hierbei wird auf der Abszisse der Korndurchmesser d [mm] in einer logarithmischen Skala aufgetragen. Auf der Ordinate sind die Masseanteile in Prozent der Gesamtmasse in einer linearen Skala aufgetragen.

Durch die Formeln (8) (ÖNORM B 4400-1, 2010) und (9) (ÖNORM B 4400-1, 2010) werden die Ungleichförmigkeitszahl C_U und die Krümmungszahl C_C ermittelt.

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (8)$$

C_U	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
D_{10}	[mm]	Korngröße die 10 % Masseanteile der Gesamtmenge entspricht
D_{60}	[mm]	Korngröße die 60 % Masseanteile der Gesamtmenge entspricht

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}} \quad (9)$$

C_C	[-]	Krümmungszahl
D_{10}	[mm]	Korngröße die 10 % Masseanteile der Gesamtmenge entspricht
D_{30}	[mm]	Korngröße die 30 % Masseanteile der Gesamtmenge entspricht
D_{60}	[mm]	Korngröße die 60 % Masseanteile der Gesamtmenge entspricht

Ein Boden kann mit den beiden Kennwerten C_U und C_C , als beispielsweise weit- oder enggestuft beschrieben werden. Ein weitgestufter Boden weist eine Ungleichförmigkeitszahl von > 15 und eine Krümmungszahl zwischen 1 und 3 auf (ÖNORM B 4400-1, 2010). Darunter versteht man eine flach abfallende Körnungslinie welche mehrere Korngrößenbereiche durchläuft.

Im Gegensatz dazu wird ein enggestufter Boden einen C_U - Wert von < 6 und einen C_C - Wert von < 1 aufweisen (ÖNORM B 4400-1, 2010). Dadurch fällt die Körnungslinie steiler ab und kann unter anderem aus nur einem Körnungsbereich bestehen.

3.1.1.2 Versuchsablauf

Zunächst wurde eine Trennung des Bodenmaterials für die Sieb- und Sedimentationsanalyse durch Auswaschen der Feinteile ($\leq 0,063$ mm Durchmesser) (ÖNORM EN 933-1, 2012) mittels Analysesieb (Maschenweite = 0,063 mm) und einem darüber liegendem Schutzsieb (Maschenweite = 0,125 mm) vorgenommen. Der Waschvorgang wird solange durchgeführt bis nur mehr klares Wasser aus dem Analysesieb abfließt.

Die anschließende Trocknung der beiden Fraktionen bis zur Massekonstanz erfolgt im Trockenschrank bei 110 ± 5 °C (ÖNORM EN 933 1, 2012).

- **Siebanalyse:**

Die Siebanalyse der Fraktion $> 0,063$ mm (ÖNORM EN 933-1, 2012) wurde händisch mit einem Turm aus Sieben, welche verschiedene Maschenweiten aufweisen (2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 und 0,063 mm) durchgeführt. Ein Beispiel für diesen Turm ist in Abb. 3 abgebildet. Die Materialrückstände der Siebe wurden gewogen und kumulativ ins Protokoll eingetragen.



Abb. 3: Siebturm des geotechnischen Labors des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG

- **Sedimentationsverfahren:**

Die Sedimentationsanalyse wurde mit einem Aräometer und einem 1000 ml Messzylinder entsprechend ÖNORM EN ISO 17892-4:2016 durchgeführt. Beide Gegenstände sind in der Abb. 4 dargestellt. Dazu wurden ca. 45 g des getrockneten Materials mit 25 g Natriumdiphosphat (Dispergierungsmittel) im Messzylinder vermengt und dieser mit destilliertem Wasser aufgefüllt. Die Suspension konnte nun für mind. 4 Stunden (ÖNORM EN ISO 17892-4, 2016) durch hin und her kippen des Zylinders durchmengt werden.

Die Probe gilt als durchmischelt, wenn die Bodenteilchen in der Suspension frei und ohne aneinander zu haften, schweben (ÖNORM EN ISO 17892-4, 2016). Mit Eintauchen des Aräometers in die Suspension wurde die Stoppuhr gestartet, die ersten Messungen im vorgegebenen Zeitintervall nach ÖNORM EN ISO 17892-4:2016 durchgeführt und die Temperatur gemessen.

Der Einsinkprozess des Aräometers erfolgt durch eine Dichteänderung zufolge der unterschiedlichen Absinkgeschwindigkeiten der Korngrößen. Ausgewertet wurden die ermittelten Messdaten durch das Gesetz von *Stokes*.



Abb. 4: Absinktiefenmessung mittels Aräometer

3.1.2 Korndichtebestimmung (ÖNORM EN ISO 17892-3:2015)

3.1.2.1 Allgemein

Unter der Korndichte versteht man die Trockenmasse der Kornteilchen, bezogen auf ihr Volumen (ÖNORM EN ISO 17892-3, 2015). Für den Versuch werden ein Vakuumgerät zur Entlüftung, sowie drei Kapillarpyknometer bestehend aus Glasbirnen mit einem Volumen von 100 ml und eingeschliffenen Glasstopfen mit Kapillarbohrungen verwendet. Die Wägungen erfolgten mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01$ g (ÖNORM EN ISO 17892-3, 2015).

3.1.2.2 Versuchsablauf

Die Versuchsdurchführung erfolgte nach ÖNORM EN ISO 17892-3:2015. Das Bodenmaterial wurde zuvor bis zur Massekonstanz getrocknet und mit einem Mörser zerkleinert. Obwohl das Größtkorn < 4 mm aufweist wurden drei Pyknometer mit einem Volumen von 100 ml verwendet. Zunächst wurden die Pyknometer auf der Waage in Abb. 5 rechts mit einer Genauigkeit von 0,01 g gewogen.

Das zerkleinerte und getrocknete Material wurde mit 17 – 19 g in die Pyknometer gefüllt und nochmals gewogen. Anschließend wurde destilliertes Wasser bis zur Materialüberdeckung von ca. 2 cm eingelassen (ÖNORM EN ISO 17892-3, 2015).

Der Entlüftungsprozess fand im Vakuumgerät, siehe Abb. 5 links, durch Erhöhen des Vakuums statt. Um diesen Vorgang zu beschleunigen wurden die Pyknometer zwischen den Steigerungen per Hand geschwenkt. Die entstehenden Luftbläschen entweichen während dem Ansetzen von Vakuum über die Kapillarbohrungen der Glasstopfen. In Abb. 6 sind drei Pyknometer im Vakuumgerät zu sehen.

Wenn keine Luftbläschen mehr austreten gilt das Pyknometer als entlüftet und die Glasbirne kann vollständig mit destilliertem Wasser befüllt werden. Durch Einpressen des Glasstopfens und dem damit verbundenen Wasseraustritt durch die Kapillarbohrung, befindet sich keine Luft mehr in der Suspension. Nach Abtrocknen der Pyknometer wurden sie gewogen und die Temperatur der Suspension gemessen.

Für die Berechnung der Korndichte ist die Viskosität von Wasser, welche von der Temperatur abhängt relevant. Um die Ergebnisse vergleichen zu können wurden alle Korndichten auf 20 °C berechnet.

Sollten die Ergebnisse für die Korndichte mehr als $0,03 \text{ g/cm}^3$ abweichen muss ein neuer Versuch durchgeführt werden.



Abb. 5: links: Vakuumerät des geotechnischen Labors des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG
rechts: Waage des Geotechnischen Labors des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG



Abb. 6: Pycnometer beim Entgasungsprozess

3.1.3 Proctorversuch (ÖNORM EN 13286-2:2010)

3.1.3.1 Allgemein

Aufgrund des vorhandenen Größtkorns von < 4 mm wurde der Proctorversuch mit dem Proctortopf A nach ÖNORM EN 13286-2:2010 und dem Fallgewicht A nach ÖNORM EN 13286-2:2010 durchgeführt. Es wurden sechs Verdichtungsversuche mit unterschiedlichem Wassergehalt ausgeführt und die Ergebnisse als Punkte der Proctorkurve dargestellt. Der Proctorapparat des geotechnischen Labors des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau ist in Abb. 7 zu sehen.

3.1.3.2 Versuchsablauf

Bei jedem der sechs Verdichtungsversuche wurden jeweils drei Lagen an Bodenmaterial mit jeweils dem gleichen Wassergehalt in den Proctortopf A eingebaut und mittels 25 Schläge des Fallgewichtes A verdichtet. Die Verdichtungsarbeit beträgt $0,6 \text{ MJ/m}^3$. Anschließend wird der Aufsatzring abgenommen und das überstehende Bodenmaterial abgestrichen. Die Wiegung des Topfes inkl. Grundplatte und Material erfolgt mit einer Genauigkeit von 1 g.

Das verdichtete Material wurde aus dem Topf ausgebaut und im Trockenschrank bis zur Massekonstanz nach ÖNORM EN 933-1:2012 getrocknet.

Nach der Trocknung wurde der Wassergehalt nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 und die Trockendichte eines jeden Verdichtungsversuches berechnet. Die Ergebnisse wurden als Punkte in die Proctorkurve eingetragen.

Am Scheitelpunkt der Kurve wurde die höchste Trockendichte ρ_{Pr} auf der Ordinate und der optimale Wassergehalt w_{opt} auf der Abszisse abgelesen.

Proctorkurve sowie Protokoll sind im Anhang A4 und Anhang A5 ersichtlich.

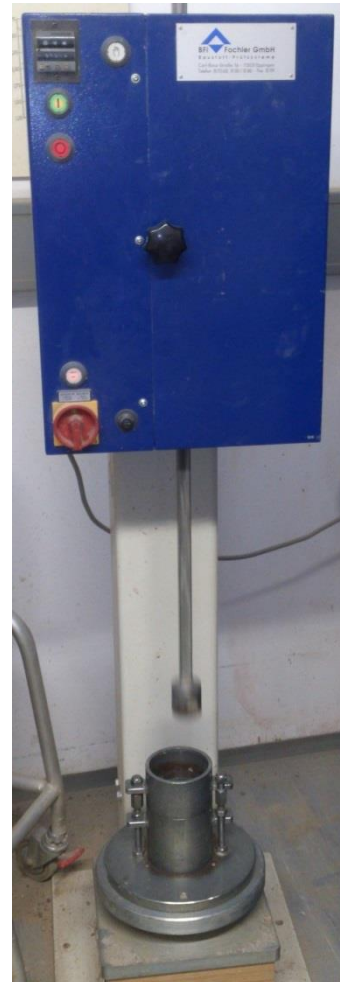


Abb. 7: Proctorapparat im geotechnischen Labor

3.2 Herstellung der Bodenproben

Nach Beendigung der Indexversuche wurden die Proben für die Versuche zur Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften im geotechnischen Labor des Institutes für Bodenmechanik und Grundbau der TUG hergestellt.

- **Probenherstellung für HYPROP® – und Permeameterversuch:**

Für die zwei Hauptversuche, HYPROP® und Permeameter, wurden vier Probenserien hergestellt. Jede Serie bestand aus drei Stechzylindern mit einer Höhe von 5 cm und einem Volumen von 250 cm³ in jene das Bodenmaterial eingepresst wurde.

Die Serien unterscheiden sich hinsichtlich ihres Schichtaufbaus sowie durch unterschiedliche Einbau- bzw. Bodendichten, für alle Serien wurde jedoch der gleiche Wassergehalt von 19,5 % verwendet.

- Die Zusammensetzung der vier Serien sieht wie folgt aus:

Serie 1: besteht aus einer Schicht von 5 cm Höhe und einer Bodendichte von 1,58 g/cm³.

Serie 2: besteht aus zwei Schichten von jeweils 2,5 cm Höhe. Die erste Schicht wurde mit einer Bodendichte von 1,75 g/cm³ und die zweite Schicht mit einer Bodendichte von 1,58 g/cm³ eingepresst. Die daraus resultierende Mittelwert-Bodendichte entspricht 1,67 g/cm³.

Serie 3: besteht ebenfalls aus zwei Schichten a 2,5 cm Höhe und den gleichen Bodendichten wie Serie 2, jedoch wurden die erste Schicht mit 1,58 g/cm³ und anschließend die Zweite mit 1,75 g/cm³ eingepresst.

Serie 4: besteht aus einer Schicht von 5 cm Höhe und einer Bodendichte von 1,67 g/cm³.

- **Einpressvorgang der vier Serien:**

Das Bodenmaterial wurde auf 0,1 g eingewogen und mit 19,5 % Wasser per Hand, siehe Abb. 8 durchmischt. Um das Einpressen zu erleichtern wurde das durchmischte Bodenmaterial stets in zwei Lagen pro Schicht verdichtet. Um kein Material zu verlieren wurde ein Adapteraufsatz für den STZ angefertigt, welcher



bei der letzten Schicht eingesetzt wurde. Die Verdichtung des Materials erfolgte mittels hydraulischer Presse und einem Stempel.

Abb. 8: Abmischen des Bodenmaterials für den Einpressvorgang

- **Probenherstellung für Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle:**

Für die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle wurden drei Proben hergestellt. Dazu wurde der Proctortopf A nach ÖNORM EN 13286-2:2010 verwendet und das durchmischte Bodenmaterial mit einer Einbaudichte von $1,58 \text{ g/cm}^3$ mittels hydraulischer Presse verdichtet. Auch hier wurde das trockene Material mit 19,5 % Wasseranteil durchgemengt.

Nach dem Einpressen wurde der Proctortopf abgezogen, die Probe ausgepresst und in die Triaxialzelle eingebaut.

- **Probenherstellung für die Drucktopfmethode:**

Bei der Probenherstellung für die Drucktopfmethode wurde ebenfalls eine Einbaudichte von $1,58 \text{ g/cm}^3$ mit einem Wasseranteil von 19,5 % gewählt. Eingepresst wurde das Material in sechs Kunststoffzylinder mit einer Höhe von 1 cm und einem Volumen von $22,06 \text{ cm}^3$. Auch hier wurde ein Aufsatzadapter verwendet um einen Materialverlust zu vermeiden.

3.3 Ermittlung der hydraulischen Eigenschaften

In diesem Kapitel wird auf die Durchlässigkeitsbestimmung, mittels Triaxialzelle und Permeameter, auf den Verdunstungsversuch mittels HYPROP® und die Drucktopfmethode für die Bestimmung des residualen Wassergehaltes, bei einem Druck von 15 bar näher eingegangen.

Mittels dieser Versuche wird untersucht wie sich die Dichteänderungen auf das hydraulische Verhalten des Bodenmaterials auswirken.

- **Permeameterverfahren und Triaxialzelle:**

Die Durchlässigkeit wurde mittels Triaxialzelle mit einem hydraulischen Gradienten von $i = 8$ und mittels Permeameter mit einem hydraulischen Gradienten von $i = 0,08$ bestimmt. Ein Gradient von $i = 8$ entspricht einer Wassersäule von 96 cm bei einer Probenhöhe von 12 cm und ein Gradient von $i = 0,08$ entspricht einer Wassersäule von 0,40 cm bei einer Probenhöhe von 5 cm. Durch den geringen Gradienten des Permeameter wurde ein Infiltrationsvorgang simuliert. Beim Versuch mittels Triaxialzelle wurde das Durchströmen der Probe in einer Tiefe von 0,96 m unter dem Grundwasserspiegel simuliert.

Für die Berechnung des Durchlässigkeitskoeffizienten k_{ϑ} kann bei beiden Methoden die Formel (10) (ÖNORM B 4422-1, 1992) nach dem Gesetz von *Dary* angewendet werden. Diese entspricht einem Versuch mit konstanter Druckhöhe.

$$k_{\vartheta} = \frac{V_w \cdot l}{A \cdot h_w \cdot t} \quad (10)$$

k_{ϑ}	[m/s]	Durchlässigkeit bei ϑ
V_w	[m ³]	Wasservolumen im Messzeitraum t
L	[m]	Durchströmungslänge
A	[m ²]	Querschnittfläche der Probe
h_w	[m]	hydraulische Druckhöhe
t	[sec]	Messzeitraum bei der Prüfung

Um die Ergebnisse vergleichbar zu machen wurden die errechneten k_{ϑ} -Werte mit Formel (11) (Wit, 1963) für die Permeametermethode und mit Formel (12) (ÖNORM B 4422-1, 1992) für die Triaxialmethode auf eine Vergleichstemperatur von 10 °C umgerechnet.

$$k_{10} = \frac{k_T \cdot h_T}{h_{10}} \quad (11)$$

k_{10}	[cm/s]	Durchlässigkeitsbeiwert k bei 10 °C
k_T	[cm/s]	k -Faktor bei Ist-Temperatur
h_{10}	[mPa*s]	dynamische Viskosität von Wasser bei 10 °C
h_T	[mPa*s]	dynamische Viskosität von Wasser bei T °C

$$k_{10} = \frac{1,359}{1+0,0337*\vartheta+0,000222*\vartheta^2} * k_{\vartheta} \quad (12)$$

k_{10}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert k bei einer Temperatur von 10 °C
k_{ϑ}	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert bei Temperatur ϑ
ϑ	[°C]	Wassertemperatur

- **Verdunstungsversuch mittels HYPROP®:**

Der Verdunstungsversuch wurde mittels HYPROP® durchgeführt. Hierbei wurde die Verdunstungsrate mit steigender Sauspannung in den Tensiometern gemessen und eine Wasserretentionskurve erstellt. Diese Kurve wurde durch die Saugspannungen bzw. das Matrixpotential auf der Ordinate und dem Wassergehalt auf der Abszisse dargestellt. Ebenfalls wurde die teilgesättigte Durchlässigkeit ermittelt und als Kurve aufgezeichnet. Die Auswertung der Messdaten erfolgte durch die HYPROP-FIT® Software (Version 3.5.1.13951).

- **Drucktopfmethode:**

Die Drucktopfmethode kann zur Bestimmung des residualen Wassergehaltes (Θ_r) bei einer Saugspannung von 15 bar (1.500 kPa) verwendet werden. Diese Spannung wird auch als permanenter Welkepunkt (PWP) bezeichnet. Darunter versteht man jene Bodenfeuchtigkeit welche für Pflanzen und ihre Wurzeln nicht mehr zugänglich sind.

Dieser PWP wird in die HYPROP-FIT® Software eingespielt und dient als weiterer Messpunkt bzw. Fittingparameter Θ_r .

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

3.3.1.1 Allgemein

Die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle wurde mit konstanter Druckhöhe von 0,96 m Wassersäule und einem daraus resultierenden hydraulischen Gradienten von $i = 8$ durchgeführt. Das Bodenmaterial wurde in drei Zellen eingebaut und die Messungen einzeln ausgeführt.

Nach der Ermittlung des Durchlässigkeitskoeffizienten k_9 durch die Formel (10) wurde dieser mittels Formel (12) auf den Vergleichskoeffizienten k_{10} umgerechnet.

3.3.1.2 Versuchsablauf

Der Herstellungsprozess der Proben erfolgte wie in Kapitel 3.2 beschrieben. Die drei verwendeten Triaxialzellen entsprechen der Abbildung 4b der ÖNORM B 4422-1:1992. Die ausgepresste Probe wurde vor dem Einbau gewogen und mit der Unterseite auf einen keramischen Filter gestellt. Bevor die Probe in die Zelle eingebaut werden konnte mussten zunächst die Zuleitungen und die Bodenplatte entlüftet werden. Über die eingebaute Probe wurde eine Gummihülle gezogen, ein keramischer Filter auf die Oberseite gelegt und die Druckplatte aufgebracht. Die Gummihülle wurde durch jeweils zwei O-Ringe an der Boden- und Druckplatte befestigt. Ein Plexiglas Gehäuse mit Deckel wurde über Schraubverbindungen mit der Bodenplatte verbunden und das Innere der Zelle mit Wasser gefüllt.

Zunächst wurde der „Backpressure“ oder auch Zelldruck über den im Deckel integrierten Anschluss aufgebracht. Dieser entsprach dem Doppelten des Durchströmungsdruckes von 96 cm Wassersäule (0,096 bar). Der Wasserdruck wurde pneumatisch erzeugt und die Probe mit entlüftetem Wasser aus einem fünf Liter Behälter durchströmt.

Durch einen Auslass in der Bodenplatte wurde die Ablaufmenge in einem Messgefäß gesammelt und in Zeitintervallen gewogen. Das gemessene Ablaufvolumen wurde auf 1 ml bzw. 1 g gewogen und die Temperatur gemessen. Die Berechnung der beiden Koeffizienten k_9 und k_{10} erfolgte mit den Formeln (10) und (12) und sind als Ergebnisse im Kapitel 4.1.4 aufgelistet. Des Weiteren können die Messintervalle in den Protokollen im Anhang B1 eingesehen werden.

3.3.2 Durchlässigkeitsversuch mittels Permeameter

3.3.2.1 Allgemein

Die Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Permeameter wurde im Labor für Erdwissenschaften der KFU durchgeführt.

Hierzu wurden die Proben in eine Halterung eingespannt und in das Permeameterbecken eingesetzt. Mit einer im Vorratsbehälter befindlichen Pumpe wurde das Wasser durch einen Filter über den Regler in das Becken geleitet. Der Regler besitzt zudem eine Wasserrückführungsleitung zum Vorratsbehälter (s. Abb. 12).

Der Wasserstand wurde mittels Regler gleichmäßig erhöht und überströmte die Proben während der Messung um ca. vier Zentimeter. Durch das Einsetzen eines zuvor vollständig mit Wasser gefüllten Saughebers in die Probe und das daneben befindliche Rohr, entstand aufgrund eines entstehenden Wasserspiegelunterschiedes Δh ein Wasserfluss der mittels skaliertes Bürette gemessen wurde.

Durch die gemessene Durchflussmenge pro Zeiteinheit konnte der Durchlässigkeitsbeiwert k_9 mit der Formel (10) berechnet werden.

3.3.2.2 Versuchsablauf

- **Aufsättigungsprozeduren nach ÖNORM L 1065:**

Es wurden zwei Aufsättigungsmethoden auf ihre Tauglichkeit geprüft. Die erste Probenserie wurde in einem Wasserbecken und die restlichen drei Probenserien direkt im Permeameter aufgesättigt. Bei beiden Methoden wurde an den Unterseiten der STZ ein Filtervlies mittels O-Ring befestigt und die Proben auf einen Siebboden gestellt. Im Falle der Permeametermethode wurden die STZ zusätzlich in die Kunststoffhalterung gespannt und ins Becken eingesetzt. Die Erhöhung des Wasserstands von einem Zentimeter in sechs Stunden fand für beide Methoden gleich statt (UMS, 2015)

Als Vorteil für die Wasserbeckenvariante galt der Einsatz von destilliertem und endionisiertem Wasser. Jedoch mussten die Proben im gesättigten Zustand erst in die Halterung eingespannt und danach in das Becken eingesetzt werden. Durch die vermehrten Handgriffe, im Vergleich zur Permeametermethode, konnten auch mehr Fehler passieren (z.B. Setzungen des Materials durch Verrutschen des Siebbodens).

Diese erhöhte Fehlerquelle führte dazu dass alle weiteren Proben direkt im Permeameter aufgesättigt und im Anschluss der Versuch gestartet wurde.

- **Einbauvorgang der Bodenproben:**

Wie bereits erwähnt wurden die Proben der ersten Serie erst nach dem Aufsättigen in die Kunststoffhalterung eingespannt und ins Permeameterbecken eingesetzt. In Abb. 9 werden die Bestandteile des Halterungsapparates dargestellt. Zu sehen sind rechts unten das Filtervlies, links unten der O-Ring, links oben der Siebboden und in der Mitte die Kunststoffhalterung mit integriertem O-Ring. Gegen das Auswaschen von Feinanteile während des

Versuchs dient das Filtervlies. Der Siebboden hat die Aufgabe Setzungen des Materials sowie ein Verrutschen des STZ in der Halterung zu verhindern.

Die STZ werden mit der Schneide bzw. Oberseite voran in die Halterung geschoben und durch den integrierten O-Ring abgedichtet.

Gesichert werden die STZ durch die Schrauben, welche auf die Siebböden drücken und folglich die STZ in die Halterungen pressen.

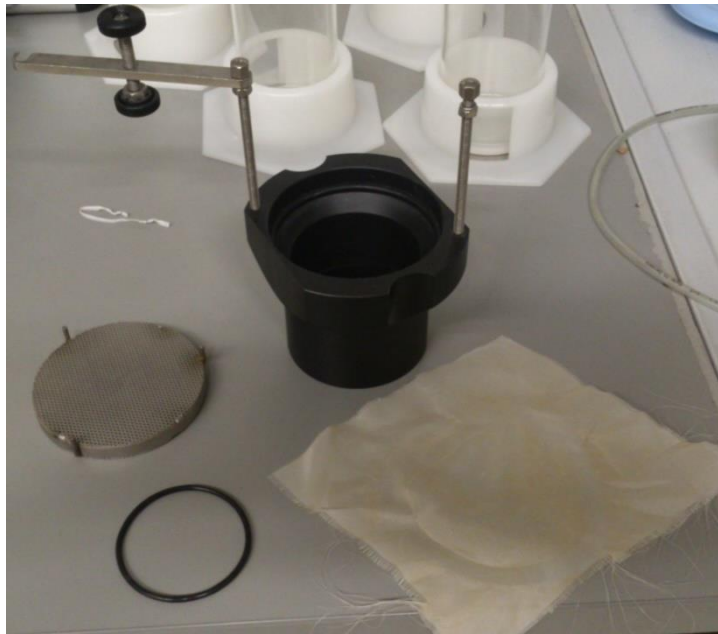


Abb. 9: Halterungsapparat für den Permeameter-Versuch

- **Versuchsdurchführung:**

Die Proben wurde wie in Abb. 10 in das Permeameterbecken eingesetzt und der Wasserstand erhöht. Nach der Sättigung der Proben, wurde der Wasserstand so

eingestellt, dass die STZ mit vier Zentimeter überströmt wurden. Ein zuvor vollständig mit Wasser gefüllter Saugheber, wie in Abb. 11 wurde in die Probe und das dazugehörige Röhrchen eingesetzt, um das Durchflussvolumen der Probe in die Bürette zu leiten. Dieser Vorgang erfolgte durch die entstandene

Wasserspiegeldifferenz Δh .



Abb. 10: Bodenproben mit zugehörigem Kunststoffröhrchen

Der Wasserstand in der Halterung und im Becken wurde mittels Messbrücke und integriertem Lichtsignal, welche auf der Permeameterbeckenoberseite verläuft, gemessen. Nach der Bestimmung von Δh wurde der Hahn der Bürette geschlossen und nach Aufstauung des Wassers bis zum Skalen-Nullwert die Zeitmessung gestartet. Notiert wurden das Durchflussvolumen nach einer bestimmten Zeit und die Wassertemperatur im Becken, siehe Messprotokoll im Anhang B2. Die Büretten, zu sehen in Abb. 13, wurden nach jeder Messung entleert und das Wasser zurück in den Vorratsbehälter geleitet.



Abb. 11: Saugheber gefüllt mit Wasser

Beendet wurde der Versuch sobald sich die Durchflüsse pro Zeiteinheit von drei hinter einander folgenden Messungen nicht mehr als 5 % unterschieden (ÖNORM B 4422-1, 1992).

Nach Beendigung des Versuchs wurde der Durchlässigkeitsbeiwert k_9 berechnet und mittels Formel (11) auf den Vergleichskoeffizient k_{10} umgerechnet.



Abb. 12: links: Ausgleichsbehälter, Filter und Vorratsbehälter



Abb. 13: rechts: Büretten mit Absperrhähnen und Sammelbecken

3.3.3 Drucktopfmethode (ÖNORM L 1063)

3.3.3.1 Allgemein

Durch die Drucktopfmethode kann der permanente Welkepunkt (PWP) des Bodenmaterials bestimmt werden. Dieser stellt im Van Genuchten - Mualem Modell den residualen Wassergehalt, bei einer Saugspannung von 15 bar dar (Vanapalli et.al, 1998). Das verbleibende Wasser im Boden ist für Pflanzen im Allgemeinen nicht mehr zu erreichen, sie beginnen zu welken.

Bei der Wasserretentionskurve wird der residuale Wassergehalt Θ_r bei pF 4,2 eingetragen und dient als Fittingparameter. Der pF-Wert von 4,2 entspricht einer Saugspannung von ca. 15 bar bzw. 1.500 kPa. Der berechnete Wert wurde für alle Probenserien verwendet.

3.3.3.2 Versuchsablauf

Zunächst wurde das Bodenmaterial mit einer Bodendichte von $1,58 \text{ g/cm}^3$ in einen Kunststoffring, mit einem Volumen von $22,06 \text{ cm}^3$ eingepresst, auf ein Filterpapier (siehe Abb. 14). gelegt und anschließend aufgesättigt. Das Filterpapier verhindert Materialauswaschungen während des Sättigungsprozesses. Nebenbei wird auch die Keramikplatte, welche nicht mit den bloßen Fingern berührt werden darf, gesättigt.

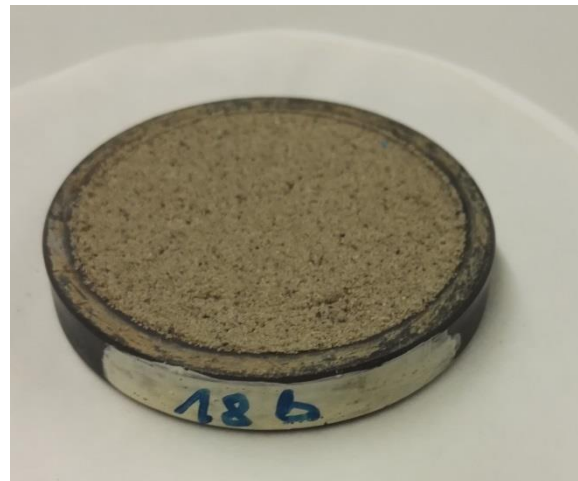


Abb. 14: Eingepresste Bodenprobe in Kunststoffring

Nach vollständiger Aufsättigung wurden die Proben mitsamt der Platte in den Drucktopf gelegt, dieser verschlossen und ein Druck von 15 bar langsam aufgebracht. Während der Versuchsdauer muss besagter Druck konstant aufrechterhalten werden. Mittels Keramikplatte wird das, aus den Proben austretende Wasser gesammelt und über ein Schlauchsystem aus dem Topf in ein Messgefäß geleitet. Der gesamte Drucktopfapparat ist in der Abb. 15 zu sehen.



Abb. 15: Messinstrumente für die Drucktopfmethode

Der Versuch gilt als beendet sobald kein weiterer Wasseraustritt messbar ist. Die Proben werden nun gewogen und bis zur Massekonstanz (ÖNORM EN 933-1, 2012) getrocknet. Für die Auswertung wird der Wassergehalt nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 bestimmt und auf das Ringvolumen bezogen. Das Drucktopf-Protokoll ist im Anhang B3 ersichtlich.

3.3.4 Verdunstungsversuch HYPROP® (UMS, 2015)

3.3.4.1 Allgemein

Mit dem HYPROP® (HYdraulic PROPerTy analyser) (UMS, 2015) werden Wasserretentionskurven und die teilgesättigte Durchlässigkeit mittels Verdunstungsmethode ermittelt. Aufgezeichnet werden die Messdaten mit der Tensio-View Software und ausgewertet mit der HYPROP-FIT® Software (Version 3.5.1.13951). Versuch und Auswertung wurden durch Zuhilfenahme der Bedienungsanleitung des HYPROP® Versuchs sowie der Gebrauchsanleitung der HYPROP-FIT® Software, beide von UMS, durchgeführt.

Die Herstellung der vier Probenserien wurde bereits in Kapitel 3.2 beschrieben, ein Schema für den Verdunstungsvorgang ist in Abb. 16 abgebildet.

Während des Versuchs werden die Wasserspannungen bzw. das Matrixpotential über die Zeit durch zwei Tensiometer in unterschiedlichen Tiefen gemessen und als Mittelwert ausgegeben. Durch regelmäßige Wägungen, mind. zweimal pro Tag (UMS, 2015) wird der Wasserverlust aufgezeichnet und eine mittlere Verdunstungsrate sowie ein gemittelter Wassergehalt daraus berechnet.

Die hydraulische Leitfähigkeit des Bodens wird durch die Wassergehaltsunterschiede beider Kerzen (Tensiometer) und dem daraus resultierenden Wasserfluss ermittelt.

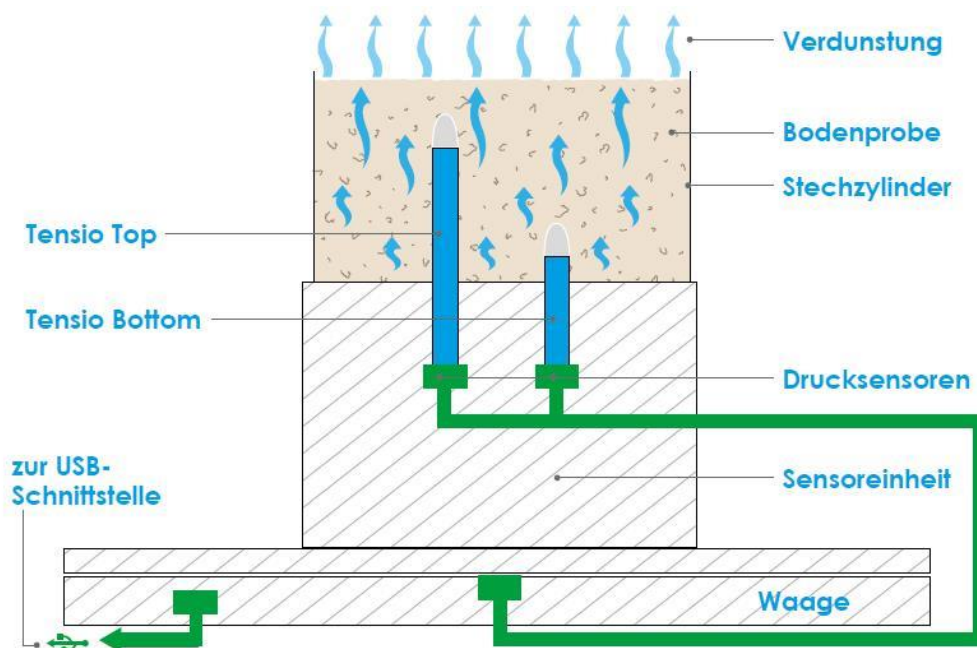


Abb. 16: Schema des Verdunstungsversuchs (UMS – Bedienungsanleitung, 2015)

In Kapitel 2 wurde bereits auf den in den Bodenporen vorherrschenden Unterdruck u_{cap} , welcher in der flüssigen Phase wirkt, zufolge der vorschreitenden Evaporation eingegangen. Dieser Unterdruck wird nach Kolymbas, 2011 als Δp^{kap} bezeichnet und mittels Formel (13) wird der Bezug zur Saugspannung s dargestellt.

$$\Delta p^{\text{kap}} := p_a - p_w = s \quad (13)$$

Δp^{kap} [bar]	Differenzdruck
p_a [bar]	Luftdruck
p_w [bar]	Wasserdruck
s [bar]	Saugspannung oder Kapillarsaugspannung (matrix suction)

Durch den entstehenden Unterdruck wird Wasser aus tieferen Regionen der Bodenprobe an die Oberfläche gezogen um die Luft aus den Poren zu drücken. Bei fortschreitender Wasserverdunstung erhöht sich somit die Saugspannung bis der Lufteintrittspunkt s_e erreicht ist.

Die vollständig mit entgastem und destilliertem Wasser gefüllten Tensiometer stehen mit ihrer Keramikspitze im direkten Kontakt mit dem Boden. Der Boden saugt mit demselben Unterdruck an der Kerze wie er in den Poren wirkt. Durch einen Druckaufnehmer wird die Saugspannung der beiden Kerzen gemessen. Dieser Vorgang geht solange von statten bis sich der Luftdruck durch die fortschreitenden Verdunstung so stark erhöht, dass die kleinen Poren der Kerze leer gesaugt werden, der Lufteintrittspunkt s_e ist erreicht. In den Kerzen herrscht nun der atmosphärische Luftdruck und der gemessene Saugspannungswert fällt auf null ab.

3.3.4.2 Versuchsablauf

Der Verdunstungsversuch wurde im Labor des Institutes für Erdwissenschaften der KFU durchgeführt.

Vor der Probenherstellung wurde ein „Trockentest“ durchgeführt. Hierzu wurde die Vakuumpumpe auf ihre Leistung, das Schlauchsystem auf Dichtheit, die Tensiometer auf ihr Saug- sowie Ansprechverhalten und das Verbinden der Messtöpfe mit dem Computer geprüft.

Bei diesem Test stellte sich heraus, dass die Vakuumpumpe sehr anfällig auf die Luftfeuchtigkeit reagiert. Aus diesem Grund wurde ein Entfeuchtungsgerät für die Versuchszeit der vier Probenserien besorgt um die Pumpleistung zu verbessern.

Nach der Probenherstellung wurden die Proben wie in 3.3.2 Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter aufgesättigt.

Der Verdunstungsversuch wurde nach der UMS – Bedienungsanleitung durchgeführt und gliedert sich in zwei Phasen.

1. Phase: Entgasung des gesamten System
2. Phase: Einbau der Proben und Start der Messkampagne

- **Erste Phase (Entgasung des Systems):**

Zunächst wurde destilliertes Wasser im Vakuumschrank solange entgast, bis keine Luftbläschen mehr vorhanden waren. 24 Stunden vor dem Entgasungsvorgang wurden die Keramikspitzen der Tensiometer in destilliertem und entgastem Wasser aufgesättigt.

Anschließend wurden die HYPROP®-Töpfe wie in der UMS – Bedienungsanleitung mit destilliertem und entgastem Wasser gefüllt und mit dem Ventildeckel über einen Klemmverschluss fixiert.

Die Vakuumpumpe wurde über einen Schlauch mit einer Vakuumflasche, die angesaugtes Wasser aufnehmen soll, verbunden. Aus der Flasche führte ein Schlauchsystem welches Messgerät, die Ventile der Messtöpfe und die Tensiometer verbindet. Die Tensiometer wurden in die jeweiligen Schlauchenden gesteckt und in Behälter mit destilliertem und entgastem Wasser getaucht. Die offenen Enden der Schläuche wurden mit Pfropfen luftdicht verschlossen. Die letzte Öffnung im Flaschendeckel wurde mittels Plastikpfropfen, der als Vakuumablassventil fungierte, verschlossen.

Der Entgasungsvorgang erfolgte mittels Zeitschaltung mit einer Taktung von 20 Minuten Betrieb und 40 Minuten Ruhepause über einen Zeitraum von mind. 24 Stunden (UMS, 2015). Beschriebener Entgasungsaufbau ist in Abb. 17 abgebildet.



Abb. 17: Systemaufbau für den Entgasungsprozess des Verdunstungsversuchs

- **Zweite Phase (Einbau und Start des Versuchs):**

Nach dem Entgasungsprozess wurde über den Ventilpfropfen das Vakuum entlassen, die Töpfe ausgebaut und an den PC angeschlossen. Durch Start des Tensio-View Programms konnte festgestellt werden, ob jeder Topf erkannt wurde. Nun wurden unter Berücksichtigung der Druckanzeige die Tensiometer in den jeweiligen Topf eingeschraubt. Anschließend wurde der Topf inkl. Tensiometer und Schutzmembran gewogen. Dabei ist zu beachten, dass die Tensiometer keine Luft ziehen, ansonsten müsste der Entgasungsprozess wiederholt werde.

Den gesättigten Proben wurde mit einem Bohrer und dementsprechend Bohraufsatz ca. 1 cm³ Material entnommen. Dies entspricht der Länge von beiden Tensiometer. Nach Überziehen der Schutzmembran über die Tensiometer, wurde die Probe über diese gestülpt und mittels Klemme am Topf fixiert. Die fertig eingebauten Proben sind in der Abb. 18 abgebildet.

Nachdem Start der Messkampagne erfolgt das erste Wiegen des Topfes inklusive Probe, welches danach auf 2x täglich (UMS, 2015) ausgedehnt wurde. Die Aufzeichnung der Saugspannungen über die Tensiometer geschah in einem Rhythmus von 10 Minuten.



Abb. 18: Eingebaute Proben für den Start der Messkampagne

Nach Beendigung des Versuches wurden die Proben ausgebaut, bis zur Massekonstanz nach ÖNORM EN 933-1:2012 getrocknet und der Wassergehalt nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 bestimmt.

Die Versuchsauswertung erfolgte mittels HYPROP-FIT[®] Software und dem Van Genuchten – Mualem Modell.

- **Beschreibung des gewählten Modells:**

Die Auswertung der Verdunstungsmessdaten wurde mit der HYPROP-FIT® Software und dem constrained Van Genuchten - Mualem Modell für alle vier Probenserien durchgeführt.

Dadurch das Berechnungskonzept von Van Genuchten auf der Herleitung der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit von Mualem (1976) aufbaut, beinhaltet dieses Modell beide Namen.

Das Van Genuchten – Mualem Modell wurde aufgrund der ausreichend genauen Nachbildung der Messdaten (Fitting) gewählt. Für die Berechnung der Wasserretentionskurve sind die Formeln (14) und (15) (Van Genuchten, 1980) und für die Berechnung der ungesättigten Durchlässigkeit die Formeln (16) und (17) (Van Genuchten, 1980) hinterlegt.

Bei dem constrained Van Genuchten – Mualem Modell wird der zusätzliche Kurvenparameter m durch den Kurvenparameter n, welcher die Steigung der Kurve beeinflusst bedingt (Formel 15) (Van Genuchten, 1980).

$$\Theta = \Theta_r + \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{[1 + (\alpha \cdot h)^n]^m} \quad (14)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (15)$$

Θ	[cm ³ /cm ³]	momentaner volumetrischer Wassergehalt
Θ_r	[cm ³ /cm ³]	residualer volumetrischer Wassergehalt
Θ_s	[cm ³ /cm ³]	volumetrischer Wassergehalt bei Bodensättigung
α	[1/cm]	Kurvenparameter, bestimmt den Kurvenwendepunkt
h	[1/hPa]	Saugspannung bzw. Matrixpotential
n	[-]	Kurvenparameter, bestimmt die Kurvensteigung
m	[-]	zusätzlicher Kurvenparameter

$$K_r(h) = \frac{\{1 - (\alpha * h)^{n-1} [1 + (\alpha * h)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha * h)^n]^{m/2}} \quad (16)$$

$K_r(h)$	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit
α	[1/cm]	Kurvenparameter, bestimmt den Kurvenwendepunkt
h	[1/hPa]	Saugspannung bzw. Matrixpotential
n	[-]	Kurvenparameter, bestimmt die Kurvensteigung
m	[-]	zusätzlicher Kurvenparameter

Durch die Formeln (16) und (17) (Van Genuchten, 1980) kann die ungesättigte Durchlässigkeit des Bodens in Abhängigkeit des Matrixpotentials h berechnet werden.

$$K(h) = K_s * K_r(h) \quad (17)$$

$K(h)$	[cm/d]	ungesättigte Durchlässigkeit
K_s	[cm/d]	gesättigte Durchlässigkeit
$K_r(h)$	[-]	relative ungesättigte Durchlässigkeit

• **Eingabeparameter und weitere Berechnungen:**

Als Eingabeparameter für die HYPROP-FIT[®] Software wurden die Korndichte ρ_s , die Trockenmasse m_d und das Gewicht des Messtopfes inkl. Tensiometer und Membran verwendet. Alle anderen voreingestellten Werte blieben unverändert.

Aufgrund der in der Software hinterlegten Formeln wurden die Porosität n , die Trockendichte ρ_d und der volumetrische Anfangswassergehalt ausgegeben.

Dieselben Parameter wurden mittels der aufgezeichneten Daten, siehe Messprotokolle (Anhang B4) und den folgenden Formeln (18) bis (22) berechnet.

$$n = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s * V}\right) * 100 \quad (18)$$

n	[%]	Porosität
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
V	[cm ³]	Volumen der Bodenprobe (249 cm ³)

$$e = \frac{\rho_s * V}{m_d} - 1 \quad (19)$$

e	[-]	Porenzahl
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
V	[cm ³]	Volumen der Bodenprobe (249 cm ³)

$$S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad (20)$$

S_r	[-]	Sättigungszahl
e	[-]	Porenzahl
w	[M-%]	gravimetrischer Wassergehalt
ρ_s	[g/cm ³]	Korndichte
ρ_w	[g/cm ³]	Dichte des Wasser ($\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$)

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100 \quad (22)$$

w	[M-%]	gravimetrischer Wassergehalt
m_d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
m_w	[g]	Wassermasse

$$\Theta = \frac{V_w}{V} \quad (23)$$

Θ	[cm ³ /cm ³]	volumetrischer Wassergehalt
V_w	[cm ³]	Volumen des Wasser in der Bodenprobe
V	[cm ³]	Volumen der Bodenprobe (249 cm ³)

4 Ergebnisse der Versuche

Dieses Kapitel befasst sich mit den Ergebnissen der Versuche welche in Kapitel 3 beschrieben wurden. Unter 4.8. können die Ergebnisgegenüberstellungen nachgelesen werden.

4.1 Ergebnisse der Korngrößenverteilung

Die Messdaten der Korngrößenbestimmung wurden nach dem Gesetz von *Stokes* ausgewertet und als Kornverteilungskurve, siehe Abb. 19 dargestellt. Die vollständigen Protokolle sind im Anhang A1 und A2 ersichtlich.

Aus der Körnungslinie geht hervor dass es sich um einen schluffigen Sand mit ca. 18 % Schluff-, 52 % Feinsand-, 26 % Mittelsand-, ca. 3,8 % Grobsand- und 0,2 % Feinkiesanteilen handelt.

Durch die in Tab. 1 aufgelisteten Korngrößen bei 10-, 30- und 60 % Masseanteile konnten mit Hilfe der Formeln (8) und (9) die Ungleichförmigkeitszahl C_U und die Krümmungszahl C_C berechnet werden.

Werden diese Kennzahlen mit denen der ÖNORM B 4400-1:2010 verglichen kann von einem enggestuften Boden dessen Körnungskurve steil absinkt gesprochen werden ($C_U = 3,28 < 6$ und $C_C = 0,89 < 1$).

Tab. 1: Ergebniszusammenfassung der Korngrößenverteilung

D₁₀	0,0486	[mm]
D₃₀	0,0832	[mm]
D₆₀	0,1592	[mm]
C_U	3,28	[-]
C_C	0,89	[-]

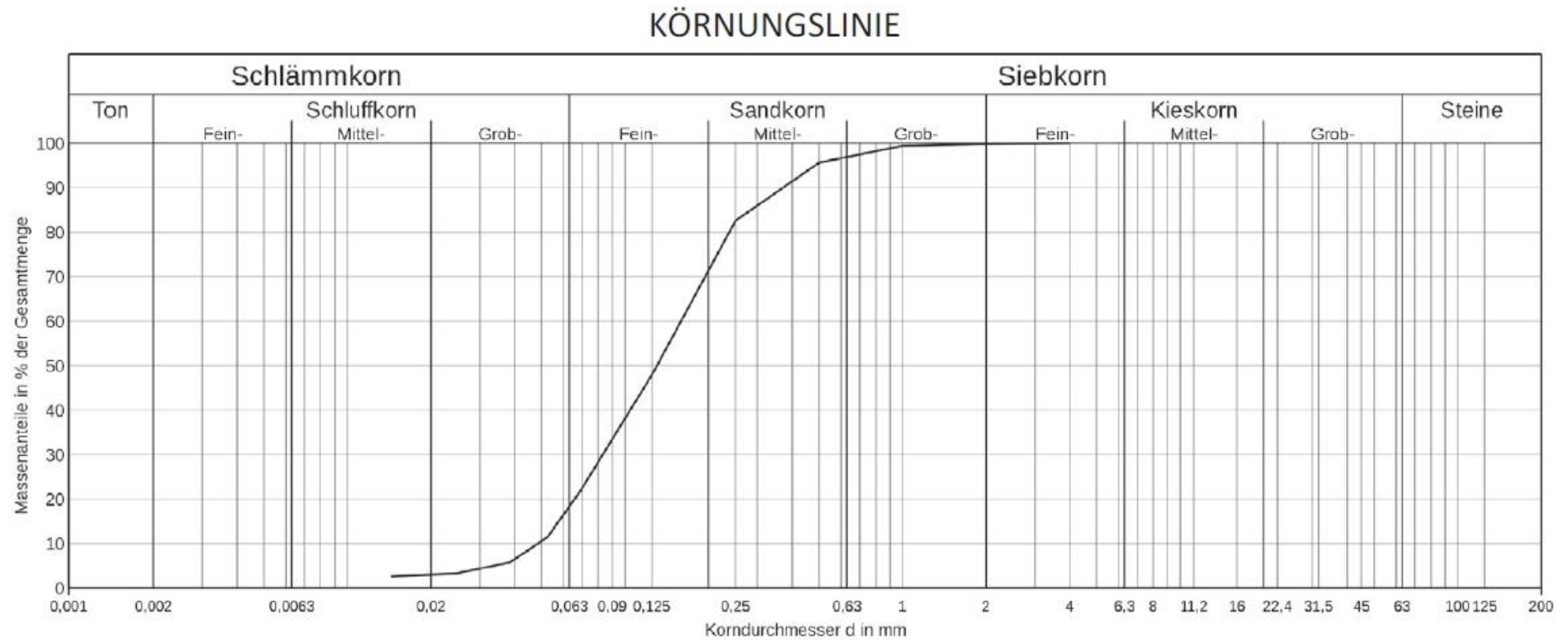


Abb. 19: Kornverteilungskurve des Bodenmaterials si Sa

4.2 Ergebnisse der Korndichtebestimmung

Die Ergebnisse der Korndichtebestimmung können im Protokoll (siehe Anhang A3) eingesehen werden.

Eine Kurzzusammenfassung der Ergebnisse ist in Tab. 2 aufgelistet. Dadurch die Ergebnisabweichungen vom Mittelwert nicht mehr als $0,03 \text{ g/cm}^3$ (ÖNORM EN ISO 17892-3,2015) betragen ist dieser Versuch gültig.

Die berechnete Korndichte ($\rho_s = 2,78 \text{ g/cm}^3$) ist im Vergleich zu den Erfahrungswerten für Sand aus Tabelle 2.3 ($\rho_s = 2,65 - 2,69 \text{ g/cm}^3$) nach Boley, 2012 zu hoch. Grund hierfür könnten die im Probeboden enthaltenen Minerale wie z.B. Glimmer ($\rho_s = 2,8 - 2,9 \text{ g/cm}^3$) aus Tabelle 2.2 nach Boley, 2012 sein.

Da im Zuge dieser Arbeit keine Untersuchung der Bodenminerale durchgeführt wurde und der Versuch laut ÖNORM EN ISO 17892-3:2015 konform ist, wurde mit dem Korndichtewert von $2,78 \text{ g/cm}^3$ weiter verfahren.

Tab. 2: Ergebniszusammenfassung der Korndichtebestimmung

Pyknometer Nr.:	25	107	110
Volumen Pyknometer:	100,125 cm ³	100,357 cm ³	100,029 cm ³
Korndichten ρ_s	2,77 g/cm ³	2,78 g/cm ³	2,79 g/cm ³
Endergebnis ρ_s	2,78 g/cm³		

4.3 Ergebnisse des Proctorversuchs

Das Versuchsprotokoll und die ermittelte Proctorkurve sind im Anhang A4 und A5 ersichtlich.

Der in Abb. 20 abgebildete Auszug der Proctorkurve zeigt einen flachen Kurvenverlauf im Bereich der Trockendichte von $1,55 \text{ g/cm}^3$ bis $1,60 \text{ g/cm}^3$ auf. Das rote Kreuz markiert auf der Ordinate die maximale Trockendichte ρ_d bzw. ρ_{Pr} und auf der Abszisse den dazugehörigen optimalen Wassergehalt w_{opt} .

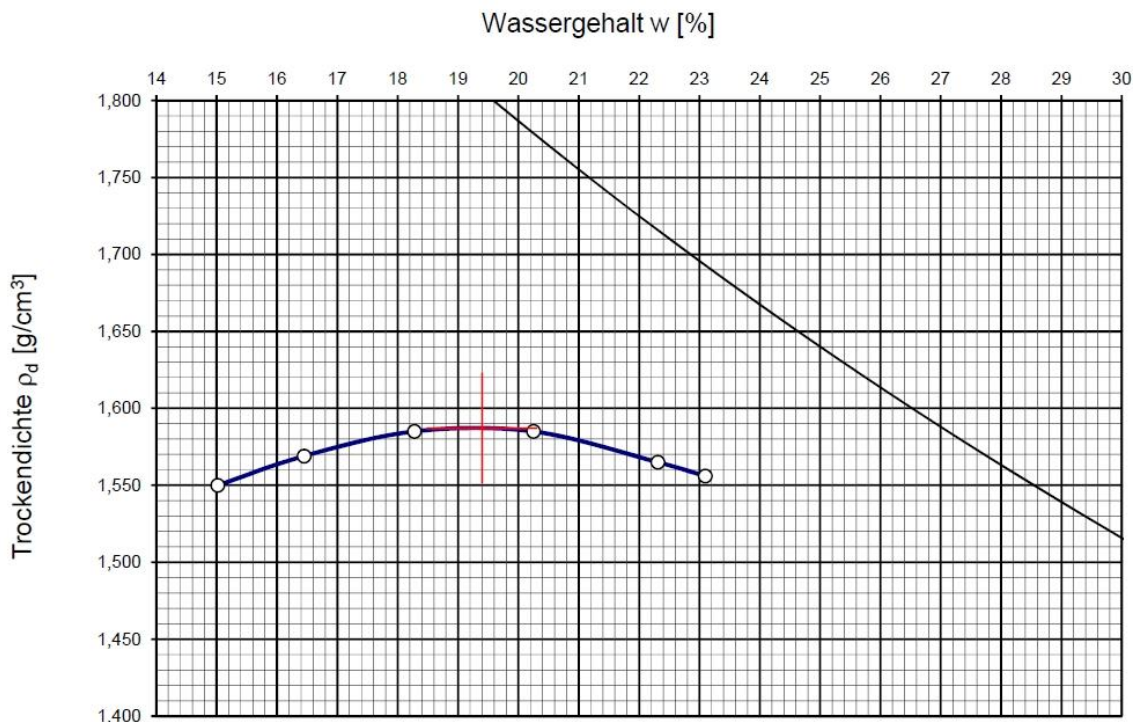


Abb. 20: Proctorkurve des Bodenmaterials

Die Versuchsergebnisse sind in Tab. 3 aufgelistet. Die Korndichte diente zur Berechnung der Sättigungslinie (ÖNORM EN 13286-2, 2010), welcher sich die Proctorkurve nach Überschreiten des Scheitelpunktes angleicht.

Werden die ermittelten Werte (ρ_{Pr} und w_{opt}) mit den Erfahrungswerten aus Tabelle 2.17 nach Boley, 2012 verglichen, dann ähneln sie eher dem Verhalten vom ebenfalls enthaltenen Schluff ($p_{Pr} = 1,61 - 1,80$ und $w_{opt} = 16 - 22$).

Tab. 3: Ergebniszusammenfassung der Proctordichtebestimmung

maximale Trockendichte ρ_{Pr}	1,59	[g/cm ³]
optimaler Wassergehalt w_{opt}	19,40	[%]
Korndichte ρ_s	2,78	[g/cm ³]

4.4 Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Die Versuchsprotokolle der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle sind im Anhang B1 angeführt.

Der Probekörpereinbau in Zelle 01 und Zelle 02 erfolgt wie geplant. Beim Einbau in Zelle 03 zeigten sich Risse im Bodenkörper. Es wurde entschieden den Versuch dennoch durchzuführen und zu prüfen wie hoch die Abweichungen sind.

In Tab. 4 sind die Ergebnisse der drei Zellen aufgelistet. Die Berechnung des k_{δ} -Wertes erfolgte mittels Formel (10) und die Berechnung des k_{10} mittels Formel (12).

Der Mittelwert wurde jedoch nur von Zelle 01 und Zelle 02 gebildet, da die Abweichung von Zelle 03 ca. 73 % vom Mittelwert beträgt.

Alle weiteren Vergleiche bzw. Gegenüberstellungen der Durchlässigkeit werden mit dem berechneten Mittelwert aus Zelle 01 und Zelle 02 durchgeführt.

Nach Tabelle 1 der ÖNORM B 4422-1:1992 kann dieser Boden als mitteldurchlässig bezeichnet werden. Nach Tabelle 6.1 (Boley, 2012) fällt dieser Boden in den Durchlässigkeitsbereich von schluffigem Sand (10^{-7} bis 10^{-4}) welcher der Kornverteilungskurve entspricht.

Tab. 4: Ergebniszusammenfassung der Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

Ergebniszusammenfassung:					
Zelle 01		Zelle 02		Zelle 03	
k_{δ}	k_{10}	k_{δ}	k_{10}	k_{δ}	k_{10}
[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
<u>2,0E-05</u>	<u>1,4E-05</u>	<u>1,8E-05</u>	<u>1,2E-05</u>	<u>3,3E-05</u>	<u>2,3E-05</u>
Mittelwerte 01 & 02:					
k_{δ}			k_{10}		
[m/s]			[m/s]		
<u>1,9E-05</u>			<u>1,3E-05</u>		

4.5 Ergebnisse des Durchlässigkeitsversuchs mittels Permeameter

Der Permeameterversuch wurde für alle vier Probenserien durchgeführt, die jeweiligen Messprotokolle sind im Anhang B2 nachzulesen. Der Versuch wurde mit konstanter Druckhöhe durchgeführt. Jedoch wiesen die Proben unterschiedliche Druckhöhen auf wodurch eine Spanne des hydraulischen Gradienten i resultierte.

Die Berechnung der k_{∂} - Werte erfolgte mittels Formel (10) nach ÖNORM B 4422-1:1992 und die k_{10} - Berechnung wurde mittels Formel (11) nach Wit, 1963 durchgeführt. Die Werte der Viskosität von Wasser, welche durch h_T und h_{10} repräsentiert wurden, entstammten aus Tabelle 3 der ÖNORM EN ISO 17892 4:2016.

Die Herstellung der jeweiligen Probenserie erfolgte wie in 3.2 beschrieben.

4.5.1 Erste Probenserie (Einbaudichte = 1,58 g/cm³)

Die erste Probenserie wurde mit einer Einbaudichte von 1,58 g/cm³ in die STZ eingepresst. Der Einbauwassergehalt entsprach 19,5 %.

Eine Ergebnisauflistung der ersten Probenserie findet sich in Tab. 5.

Tab. 5: Ergebniszusammenfassung der ersten Probenserie

Durchlässigkeit $k_{22,8^{\circ}\text{C}}$				Durchlässigkeit $k_{10^{\circ}\text{C}}$			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	$k_{22,8^{\circ}\text{C}}$	$k_{22,8^{\circ}\text{C}}$	$k_{10^{\circ}\text{C}}$	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]		h_T	0,94	[mPa*s]
19	21	3,1E-03	3,1E-05	2,2E-05	h_{10}	1,30	[mPa*s]
18	23	2,4E-03	2,4E-05	1,7E-05			
16	24	1,7E-03	1,7E-05	1,2E-05			

Bei diesem Versuch lag die Wasserspiegeldifferenz Δh zwischen 2 und 8,5 mm. Daraus resultiert bei einer Probenlänge von 50 mm ein hydraulischer Gradient i von 0,04 – 0,17. Mit solch einem Gradienten wird ein Infiltrationsvorgang simuliert.

Der Mittelwert des Vergleichskoeffizienten k_{10} der ersten Probenserie liegt bei $1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s, wobei die Streuung ca. $\pm 5 \cdot 10^{-6}$ m/s beträgt.

4.5.2 Zweite Probenserie (1,75 g/cm³ und 1,58 g/cm³)

Bei der zweiten Probenserie wurde die Auswirkung von zwei unterschiedlichen Einbaudichten untersucht. Dabei wurde die erste Schicht mit 1,75 g/cm³ und die zweite Schicht mit 1,58 g/cm³, beides Bodendichten eingebaut. In beiden Fällen lag der Wassergehalt bei 19,5 % und der Mittelwert der Einbaudichte beträgt 1,67 g/cm³.

Während des Versuchs entsprach die Wasserspiegeldifferenz Δh 3,5 bis 5,5 mm, daraus resultierte mit einer Probenlänge von 50 mm ein hydraulischer Gradient i von 0,07 bis 0,11.

Tab. 6 zeigt eine Auflistung der Ergebnisse von Probenserie 2. Der berechnete Mittelwert für $k_{10} = 3,4 \cdot 10^{-5}$ m/s. Die Streuung der Ergebnisse liegt bei $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Tab. 6: Ergebniszusammenfassung der zweiten Probenserie

Durchlässigkeit $k_{23,7^{\circ}\text{C}}$				Durchlässigkeit $k_{10^{\circ}\text{C}}$			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	$k_{23,7^{\circ}\text{C}}$	$k_{23,7^{\circ}\text{C}}$	$k_{10^{\circ}\text{C}}$	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]	[m/s]	h_T	0,92	[mPa*s]
7	2	4,7E-03	4,7E-05	3,3E-05	h_{10}	1,30	[mPa*s]
8	3	5,0E-03	5,0E-05	3,5E-05			
9	4	4,7E-03	4,7E-05	3,3E-05			

4.5.3 Dritte Probenserie (1,58 g/cm³ und 1,75 g/cm³)

Bei der dritten Probenserie wurden die gleichen Einbaudichten wie bei der zweiten Serie, jedoch in umgekehrter Reihenfolge in die STZ eingepresst. Auch hier betrug die Mittelwertdichte 1,66 g/cm³. Zu prüfen galt wie sich die Durchlässigkeit im Vergleich zur zweiten Serie verändert. Die genaue Gegenüberstellung der Durchlässigkeit wird im Kapitel 4.8 beschrieben.

Bei der Berechnung der Durchlässigkeitskoeffizienten wurde eine Druckdifferenz von $\Delta h = 1,0$ bis 2,5 mm herangezogen. Der daraus resultierende hydraulische Gradient i liegt zwischen 0,02 und 0,05.

Die Auflistung der Durchlässigkeitsergebnisse der dritten Probenserie erfolgte in Tab. 7.

Die mittlere Durchlässigkeit der Probenserie 3 beträgt $k_{10} = 1,6 \cdot 10^{-5}$ m/s, mit einer Streuung von $\pm 5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Tab. 7: Ergebniszusammenfassung der dritten Probenserie

Durchlässigkeit $k_{25,7^\circ\text{C}}$				Durchlässigkeit $k_{10^\circ\text{C}}$			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	$k_{25,7^\circ\text{C}}$	$k_{25,7^\circ\text{C}}$	$k_{10^\circ\text{C}}$	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]		h_T	0,88	[mPa*s]
7	21	2,4E-03	2,4E-05	1,6E-05	h_{10}	1,30	[mPa*s]
9	23	2,2E-03	2,2E-05	1,5E-05			
10	24	2,4E-03	2,4E-05	1,6E-05			

4.5.4 Vierte Probenserie (Einbaudichte = 1,67 g/cm³)

Die vierte Probenserie wurde mit einer Bodendichte von 1,67 g/cm³ eingepresst. Zu prüfen galt die Veränderung der Durchlässigkeit zwischen geschichteten Proben (unterschiedlicher Dichte) und Proben mit nur einer Dichte, welche der Mittelwertdichte aus Probenserie 2 und 3 entsprach.

Der Permeametersversuch der vierten Serie wurde mit einer Wasserspiegeldifferenz Δh zwischen 2,5 und 4,5 mm und einem hydraulischen Gradient i zwischen 0,05 bis 0,09 durchgeführt.

Tab. 8 fasst die Ergebnisse der vierten Probenserie zusammen. Die mittlere Durchlässigkeit bei Vergleichstemperatur k_{10} entspricht $2,3 \cdot 10^{-5}$ m/s und die Streuung beträgt ca. $\pm 6 \cdot 10^{-7}$ m/s.

Tab. 8: Ergebniszusammenfassung der vierten Probenserie

Durchlässigkeit $k_{26,1^\circ\text{C}}$				Durchlässigkeit $k_{10^\circ\text{C}}$			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	$k_{26,1^\circ\text{C}}$	$k_{26,1^\circ\text{C}}$	$k_{10^\circ\text{C}}$	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]		[m/s]	h_T	
					h_T	0,87	[mPa*s]
16	6	3,4E-03	3,4E-05	2,3E-05	h_{10}	1,30	[mPa*s]
17	7	3,5E-03	3,5E-05	2,3E-05			
18	9	3,5E-03	3,5E-05	2,4E-05			

4.6 Ergebnisse der Drucktopfmethode

Der Drucktopfversuch wurde für die erste Probenserie durchgeführt und die berechneten Werte für alle weiteren Serien übernommen. Das Versuchsprotokoll ist im Anhang B3 dargestellt.

Wie bereits beschrieben wurden die Drucktopfproben mit einer Bodendichte von $1,58 \text{ g/cm}^3$ in die Kunststoffringe eingepresst. Der Wassergehalt entsprach 19,5 %. Nach Beendigung des Drucktopfversuchs wurde der Wassergehalt nach ÖNORM EN ISO 17892-1:2014 bestimmt und auf das Ringvolumen bzw. die Trockenmasse bezogen.

Die Ergebnisse des Versuchs sind in Tab. 9 zusammengefasst. Es wurde der Mittelwert aus den volumetrischen Wassergehalten berechnet und als weiteren Messpunkt in die Verdunstungsauswertungssoftware (HYPROP-FIT®) eingespielt. Dieser Messpunkt entspricht einer Saugspannung von 15.000 hPa bzw. einem pF-Wert von 4,2 und hat einen dazugehörigen volumetrischen Wassergehalt von 2,65 %.

Der Messpunkt wurde bei allen vier Serien im Auswertungsprogramm als residualer Wassergehalt festgelegt und in jede Fittingkurve mit einbezogen.

Tab. 9: Ergebniszusammenfassung der Drucktopfmethode

Ring Nr.:	Druckstufe	Masse Wasser	Wassergehalt	Wassergehalt
	[kPa]	[g]	[Vol.%]	[M-%]
20a	1.500	0,58	2,63	1,99
18b	1.500	0,58	2,63	1,98
19b	1.500	0,57	2,58	1,95
20b	1.500	0,61	2,76	2,09
<u>Ergebnis 15 bar (pF 4,2)</u>			<u>2,65</u>	<u>[Vol.%]</u>

4.7 Ergebnisse des Verdunstungsversuchs

Die händische Berechnung der unter 3.7 angeführten Parameter entsprach denen der Software. Der berechnete Sättigungsgrad der Serien schwankte zwischen 72 und 85 %. Aus diesem Grund wurde entschieden die Anfangswassergehalte auf jene bei 100 % Sättigung linear zu interpolieren. Der daraus resultierende Vorteil zeigte sich durch eine bessere Vergleichsmöglichkeit der vier Probenserien (Kapitel 4.8).

Um den Einfluss des Sättigungsgrades grafisch darstellen zu können wurden in die Abbildungen der Wasserretentionskurven der einzelnen Probenserien beide Fittingkurven integriert. Die Versuchsmesswerte und der tatsächliche Sättigungsgrad werden durch die blaue Kurve (Fitting HYPROP) repräsentiert, wohingegen die schwarze Kurve (Fitting 100%) einen Verlauf bei 100 % Sättigung nachbildet. Bei der Erstellung der schwarzen Kurven wurden lediglich dem Fittingparameter Θ_s die interpolierten Anfangswassergehalte zugewiesen.

4.7.1 Probenserie 1

Tab. 10 fasst die händisch ermittelten Ergebnisse des ersten Verdunstungsversuchs zusammen. Der Anfangswassergehalt beträgt 37,5 Vol.-%, dies entspricht einem Sättigungsgrad von 71,8 % und die berechnete Trockendichte beträgt 1,33 g/cm³.

Tab. 10: Ergebniszusammenfassung des ersten Verdunstungsversuchs

STZ	w	Θ	n	e	m_d	ρ	ρ_d	S_r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]	[-]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
21	27,5	36,5	52,3	1,1	330,0	1,58	1,33	69,7
23	28,9	38,3	52,3	1,1	329,9	1,58	1,32	73,1
24	28,5	37,9	52,1	1,1	331,4	1,58	1,33	72,7
	28,3	37,5	52,3	1,1	330,4	1,58	1,33	71,8

Das Ergebnis der Wasserretentionskurve der ersten Probenserie bezogen auf den gravimetrischen Wassergehalt ist in Abb. 21 abgebildet. Die blaue Kurve (Fitting HYPROP) repräsentiert den zusammengefassten Verlauf der Messdaten aller drei STZ. Erkennbar ist dass die Proben 23 und 24 am wenigstens abweichen, dies ist auch an den Ergebnissen in Tab. 10 erkennbar.

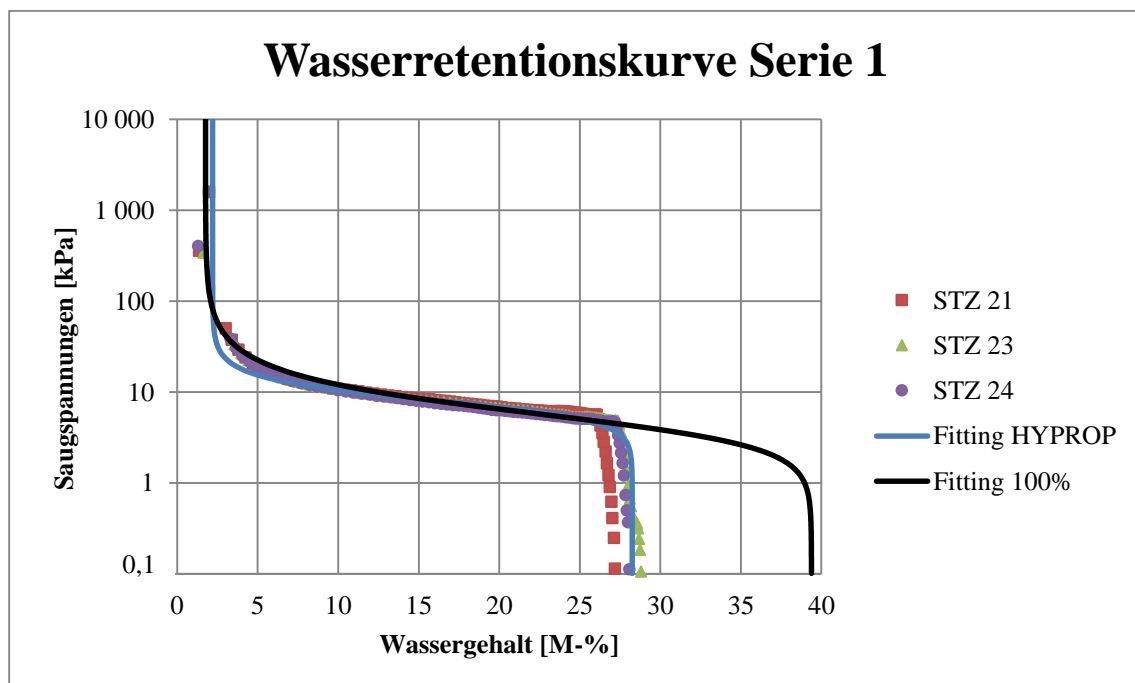


Abb. 21: Wasserretentionskurve der ersten Probenserie bezogen auf gravimetrischen Wassergehalt

Die schwarze Kurve zeigt den Verlauf bei 100 % Sättigung. Hierzu wurde der Anfangswassergehalt bei $S_r = 1$ linear interpoliert und als Fittingparameter Θ_s in das Auswertungsprogramm eingegeben. Besagter Wassergehalt beträgt 39,4 M-% bzw. 52,3 Vol.-%.

Abb. 22 zeigt die gleichen Versuchsergebnisse jedoch auf den volumetrischen Wassergehalt bezogen. Zu erkennen ist der Wassergehalt von 52,3 Vol.-% bei einer vollständig gesättigten Probe.

Die Diagramme zeigen das typische Verhalten von Sand während eines Verdunstungsvorgangs. Im gesättigten Bereich leitet der Sand das Wasser schnell an die Oberfläche, da größere Porenkanäle ($> 50 \mu\text{m}$) (Scheffer, Schachschabel, 2010) noch vollständig mit Wasser gefüllt sind. Ab einer Saugspannung von ca. 5 kPa (blaue Kurve) sinkt der Wassergehalt aufgrund der Entleerung dieser Poren (Erreichung des Lufteintrittspunktes) steil ab und verläuft ab ca. 60 kPa konstant dem Drucktopfpunkt von 2,65 Vol. % entgegen.

Wäre der Messpunkt von der Drucktopfmethode nicht eingetragen, würde der Wassergehalt weiterhin sinken. Jedoch könnte keine Pflanze diese Restfeuchtigkeit aus dem Boden saugen (PWP) weshalb der residuale Wassergehalt mit 2,65 Vol.-% fixiert wurde.

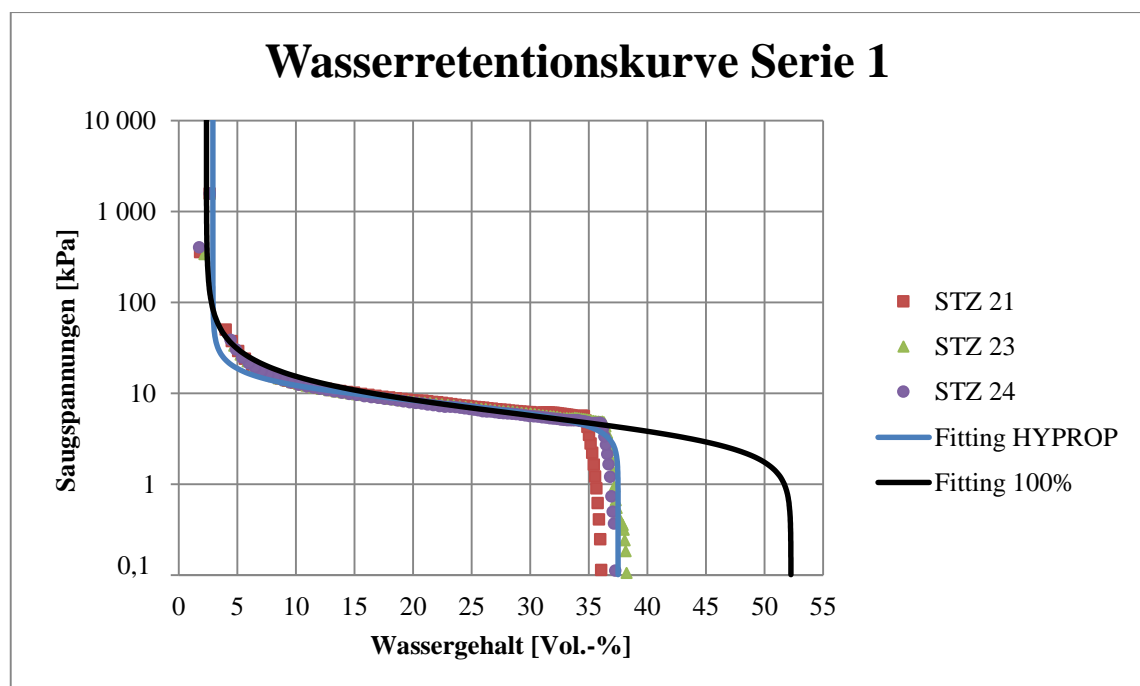


Abb. 22: Wasserretentionskurve der ersten Probenserie bezogen auf volumetrischen Wassergehalt

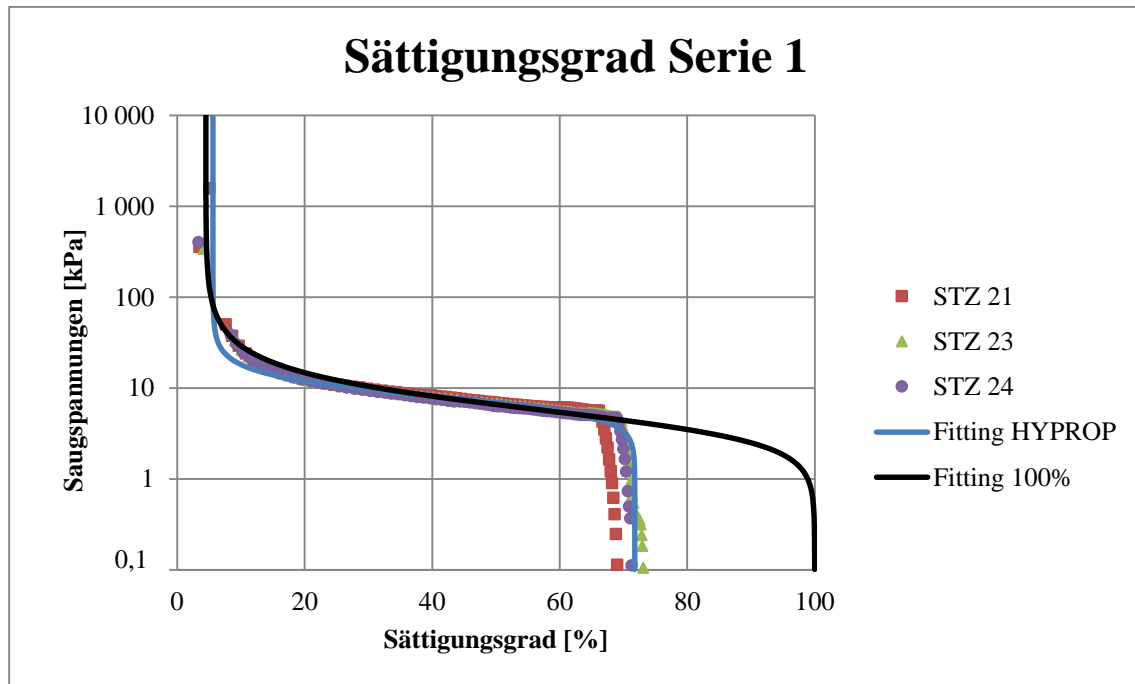


Abb. 23: Wasserretentionskurve der ersten Probenserie bezogen auf den Sättigungsgrad

In Abb. 23 wird der Saugspannungsverlauf auf den Sättigungsgrad bezogen. Ersichtlich sind die Kurve des tatsächlich erreichten Sättigungsgrades (blaue Kurve) sowie die des auf 100 % interpolierten Sättigungsgrades (schwarze Kurve).

Beim Vergleich der beiden Kurven wurde festgestellt, dass sich bei vollständiger Sättigung die Poren bei kleiner Saugspannung (ca. 3 kPa) entleeren und die Steigung der Kurve danach ähnlich verläuft. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die hydraulische Leitfähigkeit des schluffigen Sandes bei Sättigung höher ist und mit zunehmender Saugspannung und damit verbundener Teilsättigung abnimmt.

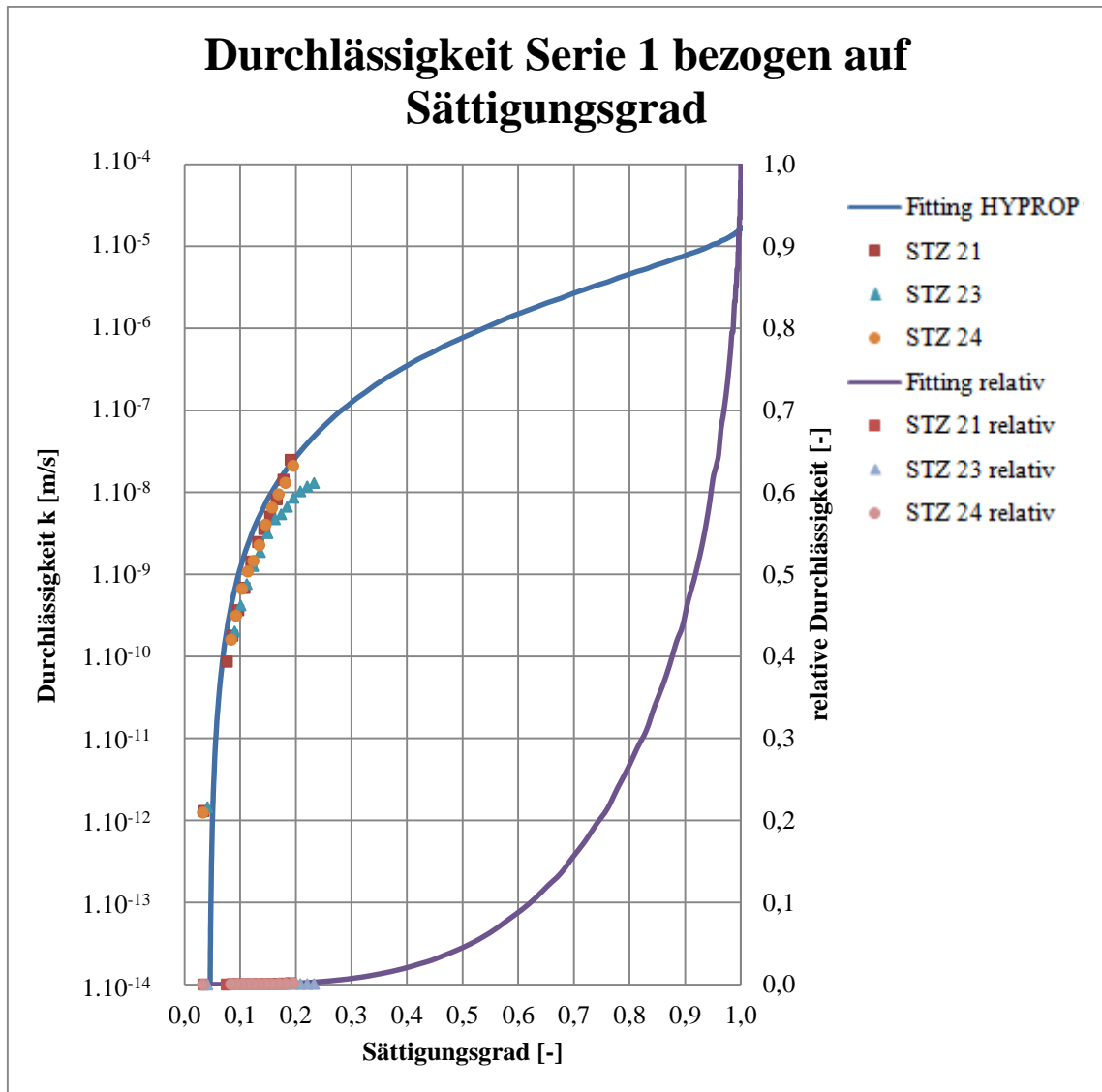


Abb. 24: Durchlässigkeitskurven der ersten Probenserie

Für die Erstellung der Abb. 24 wurde die Fittingkurve bei 100 % Sättigung verwendet. Auf der linken Ordinate ist die Durchlässigkeit k [m/s] und auf der rechten Ordinate die relative Durchlässigkeit [-] auf den, auf der Abszisse dargestellten Sättigungsgrad [-] bezogen.

Bei der Auswertung der Durchlässigkeitskurve wurde der zuvor im Permeameter bestimmte Durchlässigkeitskoeffizient k_{∂} auf den Vergleichskoeffizient k_{10} umgerechnet und als gesättigten Durchlässigkeitsparameter K_s mit 147 cm/d in die Auswertungssoftware eingetragen.

Beide Kurven zeigen das gleiche Verhalten, die Durchlässigkeit des Bodens nimmt mit sinkendem Sättigungsgrad und dem damit verbundenen Saugspannungsanstieg ab. Ebenfalls auffällig sind die aufgezeichneten Messpunkte der drei STZ. Die höchste Durchlässigkeit liegt nur zwischen 10^{-7} und 10^{-8} m/s, wobei der ermittelte Permeameter-Wert bei 10^{-5} m/s liegt.

Wie bereits erwähnt nimmt die Durchlässigkeit mit steigender Saugspannung ab und die Messung der Leitfähigkeit über die Tensiometer findet erst dann statt, wenn die beiden Tensionskurven (obere Kerze und untere Kerze) sich trennen. Bei der Probenserie 1 erfolgte diese Trennung bei einer Spannung von ca. 16 kPa, jene entspricht einem Sättigungsgrad von ca. 18 – 25 %. Das ist der Grund warum Messpunkte nur bis zu einem Sättigungsgrad von max. 25 % vorhanden sind.

4.7.2 Probenserie 2

In Tab. 11 wurden die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen zusammengefasst. Beim Einbau der Proben wurde eine gemittelte Dichte von $1,67 \text{ g/cm}^3$ erreicht welche einer Trockendichte von $1,40 \text{ g/cm}^3$ entspricht. Der errechnete Sättigungsgrad liegt bei ca. 85 %.

Tab. 11: Ergebniszusammenfassung des zweiten Verdunstungsversuchs

STZ	w	Θ	n	e	m_d	ρ	ρ_d	S_r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]	[-]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
2	29,9	42,1	49,4	1,0	350,3	1,67	1,41	85,2
3	29,7	41,8	49,4	1,0	350,2	1,67	1,41	84,6
4	29,9	41,9	49,6	1,0	348,6	1,66	1,40	84,4
	29,9	41,9	49,5	1,0	349,7	1,67	1,40	84,7

Abb. 25 zeigt die Wasserretentionskurve der Probenserie 2 bezogen auf den gravimetrischen Wassergehalt. Erkennbar ist dass die Streuung der STZ untereinander sehr gering ist, jedoch die blaue Kurve früher abknickt wie die Messpunkte.

Besagte blaue Kurve bezieht sich auf den tatsächlich erreichten Sättigungsgrad von ca. 85 % was einem gravimetrischen Wassergehalt von ca. 30 M-% entspricht (Tab. 11).

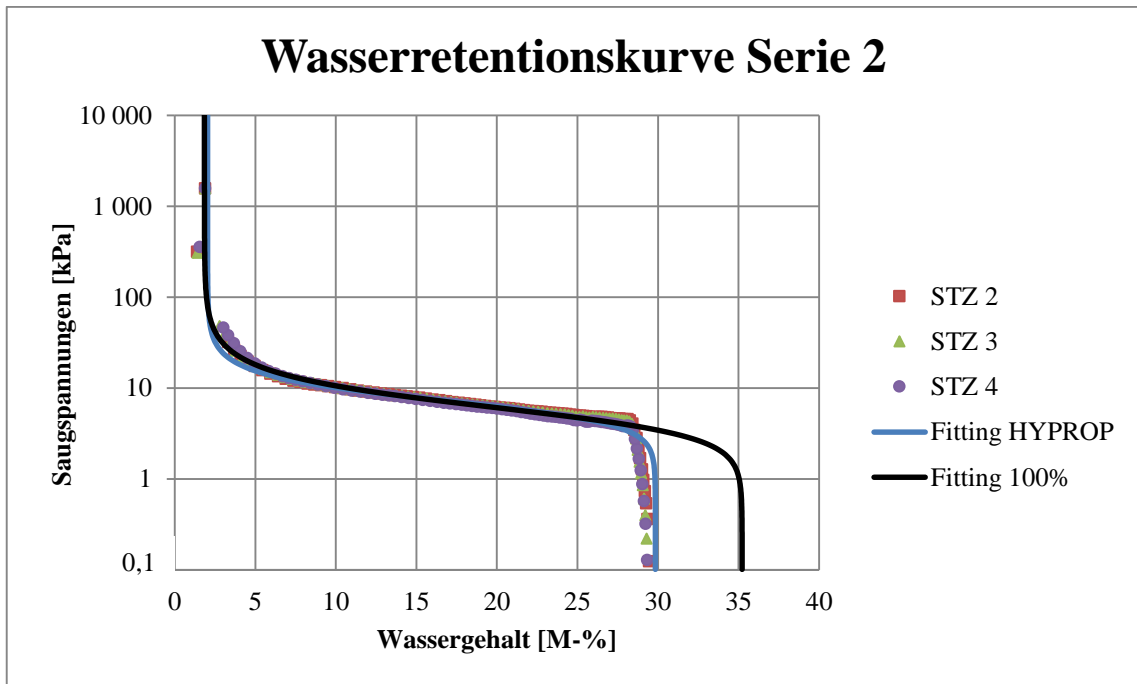


Abb. 25: Wasserretentionskurve der zweiten Probenreihe bezogen auf gravimetrischen Wassergehalt

In der Abb. 26 wurden die Saugspannungen auf den volumetrischen Wassergehalt bezogen. Wie in Abb. 25 und Abb. 27 entsprechen die blauen Kurven dem tatsächlichen Sättigungsgrad und die schwarzen Kurven wurden durch Interpolation auf 100 % Sättigung erstellt.

Der Verlauf der beiden Kurven zeigt das erwartete Verhalten von Sand mit kleinem Feinporenanteil. Ab einer Saugspannung von ca. 5 kPa beginnt der Wassergehalt der blauen Kurve steil abzufallen. Bei der schwarzen Kurve tritt dieses Verhalten bei einer Saugspannung von ca. 3 kPa ein. Die Neigung der beiden Kurven nach dem Wassergehaltsabfall gleicht sich an und beide schneiden den Messpunkt des Drucktopfversuchs bei 2,65 Vol.-% und einer Saugspannung von 1.500 kPa.

Eine genaue Gegenüberstellung der beiden Sättigungsgrade ist in Abb. 27 abgebildet. Durch die Hochrechnung für die Erstellung der schwarzen Kurven wurde ein Wassergehalt von 35,2 M-% und 49,5 Vol.-% erreicht.

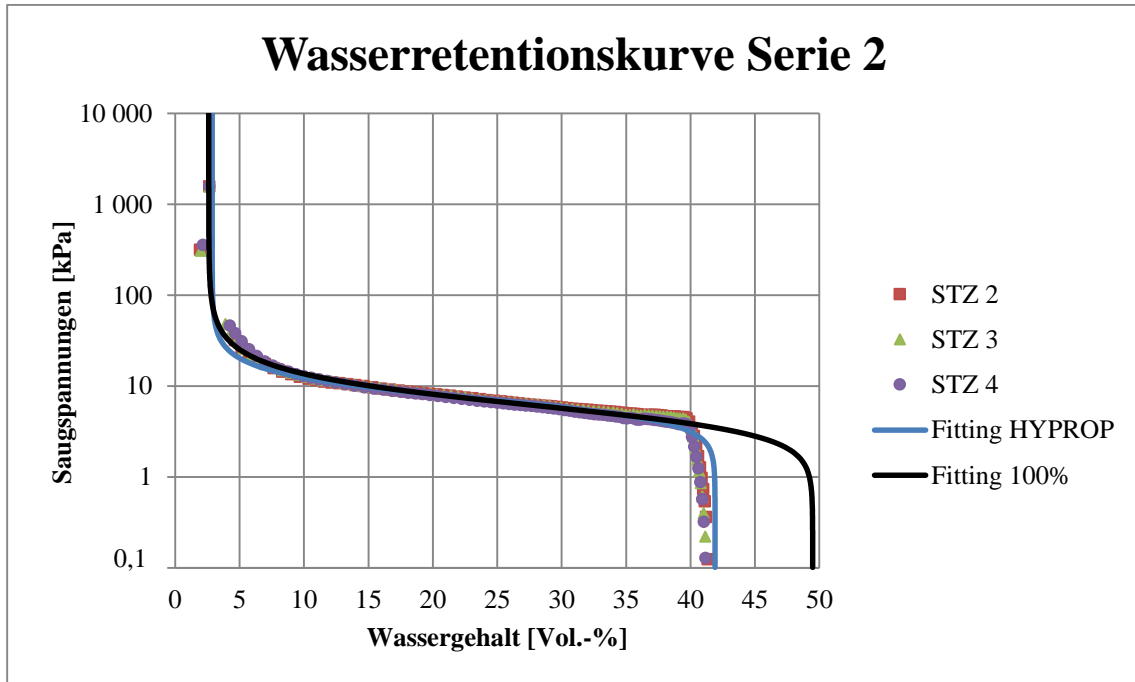


Abb. 26: Wasserretentionskurve der zweiten Probenserie bezogen auf volumetrischen Wassergehalt

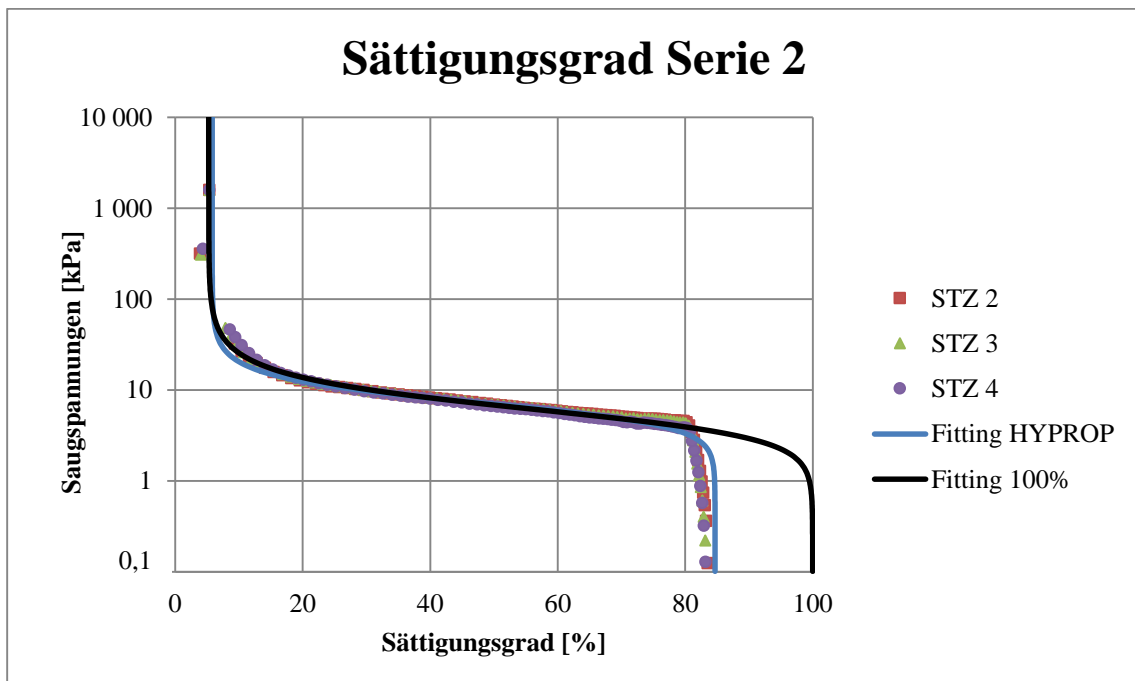


Abb. 27: Wasserretentionskurve der zweiten Probenserie bezogen auf den Sättigungsgrad

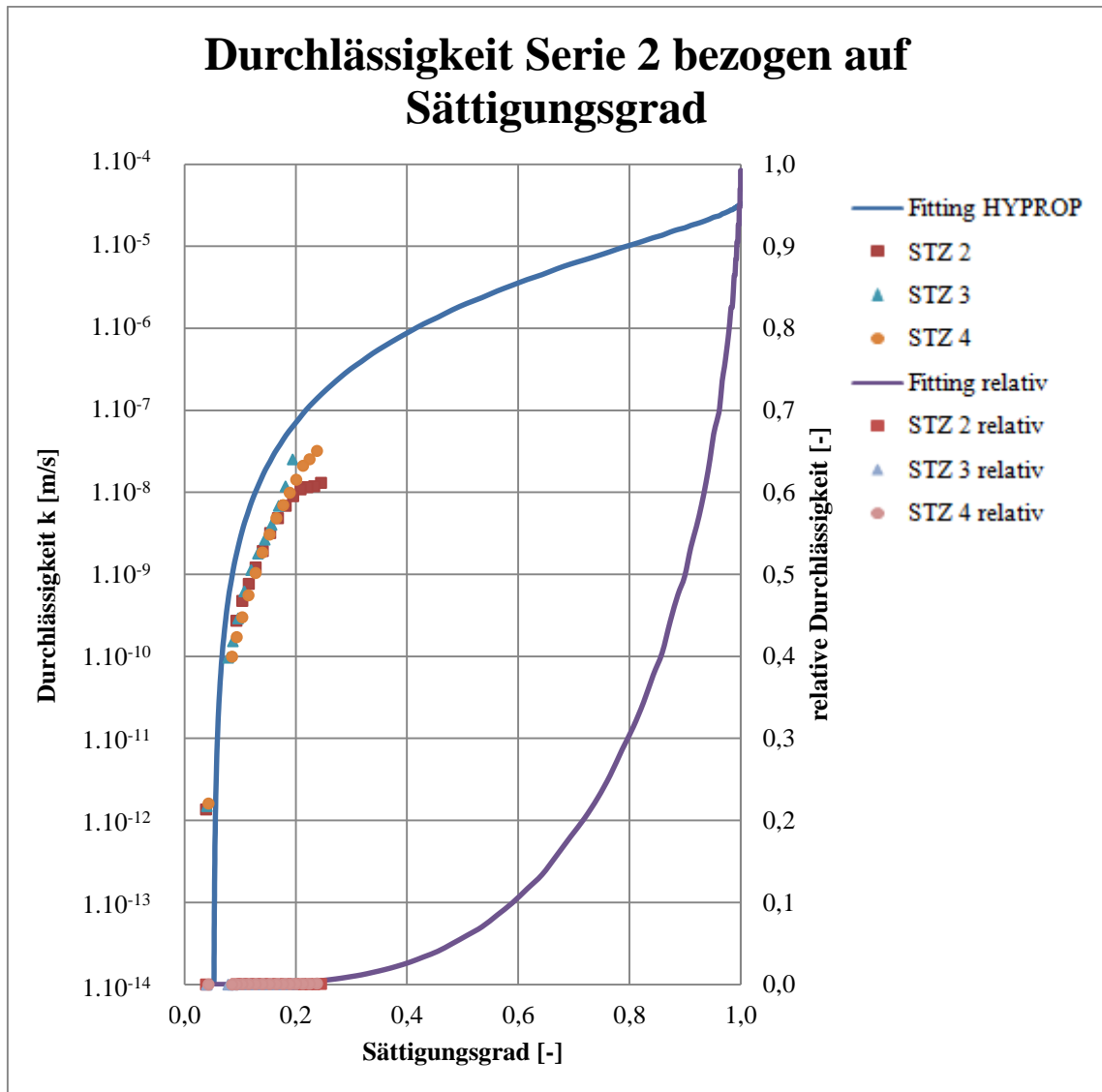


Abb. 28: Durchlässigkeitskurven der zweiten Probenreihe

Die von der Software berechnete Fittingkurve für die Durchlässigkeit k , in Abb. 28 weicht deutlich von den Messpunkten des Verdunstungsversuchs ab. Die Abweichung zeigt dass der ermittelte k_{θ} -Wert und später auf Vergleichstemperatur umgerechnete Koeffizient k_{10} als Startparameter für die Fittingkurve nicht mit dem Verlauf des Verdunstungsversuchs übereinstimmt. Als Eingabeparameter K_s wurde ein Wert von 291 cm/d eingegeben.

Die Streuung der Messpunkte der einzelnen STZ ist dort am größten wo es den Tensiometer möglich ist erste Werte zu berechnen, d.h. in einem Bereich von $1 \cdot 10^{-8}$ bis $5 \cdot 10^{-7}$ m/s und einem Sättigungsgrad von ca. 25 %. In einem Bereich von 10^{-10} bis 10^{-8} m/s sind die Streuungen nicht mehr erkennbar. Dies liegt daran dass mit steigender Saugspannung die Differenz zwischen dem Verlauf der oberen und der unteren Kerze größer wird und somit die Berechnungsgenauigkeit steigt. Besagte Genauigkeit kann im Auswertungsprogramm durch Veränderung des voreingestellten Wertes (0,3) angepasst werden.

4.7.3 Probenserie 3

Die Ergebnisauflistung der Probenserie 3 erfolgte in Tab. 12. Der Verdunstungsversuch wurde mit einem Anfangswassergehalt von 28,9 M-% bzw. 40,3 Vol.-% und einem Sättigungsgrad von 81 % durchgeführt.

Tab. 12: Ergebniszusammenfassung des dritten Verdunstungsversuchs

STZ	w	Θ	n	e	m_d	ρ	ρ_d	S_r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]	[-]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
21	28,5	39,7	49,7	1,0	347,9	1,67	1,40	80,1
23	29,0	40,4	49,9	1,0	347,1	1,65	1,39	81,0
24	29,2	40,8	49,8	1,0	347,8	1,67	1,40	81,9
	28,9	40,3	49,8	1,0	347,6	1,66	1,40	81,0

Abb. 29 zeigt die Wasserretentionskurve der dritten Probenserie bezogen auf den gravimetrischen Wassergehalt.

Die Kurve von STZ 23 entspricht einer Mittelwertkurve und wird somit von der Fittingkurve am besten nachgebildet. Im geraden Bereich nach dem Kurvenwendepunkt liegen die Messwerte der STZ wieder nahe beinander. Die anfängliche Streuung wird durch die unterschiedlichen Anfangswassergehalte von 28,5 bis 29,2 M-% bedingt.

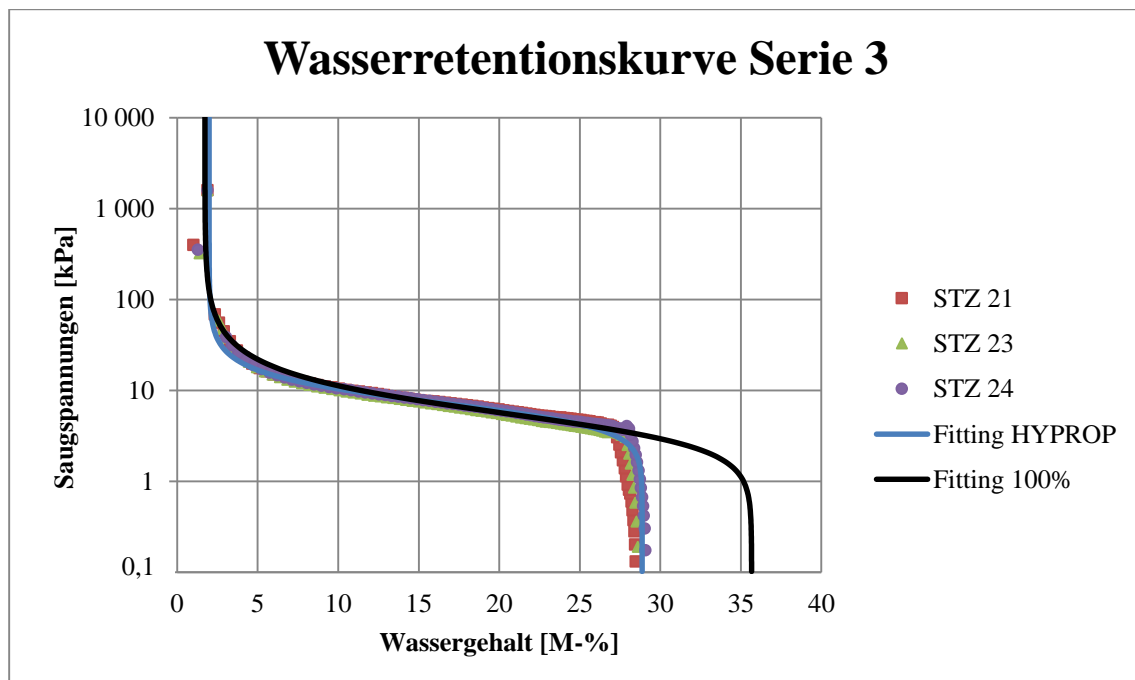


Abb. 29: Wasserretentionskurve der dritten Probenserie bezogen auf gravimetrischen Wassergehalt

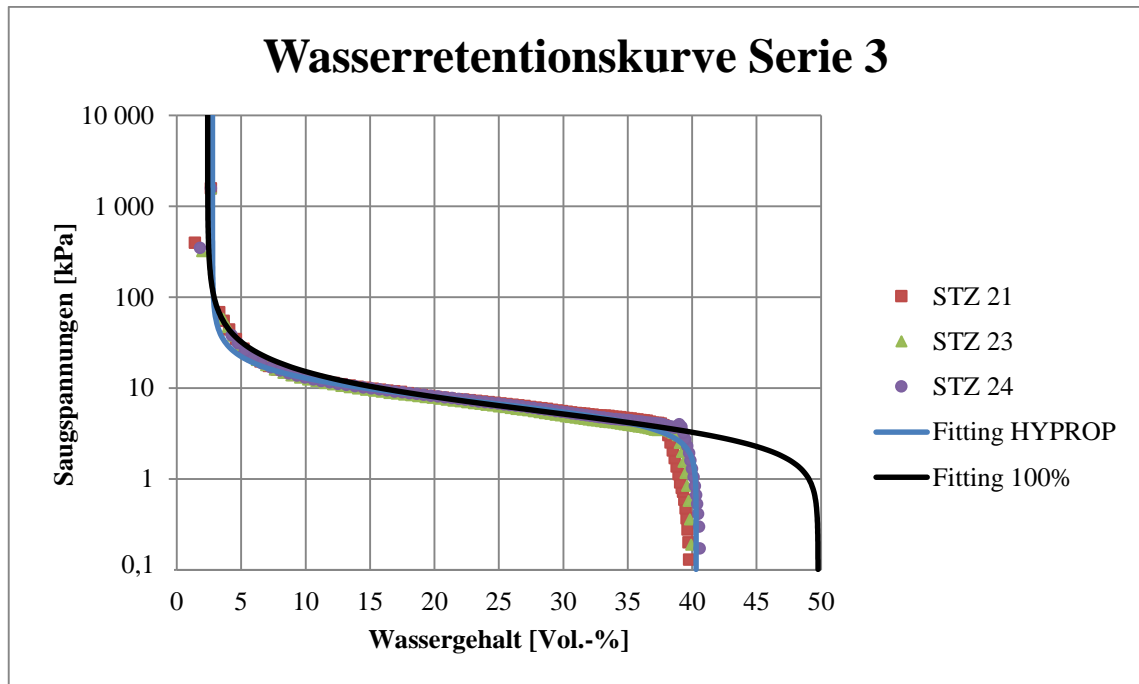


Abb. 30: Wasserretentionskurve der dritten Probenserie bezogen auf volumetrischen Wassergehalt

In Abb. 30 wurde die Saugspannungskurve auf den volumetrischen Wassergehalt bezogen. Die Verläufe aller Kurven zeigen das sandtypische Verhalten eines steil abfallenden Wassergehaltes bei fast gleicher Saugspannung.

Durch die Hochrechnung auf 100 % Sättigung stieg der Anfangswassergehalt der schwarzen Kurve auf 35,7 M-% bzw. 49,8 Vol.-%.

Das Abknicken der blauen Kurve erfolgt bei einer Saugspannung von ca. 5 kPa und das der schwarzen Kurve bei einer Saugspannung von ca. 3 kPa. Danach verlaufen beide Kurven bis zum Beginn der nächsten Krümmung gleich.

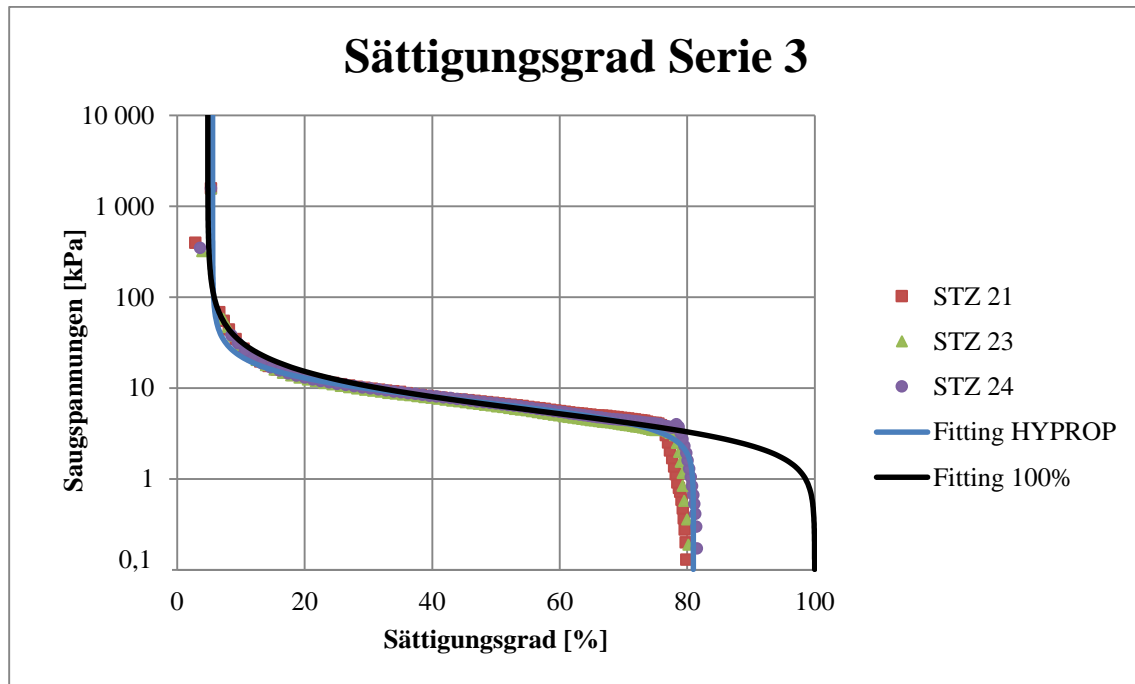


Abb. 31: Wasserretentionskurve der dritten Probenserie bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Gegenüberstellung der beiden Fittingkurven bezogen auf den Sättigungsgrad ist in Abb. 31 abgebildet. Gut zu erkennen ist die Sättigungsgraddifferenz von knapp 20 % der beiden Kurven sowie der gleiche Verlauf mit den Messpunkten nach dem Abknicken.

Die Darstellung der Durchlässigkeitskurven des Verdunstungsversuchs erfolgt in Abb. 32. Als K_s – Parameter wurde der Wert von 136 cm/d eingegeben und die Fittingkurven erstellt.

Die blaue Kurve stellt den Verlauf der Messpunkt von STZ 21 und STZ 23 gut dar. Nur STZ 24 weist Abweichungen zu Beginn des Messbereichs auf. In diesem Fall konnten die Tensiometer bereits bei einem Sättigungsgrad von 26 % Datenpunkte berechnen. Die anderen STZ verzeichneten erst ab einem Sättigungsgrad von 20 % die ersten Messdaten.

Der Anfangsbereich von STZ 24 hätte durch eine Anpassung der Tensiometergenauigkeit im Auswertungsprogramm geglättet werden können. Zumindest zeigt der ausreißende Bereich von STZ 24 dass die Ermittlung der ersten Messpunkte fehleranfälliger ist als bei eindeutiger Trennung der Tensionskurven.

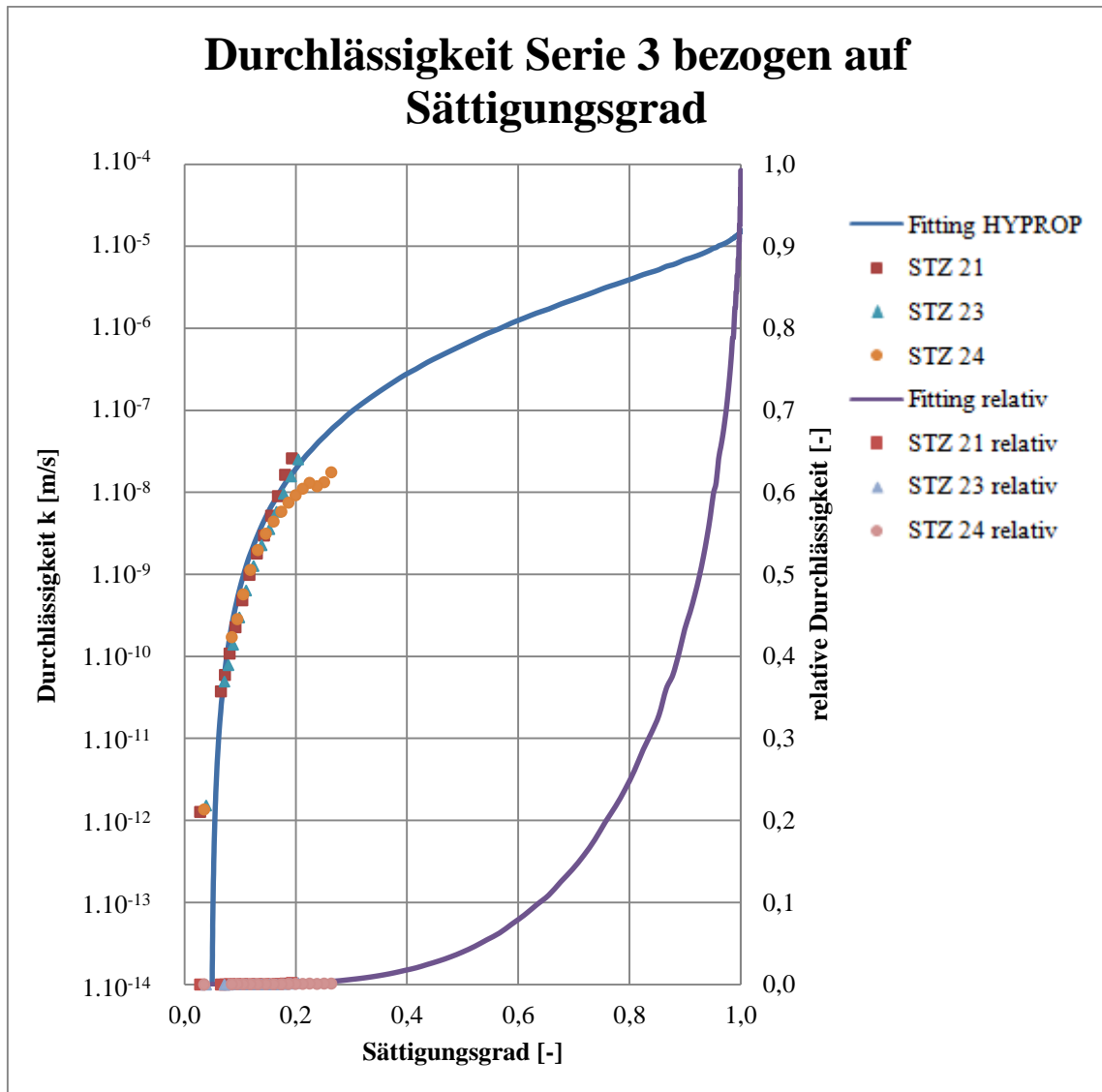


Abb. 32: Durchlässigkeitskurven der dritten Probenserie

4.7.4 Probenserie 4

Die Ergebniszusammenfassung des vierten Verdunstungsversuchs ist in Tab. 13 aufgelistet. Eingebaut wurde die Probenserie mit einer Dichte von $1,67 \text{ g/cm}^3$, eine daraus resultierende Trockendichte von $1,40 \text{ g/cm}^3$ wurde berechnet und der Sättigungsgrad bei Versuchsbeginn betrug $83,3 \%$.

Tab. 13: Ergebniszusammenfassung des vierten Verdunstungsversuchs

STZ	w	Θ	n	e	m_d	ρ	ρ_d	S_r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]	[-]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
6	29,9	41,7	49,8	1,0	347,3	1,66	1,39	83,7
7	29,4	41,1	49,7	1,0	348,1	1,67	1,40	82,7
9	29,8	41,6	49,8	1,0	347,5	1,67	1,40	83,5
	29,7	41,5	49,8	1,0	347,6	1,67	1,40	83,3

In Abb. 33 liegen die Messwerte der STZ nahe beieinander und beschreiben einen einheitlichen Wasserretentionsverlauf. Der Anfangswassergehalt lag bei $29,7 \text{ M-%}$ bzw. $41,5 \text{ Vol.-%}$. Die blaue Kurve repräsentiert das Fitting der Messdaten und knickt sichtlich vor ihnen bei einer Saugspannung von ca. 4 kPa ab.

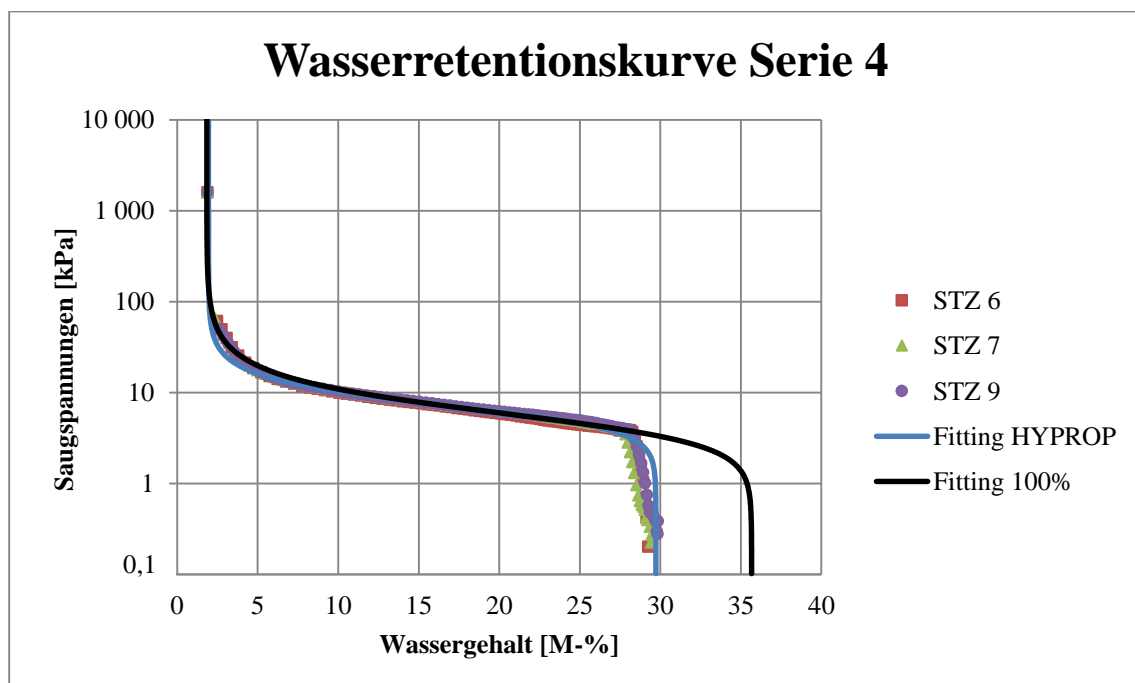


Abb. 33: Wasserretentionskurve der vierten Probenserie bezogen auf gravimetrischen Wassergehalt

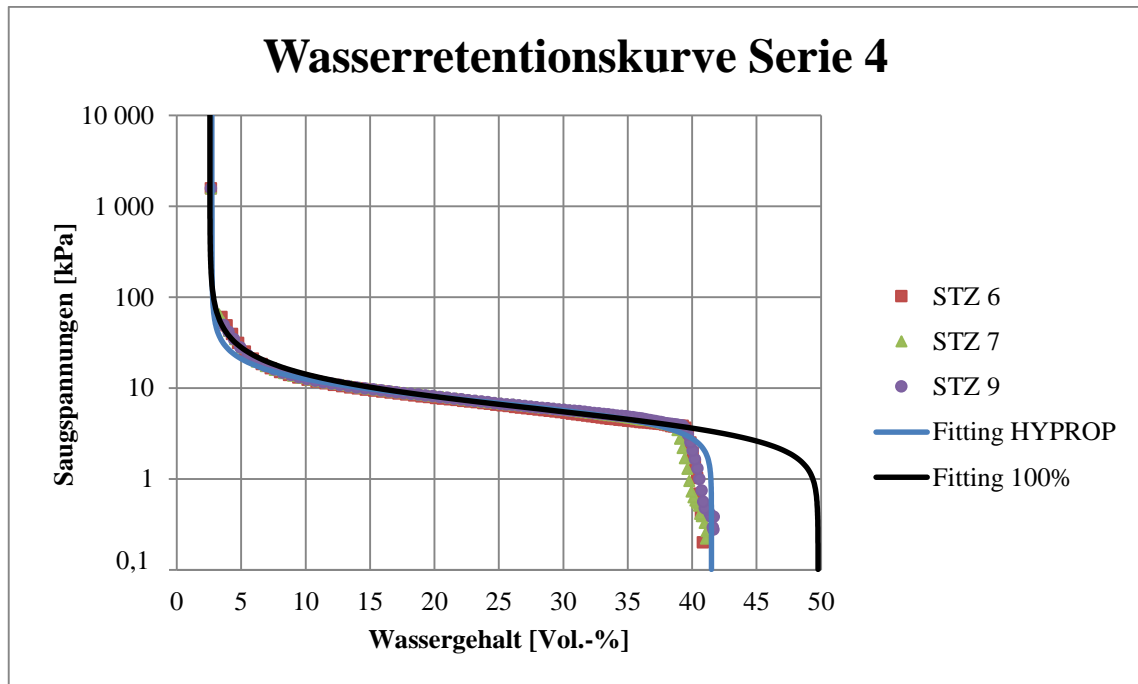


Abb. 34: Wasserretentionskurve der vierten Probenserie bezogen auf volumetrischen Wassergehalt

Abb. 34 zeigt die Wasserretentionskurve bezogen auf den volumetrischen Wassergehalt. Die schwarze Kurve wurde interpoliert und auf einen Sättigungsgrad von 100 % aufgerechnet. Dadurch erhöhte sich der Anfangswassergehalt auf 35,7 M-% bzw. 49,8 Vol.-%.

Der Wendepunkt der schwarzen Kurve beginnt bei ca. 2,5 kPa und verläuft entlang der blauen Kurve bis zum nächsten Wendepunkt (vor dem PWP). Somit entspricht die Steigung der blauen Kurve die der Schwarzen und beide weisen ein ähnliches Verhalten auf.

Eine Gegenüberstellung des Sättigungsgrades zu Versuchsbeginn und des interpolierten Sättigungsgrades ist in Abb. 35 ersichtlich. Bei diesem Diagramm wurden die Wasserretentionskurven auf den Sättigungsgrad bezogen und zeigen eine Differenz von ca. 8 %. Bis auf die beiden Krümmungen ähneln sich die Kurven und enden bei dem Drucktopf - Messpunkt mit einer Saugspannung von 1.500 kPa.

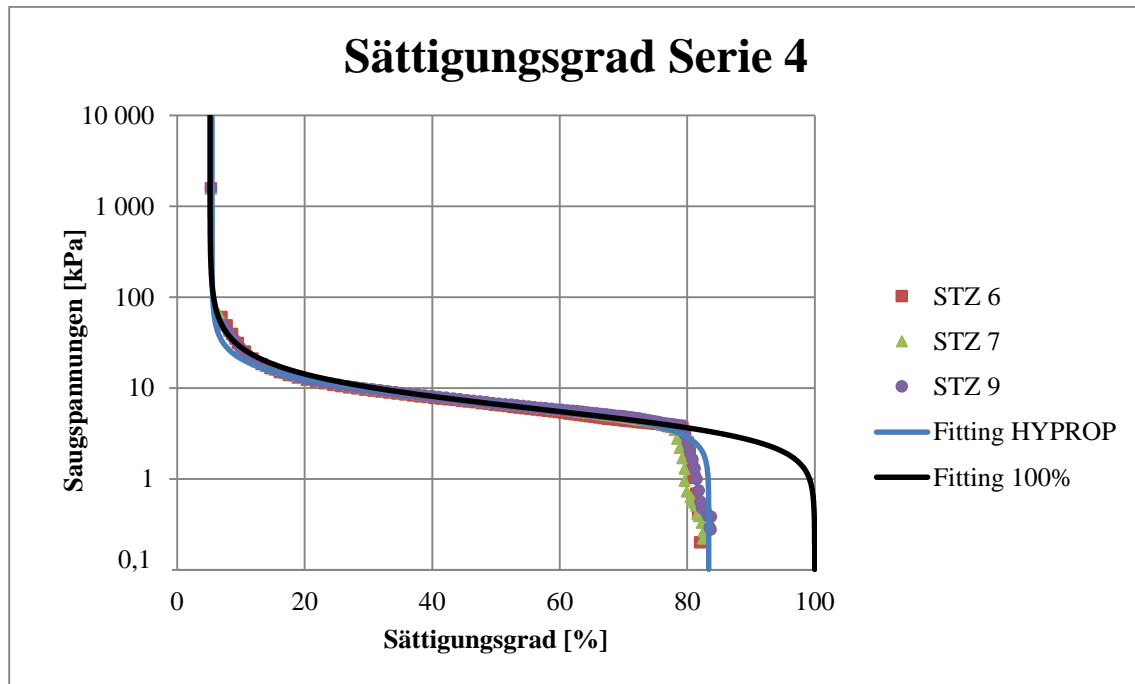


Abb. 35: Wasserretentionskurve der vierten Probenserie bezogen auf den Sättigungsgrad

Die Darstellung des Fittings der Durchlässigkeitskurve erfolgte in Abb. 36. Als gesättigte Durchlässigkeit K_s wurde der gemittelte Permeameterwert der drei STZ ins Programm eingetragen. Dieser Fittingparameter entspricht einer Durchlässigkeit von 200 cm/d und repräsentiert den Verlauf der Messdaten in einem Bereich von 10^{-8} bis $5 \cdot 10^{-11}$ m/s.

Wie bereits beschrieben ist auch hier die Streuung dort am größten wo die ersten Werte berechnet werden konnten. Im Falle des STZ 7 begann dieser Bereich bereits bei einem Sättigungsgrad von 41 % und weist somit die größte Abweichung zur Fittingkurve auf. Am besten werden die Messdaten von STZ 6 durch die Kurve nachgebildet. Hierbei treten keine Streuungen auf und die ersten Daten konnten bei einem Sättigungsgrad von 20 % ermittelt werden. STZ 9 knickt vor der Fittingkurve ab und hat dadurch die zweitgrößte Streuung.

Das Permeameterergebnis passt sich den verfügbaren Messpunkten im Bereich zwischen 10^{-8} und $5 \cdot 10^{-11}$ m/s gut an.

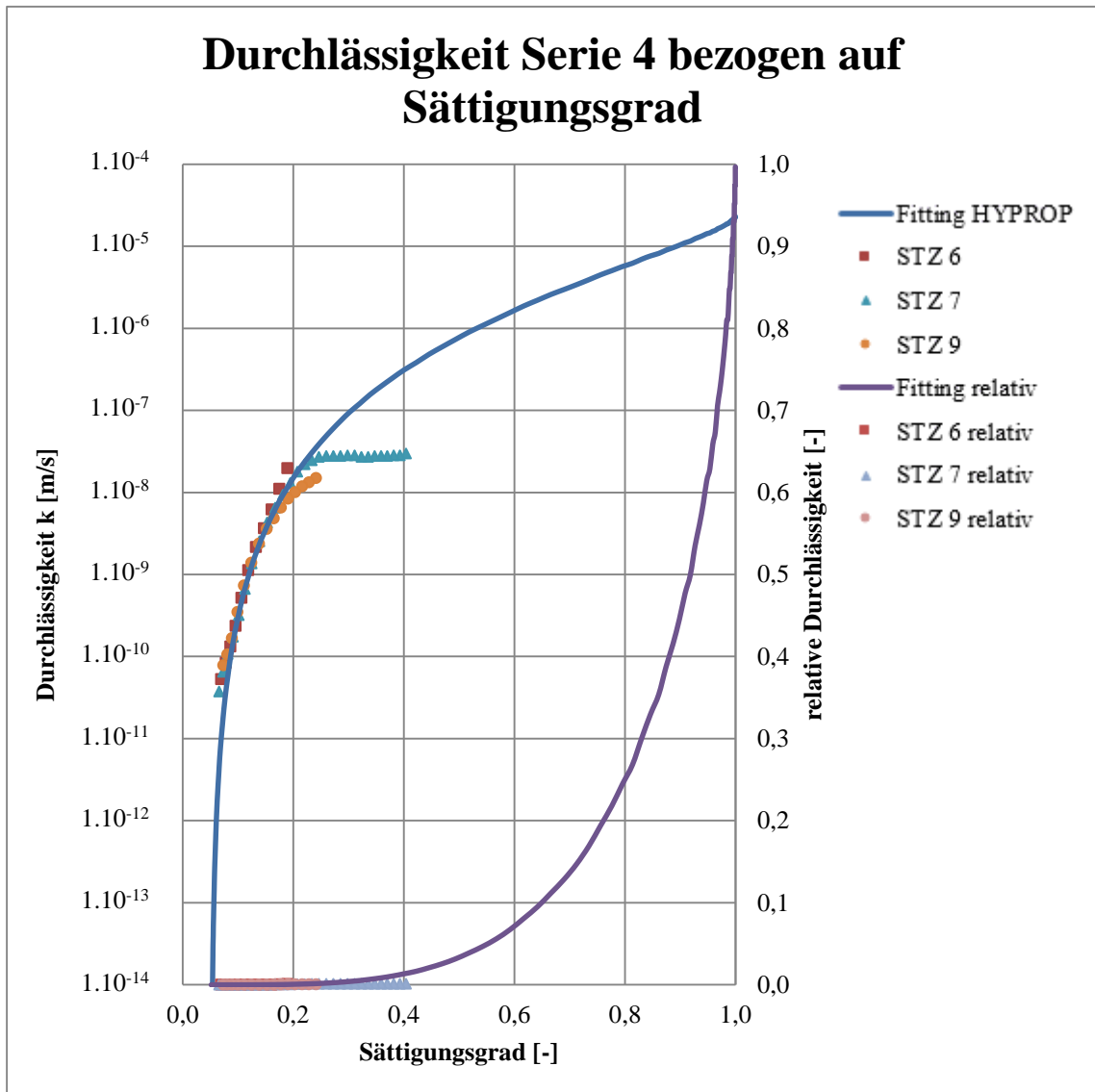


Abb. 36: Durchlässigkeitskurven der vierten Probenreihe

4.8 Ergebnisgegenüberstellung

4.8.1 Permeameter und Triaxialzelle

In Tab. 14 sind die Ergebnisse der Durchlässigkeitsbestimmung aller vier Probenserien zusammengefasst.

Die Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle wurde nur für die erste Probenserie mit einer Trockendichte von $1,33 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt. Der Permeameterversuch wurde hingegen für alle Probenserien durchgeführt weil dieser Versuch zur Aufsättigung der Proben für den späteren Verdunstungsversuch verwendet wurde. Beide Versuche wurden mit einer konstanten Druckhöhe, welche bei den einzelnen Permeameterproben unterschiedlich ist, durchgeführt.

Probenserie 2 und 3 wurden geschichtet eingebaut und die gemittelte Trockendichte ergab $1,40 \text{ g/cm}^3$. Bei Probenserie 1 und 4 hingegen wurde nur eine Schicht eingebaut. Die berechnete Trockendichte bei Serie 1 ergab $1,33 \text{ g/cm}^3$ und bei Serie 4 wurde eine Trockendichte von $1,40 \text{ g/cm}^3$ erzielt.

Tab. 14: Gegenüberstellung der Durchlässigkeitsergebnisse

	Trockendichte	Sichtaufbau		Permeameter	Triaxialzelle
	$\rho_d \text{ [g/cm}^3\text{]}$	Sichten	$\rho \text{ [g/cm}^3\text{]}$	$k_{10} \text{ [m/s]}$	$k_{10} \text{ [m/s]}$
Serie 1	1,33	1	1,58	$1,7 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$
Serie 2	1,40	2	1,75 / 1,58	$3,4 \cdot 10^{-5}$	
Serie 3	1,40	2	1,58 / 1,75	$1,6 \cdot 10^{-5}$	
Serie 4	1,40	1	1,67	$2,3 \cdot 10^{-5}$	

Ziel dieser Gegenüberstellung ist es die Durchlässigkeitsveränderung zufolge verschiedener Dichte, Einbauart und Methode zu verdeutlichen.

Serie 1 wurde mit nur einer Schicht und einer Trockendichte von $1,33 \text{ g/cm}^3$ eingepresst und die gesättigte hydraulische Durchlässigkeit im Permeameter sowie in der Triaxialzelle geprüft. Bei der Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizient wurde beim Permeameterversuch ein hydraulischer Gradient i zwischen 0,04 und 0,17 aufgebracht und ein Vergleichskoeffizient k_{10} von $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ berechnet. Der Durchlässigkeitsversuch mittels Triaxialzelle wurde mit einem hydraulischen Gradienten i von 8 durchgeführt und ein Vergleichskoeffizient k_{10} von $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ berechnet. Das Ergebnis des Permeameterversuch ist um ca. 31 % höher als das Ergebnis mittels Triaxialzelle.

Der Unterschied könnte am hydraulischen Gradienten sowie am erschwerten Einbau in die Triaxialzelle, aufgrund der geringen Dichte liegen. Ebenfalls könnte durch die wirkende Strömungskraft eine Umlagerung der Feinteile in die Grobporen des Bodens passiert sein.

Bei Probenserie 2 wurde die erste Schicht mit $1,75 \text{ g/cm}^3$ und die zweite mit $1,58 \text{ g/cm}^3$ eingebaut. Demnach wurde zuerst die dichtere Schicht durchströmt. Während des Permeameterversuchs wurde bei einem hydraulischen Gradienten i zwischen 0,07 und 0,11 gemessen und ein Vergleichskoeffizient k_{10} von $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ berechnet.

Im Vergleich mit dem Permeameterergebnis der ersten Probenserie ist Serie 2, trotz höherer Trockendichte von $1,40 \text{ g/cm}^3$, 100 % durchlässiger. Erklärt werden könnte dies durch Umlagerungen von Feinteilen in größer Poren was zu einer Reduzierung der Durchlässigkeit führt.

Bei Probenserie 3 wurden die gleichen Einbaudichten wie in Serie 2 verwendet, die Schichten jedoch in umgekehrter Reihenfolge eingebaut. Die berechnete Trockendichte der Serie 3 liegt bei $1,40 \text{ g/cm}^3$ und entspricht somit exakt der der Serie 2. Während der Durchflussmessung im Permeameter wurde ein hydraulischer Gradient i zwischen 0,02 und 0,05 aufgezeichnet. Der berechnete k_{10} -Wert ergab eine Durchlässigkeit von $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ bei 10 °C .

Im direkten Vergleich ist die Serie 2 um 113 % durchlässiger wie Serie 3. Grund hierfür könnte eine Porenraumverfüllung an der Kontaktfläche der beiden Schichten, zufolge Feinanteilauswaschungen der weniger dichten Schicht sein.

Für die Herstellung der Probenserie 4 wurde das Bodenmaterial mit einer Einbaudichte von $1,67 \text{ g/cm}^3$ eingepresst. Diese Serie diente der Prüfung ob ein Schichtaufbau mit unterschiedlicher Dichte die gleichen Ergebnisse erzeugt wie nur eine Schicht mit der Mittelwertdichte. Die berechnete Trockendichte von Serie 4 beträgt $1,40 \text{ g/cm}^3$ und entspricht somit der der Serien 2 und 3.

Der Permeameterversuch wurde mit einem hydraulischen Gradienten i zwischen 0,05 und 0,09 durchgeführt und ein k_{10} - Wert von $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ berechnet. Beim Vergleich mit den Serien 2 und 3 liegt Serie 4 genau in der Mitte. Somit kann davon ausgegangen werden dass der Schichtaufbau Auswirkung auf die Durchlässigkeit des Bodens hat.

4.8.2 Wasserretentionskurven der Probenserien

Eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse von allen vier Serien wurde in Tab. 15 aufgelistet. Diese Werte beziehen sich auf den tatsächlichen Anfangswassergehalt und Sättigungsgrad

Tab. 15: Ergebnisgegenüberstellung aller Verdunstungsserien

Serie	w	Θ	n	e	m_d	ρ	ρ_d	S_r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]	[-]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	28,3	37,5	52,3	1,1	330,4	1,58	1,33	71,8
2	29,9	41,9	49,5	1,0	349,7	1,67	1,40	84,7
3	28,9	40,3	49,8	1,0	347,6	1,66	1,40	81,0
4	29,7	41,5	49,8	1,0	347,6	1,67	1,40	83,3

Tab. 16 zeigt die durch Interpolation aufgerechneten gravimetrischen und volumetrischen Wassergehalte bei 100 % Sättigung der vier Versuchsserien.

Tab. 16: Ergebnisgegenüberstellung bei 100 % Sättigung

Serie	w	Θ	S_r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]
1	39,4	52,3	100
2	35,2	49,5	100
3	35,7	49,8	100
4	35,7	49,8	100

In den folgenden Diagrammen werden die in Tab. 16 angeführten Ergebnisse des Verdunstungsversuchs grafisch abgebildet.

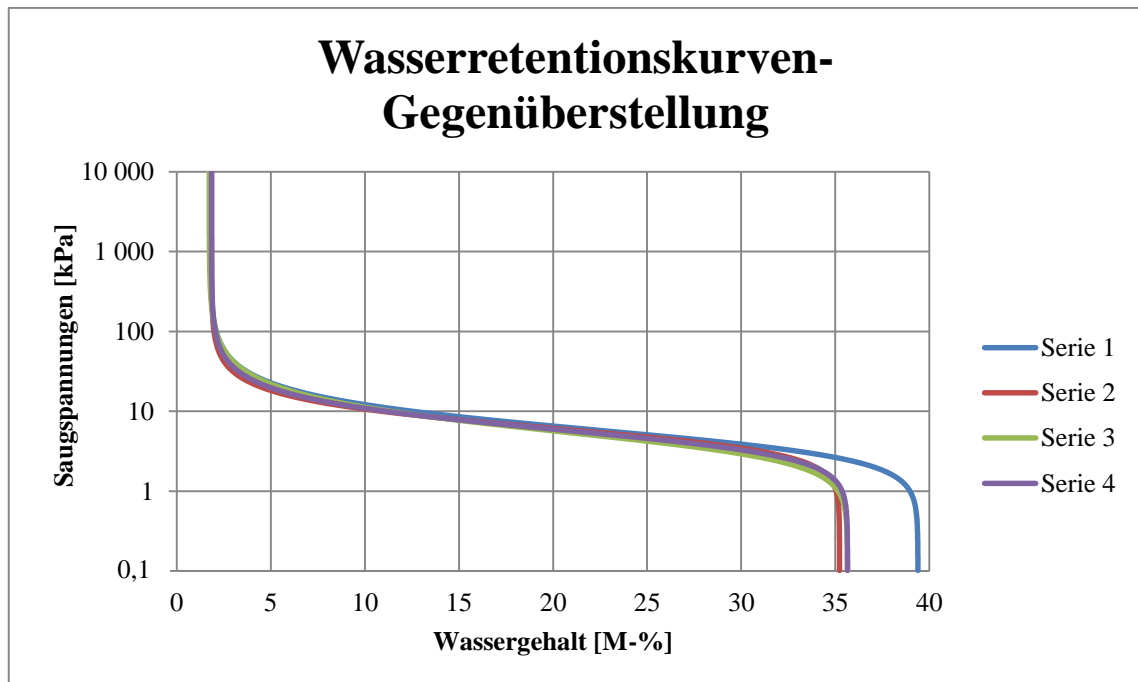


Abb. 37: Wasserretentionskurven aller Probenserie bezogen auf den gravimetrischen Wassergehalt bei 100 % Sättigung

Abb. 37 zeigt die auf einen Sättigungsgrad von 100 % interpolierten Wasserretentionskurven aller Probenserien bezogen auf den gravimetrischen Wassergehalt.

Die Abb. 38 stellt die gleichen Kurven jedoch bezogen auf den volumetrischen Wassergehalt dar.

Beide Diagramme zeigen, dass sich die Kurven trotz unterschiedlicher Dichten und unterschiedlichem Schichtaugbau bis auf den Anfangsbereich kaum unterscheiden. Alle weisen den rasch eintretenden Wasserverlust, durch Erreichen des Lufteintrittspunktes bei Saugspannungen von 3 kPa und den steil abfallenden Wassergehalt auf.

Die Kurven der einzelnen Serien unterscheiden sich nur bezüglich ihres Anfangswassergehaltes, welcher durch die Einbaudichte bedingt wird. So zeigt z.B. Serie 1 einen Wassergehalt von 39,4 M-% bzw. 52,3 Vol.-% und im Vergleich dazu Serie 4 eine Anfangswassergehalt von 35,7 M-% bzw. 49,8 Vol.-%.

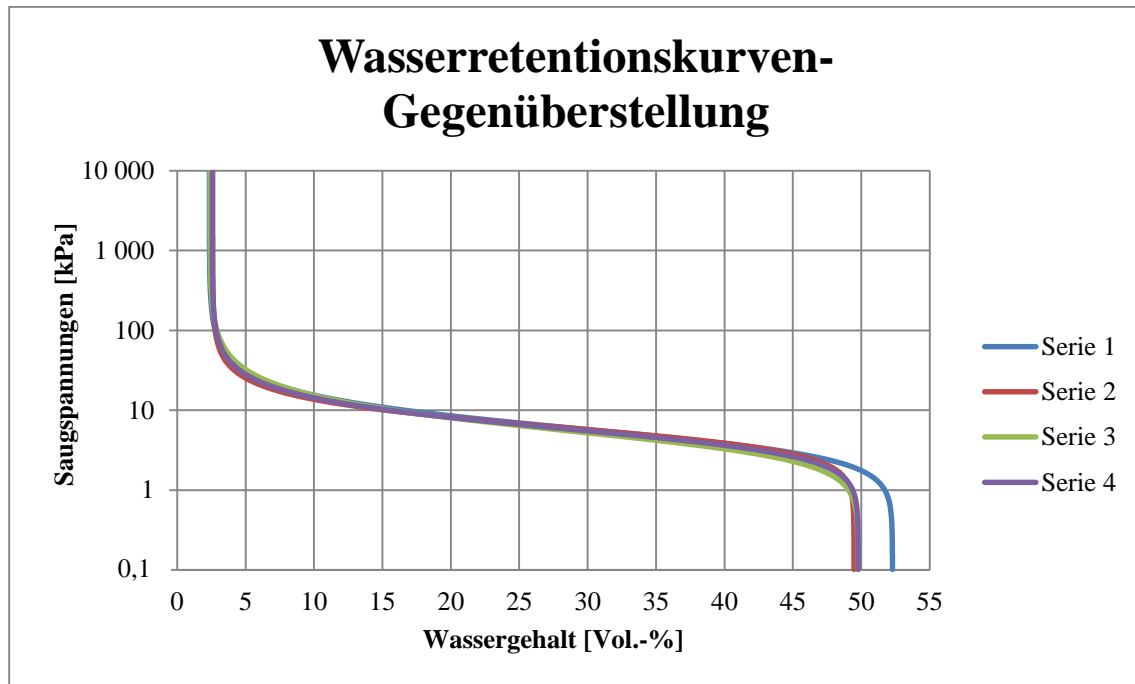


Abb. 38: Wasserretentionskurven aller Probenserie bezogen auf den volumetrischen Wassergehalt bei 100 % Sättigung

Die Streuung der Kurven von Serie 2, 3 und 4 sind in Abb. 38 kaum zu erkennen. Dies liegt daran dass die Trockendichte der Serien ident ist und der Anfangswassergehalt zwischen 49,5 und 49,8 Vol.-% liegt. Serie 3 und 4 weisen den gleichen Wassergehalt auf und haben somit einen gleichen Kurvenstartpunkt.

Die Kurve der ersten Probenserie weist, im Vergleich zu den anderen Serien, einen höheren Anfangswassergehalt auf. Jedoch verläuft auch diese Kurve nach der Krümmung auf der Position der anderen. Durch die Vorgabe des Messpunktes aus dem Drucktopfversuch verlaufen alle Kurven auch nach der zweiten Krümmung auf ähnlicher Position.

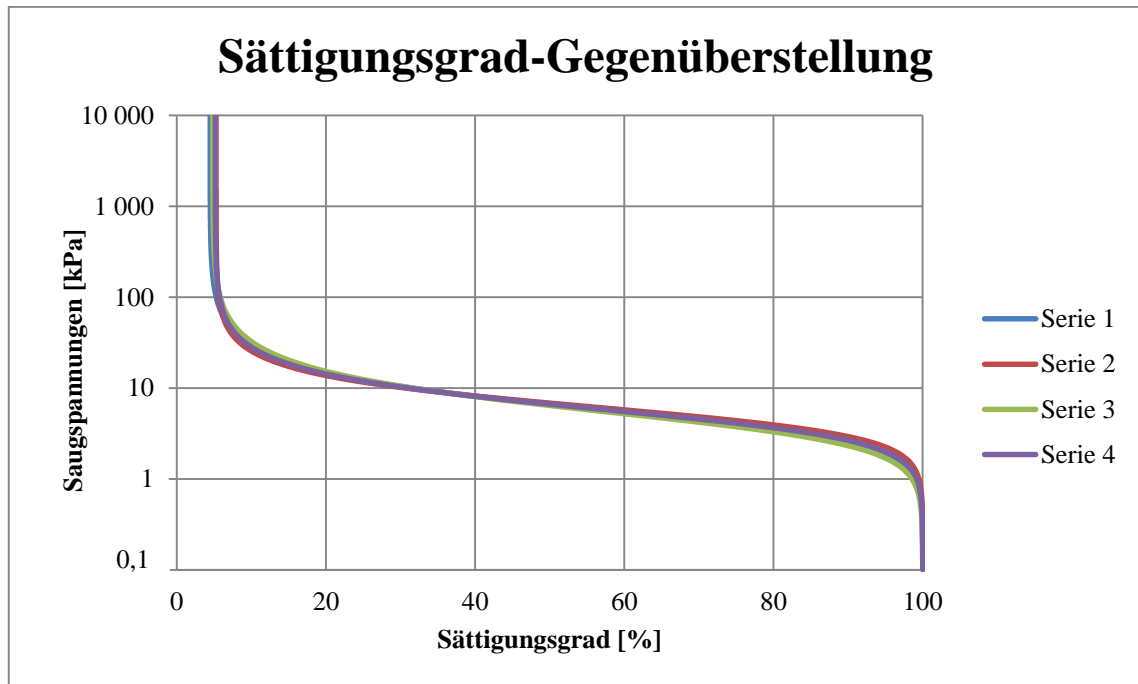


Abb. 39: Wasserretentionskurven aller Probenserie bezogen auf 100 % Sättigungsgrad

In Abb. 39 wurden alle Kurven auf einen Sättigungsgrad von 100 % bezogen um die Streuungen durch die unterschiedlichen Anfangswassergehalte zu vermeiden. Ersichtlich ist ein identer Verlauf zwischen den Krümmungen. In den Krümmungen selbst und auf der Vertikalen nach der letzten gibt es leichte Abweichungen zwischen den Kurven.

Die Ausgabeparameter der HYPROP-FIT[®] Software bezogen auf den tatsächlichen Wassergehalt sind in Tab. 17 und die interpolierten Ergebnisse in Tab. 18 dargestellt.

Tab. 17: Fittingparameter aller Serien mit tatsächlichem Sättigungsgrad

Übersicht Fitting Parameter kombiniert:						
gefittet	Parameter	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Einheit
1	α	0,013	0,015	0,016	0,015	1/cm
1	n	4,051	3,568	3,264	3,396	-
1	Θ_r	0,029	0,029	0,028	0,027	cm ³ /cm ³
0	Θ_s	0,375	0,419	0,403	0,415	cm ³ /cm ³
0	K _s	147	290	135	200	cm/d
berechnet	m	0,753	0,720	0,694	0,706	-

Tab. 18: Fittingparameter aller Serien - Aufrechnung auf 100 % Sättigung

Übersicht Fitting Parameter mit 100 % Sättigung:						
gefittet	Parameter	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Einheit
1	α	0,021	0,019	0,023	0,020	1/cm
1	n	2,558	2,887	2,457	2,696	-
1	Θ_r	0,023	0,026	0,024	0,026	cm ³ /cm ³
0	Θ_s	0,523	0,495	0,498	0,498	cm ³ /cm ³
0	K _s	147	290	135	200	cm/d
berechnet	m	0,609	0,654	0,593	0,629	-

Alle Werte in den beiden Tabellen die mit 1 gefittet sind entsprechen Werte die vom Programm ermittelt wurden. Für jene die mit 0 gekennzeichnet sind wurden Werte aus den Serienergebnissen eingefügt und diese somit fixiert. Der zusätzliche Kurvenparameter m wurde durch die Formel (15) berechnet.

Zu erkennen ist dass die Krümmung nach der Interpolation stärker ist, der Anfangswassergehalt erhöht wurde und der gesättigte Durchlässigkeitsbeiwert K_s unverändert blieb. Durch die Eingabe der hochgerechneten Werte wurde der residuale Wassergehalt im Zuge der Softwareberechnung leicht verändert.

4.8.3 Durchlässigkeitskurven der Probenserie

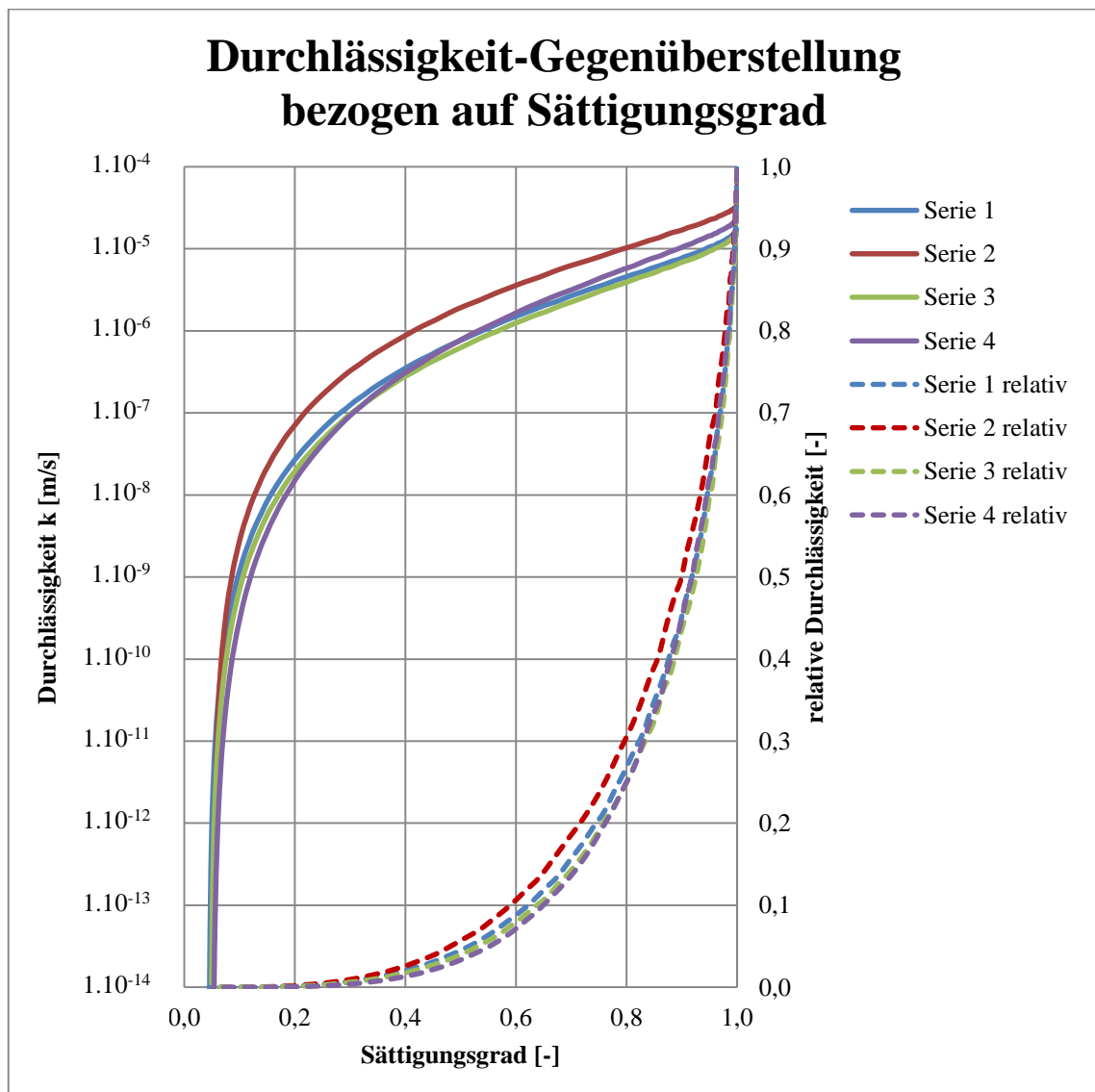


Abb. 40: Durchlässigkeitskurven der aller Probenserie

Die Gegenüberstellung der Durchlässigkeitskurven, ermittelt aus den Verdunstungsversuchen ist in Abb. 40 dargestellt. Wie bereits bei den Permeameter-ergebnissen beschrieben, weichen diese Kurven aufgrund des fixierten Eingabeparameter K_s von einander ab, wobei die Serie 2 die größte Abweichung aufweist. Serie 4 liegt beim Startpunkt zwischen Serie 2 und 3 und verläuft anschließend ähnlich wie die Kurve der Serie 3. Trotz der niedrigsten Trockendichte gleicht der Kurvenverlauf von Serie 1 dem von Serie 3.

Durch die Darstellung der relativen Durchlässigkeit kommt es zu keinen Streuungen zu Beginn bzw. am Ende der Kurven. Die äußeren Grenzkurven sind jene der Serie 2 und 4 wobei auch hier Serie 2 am meisten abweicht. Wird nur der Kurvenverlauf beobachtet weisen alle Serien, bis auf den verschobenen Wendepunkt, den gleichen Verlauf auf.

4.9 Ergebniszusammenfassung

In Tab. 19 wurden die Ergebnisse der Indexversuche zusammengefasst.

Tab. 19: Zusammenfassung aller Indexversuchsergebnisse

Korngrößenverteilung: si Sa		
D₁₀	0,0486	[mm]
D₃₀	0,0832	[mm]
D₆₀	0,1592	[mm]
C_U	3,28	[-]
C_c	0,89	[-]
Korndichtebestimmung:		
ρ_s	2,78	[g/cm ³]
Proctorversuch:		
ρ_{Pr}	1,59	g/cm ³
W_{opt}	19,4	[%]

Tab. 20 beinhaltet die zusammengefassten Versuchsergebnisse zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften des Bodens.

Tab. 20: Ergebniszusammenfassung der hydraulischen Bodeneigenschaften

Durchlässigkeitsbestimmung								
	Permeameter	Triaxialzelle						
Serie	k ₁₀ [m/s]	k ₁₀ [m/s]						
1	1,7 10 ⁻⁵	1,3 10 ⁻⁵						
2	3,4 10 ⁻⁵	-						
3	1,6 10 ⁻⁵	-						
4	2,3 10 ⁻⁵	-						
Verdunstungsversuch HYPROP®								
Serie	w	Θ	n	e	m _d	ρ	ρ _d	S _r
	[M-%]	[Vol.-%]	[%]	[-]	[g]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[%]
1	28,3	37,5	52,3	1,1	330,4	1,58	1,33	71,8
2	29,9	41,9	49,5	1,0	349,7	1,67	1,40	84,7
3	28,9	40,3	49,8	1,0	347,6	1,66	1,40	81,0
4	29,7	41,5	49,8	1,0	347,6	1,67	1,40	83,3

5 Diskussion

Die Korngrößenverteilung ergab dass es sich um einen schluffigen Sand mit einem Schluffanteil von 18 %, einem Feinkiesanteil von 0,2 % und einem Sandanteil von 81,8 % handelt.

Bei der Korngrößenbestimmung ergab sich eine ρ_s – Wert von 2,78 g/cm³ welcher im Vergleich zu den Erfahrungswerten für Sande nach Boley, 2012 zu hoch ist. Erklärt werden könnte dies durch eine Bestimmung der im Bodenmaterial enthaltenen Mineralien, welche jedoch nicht in dieser Masterarbeit durchgeführt wurde. Enthält das verwendete Material Anteile von beispielsweise Glimmer ($\rho_s = 2,8$ bis 2,9 g/cm³) würde sich somit auch die Korndichte erhöhen. Da jedoch der Versuch nach ÖNORM EN ISO 17892-3:2015 durchgeführt und die berechnete Ergebnisabweichung innerhalb der Grenze von 0,03 g/cm³ lag, wurde dieses Ergebnis als gültig angesehen und weiter verwendet.

Im Zuge des Proctorversuchs wurden insgesamt elf Verdichtungen durchgeführt und die aussagekräftigsten sechs als Proctorkurve dargestellt. Als Ergebnis wurde eine Trockendichte von 1,59 g/cm³ mit dazugehörigem optimalem Wassergehalt von 19,4 % ermittelt. Beide Werte fallen beim Vergleich mit Erfahrungswerten nach Boley, 2012 in den Bereich von Schluff ($p_{Pr} = 1,61 - 1,80$ und $w_{opt} = 16-22$), welcher ebenfalls im Bodenmaterial enthalten ist. Laut der Tabelle 2.17 (Boley, 2012) müsste ein Sand eine Trockendichte zwischen 1,80 und 1,88 g/cm³ mit einem Wassergehalt zwischen 8 und 12 % aufweisen. Dadurch mit den aussagekräftigsten sechs Punkten eine Proctorkurve dargestellt werden konnte und der Versuch nach ÖNORM EN 13286-2:2010 durchgeführt wurde, wurde das Ergebnis für gültig und verwendbar befunden.

Aufgrund der geringen Dichte war es nicht einfach die Proben in die Triaxialzelle zur Bestimmung der Durchlässigkeit einzubauen. Die Ergebnisse der drei Versuche zeigen Schwankungen wie die des Permeametersversuchs auf. Jedoch wurde bei Probekörper 3 leichte Risse in der Probe festgestellt, weshalb diese als Ausreißer klassifiziert wurde. Der Mittelwert der Durchlässigkeit bei einer Temperatur von 10 °C, der verbleibenden Zellen beträgt 1,3 10⁻⁵ m/s. Durch diesen Wert kann der Boden laut ÖNORM B 4422-1:1992 als mitteldurchlässig bezeichnet werden und fällt nach Tabelle 6.1 (Boley, 2012) in den Bereich eines schluffigen, lehmigen Sandes (10⁻⁷ – 10⁻⁴ m/s).

Die bereits gemittelten Ergebnisse des Permeametersversuchs sind in Tab. 20 aufgelistet. Zu erkennen ist dass die Probenserie 1 ($k_{10} = 1,7 \cdot 10^{-5}$ m/s) trotz der geringsten Trockendichte ($\rho_d = 1,33$ g/cm³) sehr gering durchlässig ist, jedoch

nur 31 % von dem Triaxialwert ($k_{10} = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) abweicht. Grund für diese geringe Durchlässigkeit könnten das Ausspülen von Feinteile bzw. Veränderungen des Korngerüsts zufolge der geringen Dichte und der Strömungskraft sein.

Die Probenserie 2 ist im Vergleich mit den anderen Serien am durchlässigsten ($k_{10} = 3,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$). Im Fall der Probenserie 3 ($k_{10} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) ist die Serie 2 doppelt so durchlässig wie Serie 3. Dies könnte durch den umgekehrten Schichtaufbau bedingt sein. Wird dann noch das Ergebnis der Probenserie 4 ($k_{10} = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$) hinzugezogen, liegt dieser Wert ziemlich genau in der Mitte von 2 und 3. Dadurch das Bodenmaterial in den Serien 2, 3 und 4 mit der gleichen Trockendichte von $\rho_d = 1,40 \text{ g/cm}^3$ eingepresst wurde, kann davon ausgegangen werden dass ein Schichtaufbau die Durchlässigkeit der Proben beeinflusst. In Probenserie 2 wurden die erste Sicht mit einer Einbaudichte von $1,75 \text{ g/cm}^3$ und die zweite Schicht mit einer Einbaudichte von $1,58 \text{ g/cm}^3$ eingebaut. Bei Probenserie 3 wurde der Einbauvorgang umgekehrt und zuerst die weniger dichte Schicht eingebaut. Serie 4 hingegen wurde mit nur einer Schicht und einer Einbaudichte von $1,67 \text{ g/cm}^3$ eingebaut, welcher dem Mittelwert der Einbaudichten von Serie 3 und 2 entsprach. Demnach zufolge reduziert sich die Durchlässigkeit wenn zuerst die lockere Schicht und danach die dichtere Schicht durchströmt wird bzw. erhöht sich die Durchlässigkeit wenn zuerst die dichtere Schicht und dann die lockere durchströmt wird. Beim Einbau einer Probe mit der Mittelwertdichte entspricht das Ergebnis dem Mittelwert der beiden anderen.

Auch bei den Ergebnissen von Serie 2 und 3 könnte der Grund das Umlagern von Feinteilen während des Versuchs, sowie die damit verbundene Porenraumverfüllung an der Kontaktfläche sein. Wenn zuerst die $1,58 \text{ g/cm}^3$ Schicht eingebaut wird, verfüllen die ausgewaschenen Feinteile die Porenkanäle der dichteren Schicht und die Durchlässigkeit sinkt (Serie 3). Im umgekehrten Fall (Serie 2) werden die Feinteile möglicherweise nur gering umgelagert, da die wirkende Strömungskraft durch die dichtere Schicht abgemindert wird bzw. werden sie direkt aus der Probe ausgewaschen, woraufhin die Durchlässigkeit steigt. Bei der einheitlich eingepressten Probe (Serie 4) entstand ein Gleichgewicht bzw. kam es kaum zu Auswaschungen weshalb die Durchlässigkeit den Mittelwert annahm.

Alle Versuchsergebnisse fallen jedoch in den oben genannten Bereich eines mitteldurchlässigen schluffigen, lehmigen Sandes.

Da die Ergebnisse des Drucktopfversuchs mit dem Kurvenverlauf der Verdunstungsdaten im Auswertungsprogramm übereinstimmten und die Streuung unter den Proben gering war wurde dieser Messpunkt zur Fixierung des residualen Wassergehalts verwendet.

Das Nichterreichen einer vollständigen Sättigung zu Beginn des Verdunstungsversuchs könnte an der Handhabung der Proben und dem rasch einsetzenden Evaporationsvorgangs liegen. Im Falle der ersten Probenserie dauerte der Aus- und wieder Einbau der Proben am längsten, d.h. es konnte mehr Wasser unkontrolliert verdunsten. Unter anderem wurde diese Probenserie vor dem Einbau in die HYPROP[®]-Töpfe mit einem Tuch abgetrocknet, wobei Wasser durch den Siebboden entzogen wurde. Dies würde für den geringen Sättigungsgrad von 71,8 % sprechen. Alle weiteren Proben wurden rascher aus- bzw. wieder eingebaut und weniger „gründlich“ abgetrocknet.

Beim Vergleich der Wasserretentionskurven in Abb. 38 ist ersichtlich dass sich die Kurven nur hinsichtlich ihres Anfangswassergehaltes unterscheiden. Die berechneten Werte sind in Tab. 20 gegenübergestellt. Durch diese Erkenntnis kann davon ausgegangen werden dass ein Schichtaufbau von zwei gleich dicken Sichten keinen Einfluss auf die Wasserretentionskurve hat. Nach UMS, 2015 liegt dies daran dass die ausgegebenen Messwerte Mittelwerte zwischen den beiden Tensiometer sind und es somit keinen Unterschied macht ob zuerst die dichtere oder lockere Schicht eingebaut wird. Lediglich die Einbaudichte und der daraus resultierende Wassergehalt machen den Unterschied aus.

Erkennbar ist dies im Vergleich zwischen den Serien 2, 3 und 4 denn hier wurde die gleiche Trockendichte, jedoch ein unterschiedlicher Schichtaufbau verwendet. Die Abweichungen der Retentionskurven sind sichtlich gering. Am meisten weicht die Kurve der Serie 1 ab, denn hier wurde eine andere und vor allem geringere Dichte verwendet. Dadurch ist die Porosität n höher und ein möglicher höherer Anfangswassergehalt, bei gleichem Volumen das Resultat.

Trotz der Abweichungen zu Kurvenbeginn verlaufen alle vier Kurven nach der ersten Krümmung auf der gleichen Position und ähneln dem Verhalten von schwach lehmigen Sand (UMS, 2015).

Die Kurven der Durchlässigkeit weichen im Verhältnis zu den Wasserretentionskurven weiter voneinander ab. Als Grund könnte der Eingabeparameter K_s genannt werden da dieser von einem andern Versuch (Permeameter) übernommen wurde. Bei der Serie 2 in Abb. 28 weicht die Fittingkurve aufgrund des Eingabeparameter K_s am meisten von den Serienmesswerten ab. Diese Abweichung zeigt sich auch in Abb. 40. Der Kurvenbeginn wurde eben durch besagten K_s – Wert festgelegt weil die Tensiometer erst unter einem Sättigungsgrad von 25 % verwendbare Daten ausgeben konnten. Bei den anderen Probenserien passt der berechnete Durchlässigkeitskoeffizient gut mit den Messwerten zusammen.

In Abb. 41 wurden alle Messwerte ohne Fittingkurven zusammengefasst und abgebildet. Die meiste Streuung ist in einem Sättigungsbereich zwischen 18 und 23 % zu erkennen. Dies entspricht jenem Wert ab dem es den Tensiometer möglich ist Messpunkte zu berechnen (Trennung der Tensionskurven). Mit abnehmendem Sättigungsgrad liegen die Punkte näher bei einander.

Dieser Durchlässigkeitsbereich liegt zwischen $5 \cdot 10^{-8}$ und 10^{-10} m/s. Ohne den zuvor ermittelten K_s – Wert wäre es nicht möglich einen Verlauf der Durchlässigkeit bis zu einem Wert von 10^{-5} m/s aufzuzeichnen da das Programm bereits bei 10^{-7} m/s den K_s – Wert festlegen würde.

Vergleicht man die Messwerte der Serien 2, 3 und 4 (Rot, Grün und Schwarz) verlaufen diese auf gleicher Position. Dies würde wiederum dafür sprechen dass nur die Dichte jedoch nicht der Schichtaufbau entscheidend ist.

Jedoch ist abzuschätzen wie aussagekräftig diese Durchlässigkeitsergebnisse mittels HYPROP[®] sind, weil sie erst bei sehr geringem Sättigungsgrad aufgezeichnet werden können, der Anfangsbereich sehr fehleranfällig ist und ein K_s -Parameter vorgegeben werden sollte.

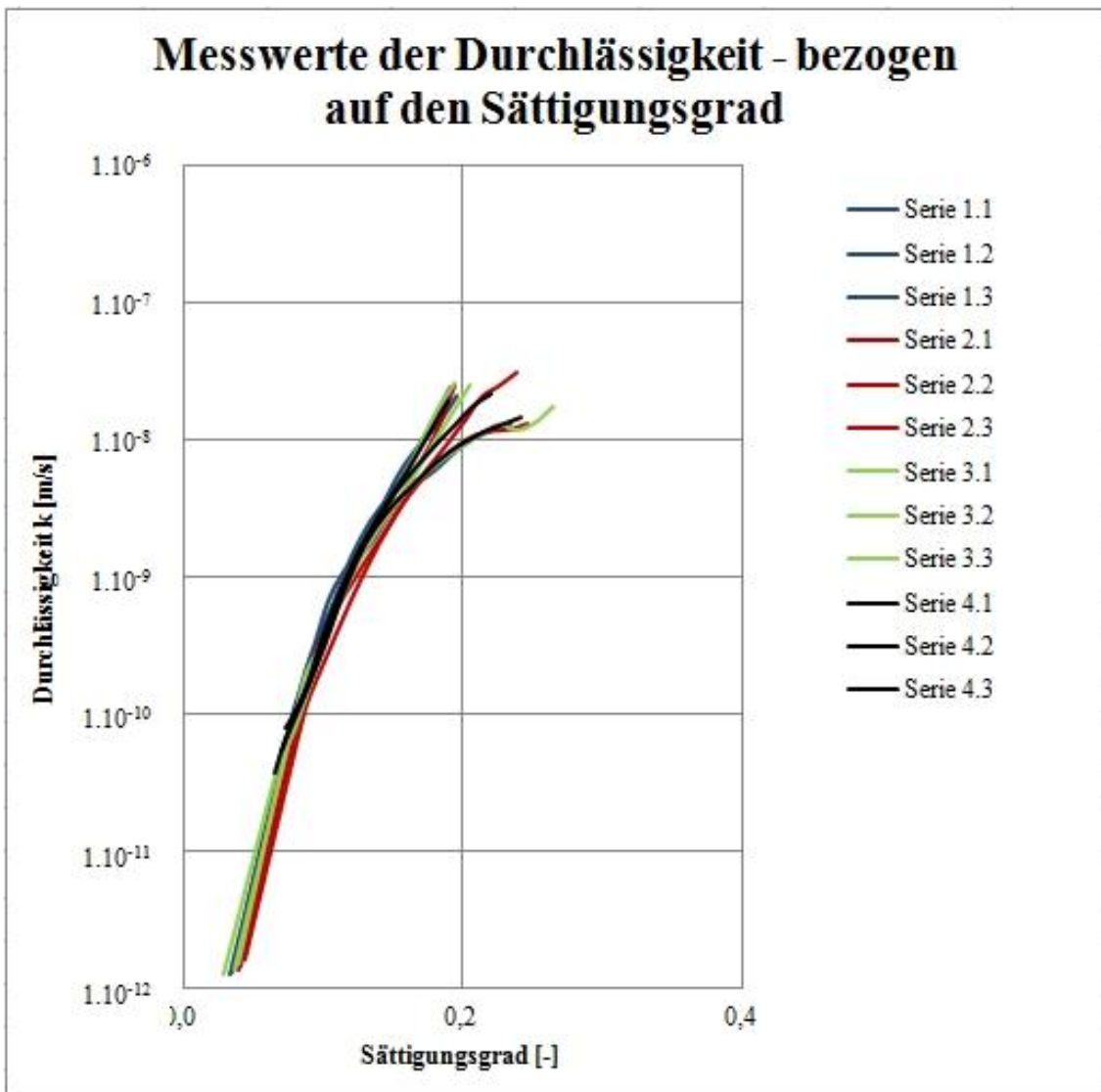


Abb. 41: Gegenüberstellung Messwerte der Durchlässigkeit

6 Fazit

6.1 Persönliche Sichtweise

Die Indexversuche wurden nach der jeweiligen Norm durchgeführt und mit Erfahrungswerten auf Plausibilität geprüft. Die drei Versuche ließen sich schnell und problemlos durchführen und die geringe Streuung bei der Korndichtebestimmung ist auf eine genaue Arbeitsweise zurückzuführen.

Bei der Bestimmung der Durchlässigkeit mittels Triaxialzelle wurde eine für dieses Material zu geringe Trockendichte verwendet. Besser gewesen wäre die Probenkörper mit der aus dem Proctorversuch ermittelten Trockendicht ρ_{PT} herzustellen. Durch die höhere Dichte ist der Probekörper stabiler, es werden somit auch weniger Risse gebildet und die Streuung womöglich verringert.

Bei dem Permeameterversuch würde ich empfehlen die Messung über eine länger Zeitspanne, Aufzeichnung alle 30 Minuten durchzuführen um die Streuungen zu verringern. Unter anderem sollten auch die verwendeten Dichten erhöht werden um das Auswaschen von Feinteilen vermindern zu können. Durch eine höhere Dichte würde auch die Handhabung der Proben erleichtert werden.

Wenn Permeameterproben nach dem Versuch als Verdunstungsproben weiterverwendet werden sollen, dann wäre es von Vorteil diese bis zum Einbau in die HYPROP® - Töpfe in einem Wasserbad zu lagern. Dieser Schritt wurde während der Masterarbeit nicht gemacht und somit auch kein Sättigungsgrad von 100 % erreicht, da der Boden schnell an Wasser verlor. Des Weiteren ist zu beachten dass durch die Eingabe der Trockenmasse in die HYPROP-FIT® Software der korrekte Anfangswassergehalt, die passende Trockendichte und Porosität berechnet wird.

Die Auswertung der Wasserretentionskurven zeigte dass es keinen Unterschied zwischen einem einschichtigen oder zweischichtigen Aufbau gibt. Auch die Schichtreihenfolge zeigt keine signifikanten Unterschiede. Entscheidend hierbei ist nur die Einbaudichte welche den Anfangswassergehalt limitiert. Gezeigt wurde dies durch die Ergebnisse und dem Verlauf der vierten Probenserie.

Betrachtet man nur die Messwerte der Durchlässigkeitskurven des Verdunstungsversuchs kann man in einem Sättigungsbereich unter 20 % kaum einen Unterschied zwischen den Werten feststellen. Auch wenn ein gesättigter Durchlässigkeitskoeffizient K_s durch einen anderen Versuch wie z.B. Permeameter bestimmt wurde, würde ich diesen als Parameter für die Fittingkurve einfließen lassen um den gesamten Verlauf der Durchlässigkeitskurve darstellen zu können.

6.2 Hinweise für zukünftige Forschung

In Zukunft wäre für mich interessant ob meine Theorie, dass beim Verdunstungsversuch nur die Dichte und nicht der Schichtaufbau ausschlaggebend ist, auch bei einer Probe mit beispielsweise drei Schichten oder unterschiedlich dicken Schichten zutrifft.

Auch der Vergleich zwischen Permeameter und Triaxialzelle mit erhöhter Dichte (mind. Proctordichte) wäre interessant um den Einfluss des hydraulischen Gradienten i zu ermitteln. Anschließend könnte untersucht werden mit welchem der beiden Verfahren die Messdaten des Verdunstungsversuchs besser korrelieren bzw. von der Fittingkurve genauer nachgebildet werden.

Ebenfalls kann es Sinn ergeben das gewählte Material mit anderen Berechnungsmodellen als das Van Genuchten - Mualem Modell zu prüfen und die Ergebnisse zu vergleichen.

Ich denke der Forschung im Bereich des teilgesättigten Bodens stehen viele Möglichkeiten offen und ich wünsche jedem ambitionierten Forscher viel Erfolg und Freude an seinem Tun.

Literaturverzeichnis

Amann, P., Huder, J., Lang, H.J., Puzrin, A.M. (2011)

Bodenmechanik und Grundbau – Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, 9., bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Boley, C. (Hrsg.) (2012)

Handbuch 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

Kolymbas, D. (2011)

Geotechnik – Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau, 3., neu bearbeitete Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Mualem, Y. (June 1976)

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

ÖNORM B 4400-1:2010

ÖNORM B 4400-1 (2010-03-15), Geotechnik - Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden, Österreichisches Normeninstitut, Wien

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 933-1:2012

ÖNORM EN 933-1 (2012-03-01), Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren, Österreichisches Normeninstitut, Wien

ÖNORM EN 13286-2:2010

ÖNORM EN 13286-2 (2012-10-01), Ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische – Teil 2: Laborprüfverfahren zur Bestimmung der Referenz – Trockendichte und des Wassergehalts – 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 Böden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen – Änderungen 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 (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 1065 (2006-12-01), Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der hydraulischen Leitfähigkeit in gesättigten Stechzylinderproben, Österreichisches Normeninstitut, Wien

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

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

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

Wit, K.E. (1963)

Meting van de doorlatendheid in ongeroerde monsters. Rapport 17. ICW, Wageningen

Vanapalli S.K., Sillers W.S. and Fredlund M.D. (October 1998)

51st Canadian Geotechnical Conference, Edmonton, Alberta – The meaning and Relevance of Residual State to Unsaturated Soils, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canada, S7N 5A9

Anhang

Der folgende Anhang wurde in zwei Bereiche unterteilt.

Bereich A beinhaltet die Ergebnisse und Protokolle der Indexversuche und Bereich B beinhaltet die Ergebnisse und Protokolle der Versuche für die Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften des Bodenmaterials.

Anhang A - Indexversuche

- **Anhang A beinhaltet folgendes:**

A1 Kornverteilungskurve

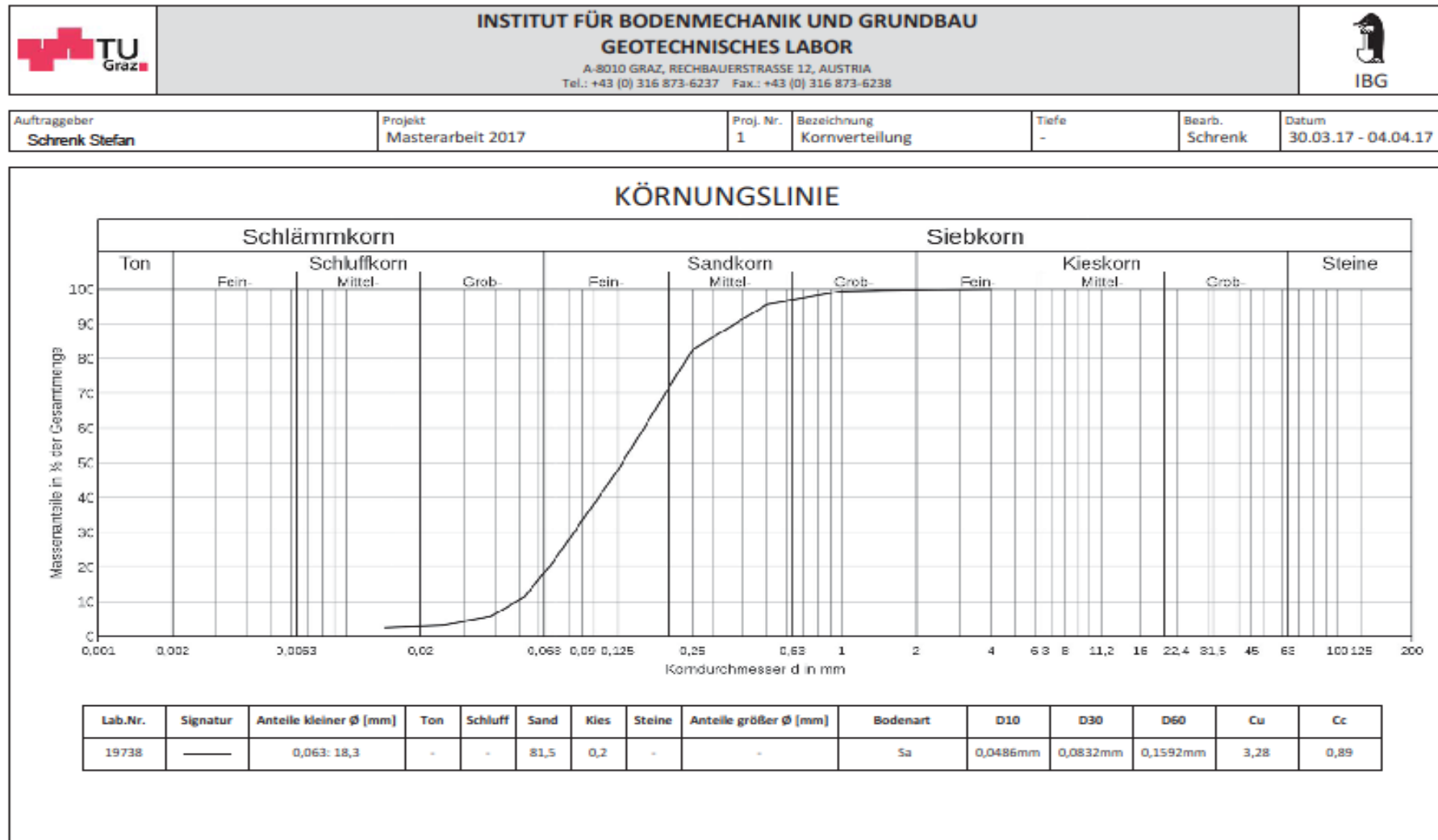
A2 Protokoll Kornverteilung

A3 Protokoll Korndichte


A4 Proctorkurve

A5 Protokoll Proctorkurve

A1 Kornverteilungskurve:



A2 Protokoll Kornverteilung

	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: Schrenk Stefan	BEZEICHNUNG: Bodenart: si Sa	LABORNUMMER: 19738
PROJEKT: Masterarbeit 2017	BEARBEITER: Schrenk	AUFTRAGSNUMMER
		DATUM: 04.04.2017

Kornverteilung

Siebanalyse		
Maschenweite	Rückstand	Σ Rückstand
[g]	[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	
Druck 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		

A3 Protokoll Korndichte:

	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: Schrenk Stefan	BEZEICHNUNG:	LABORNUMMER: 19738
PROJEKT: Masterarbeit 2017	TIEFE:	AUFTRAGSNUMMER
	BEARBEITER: Schrenk	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:

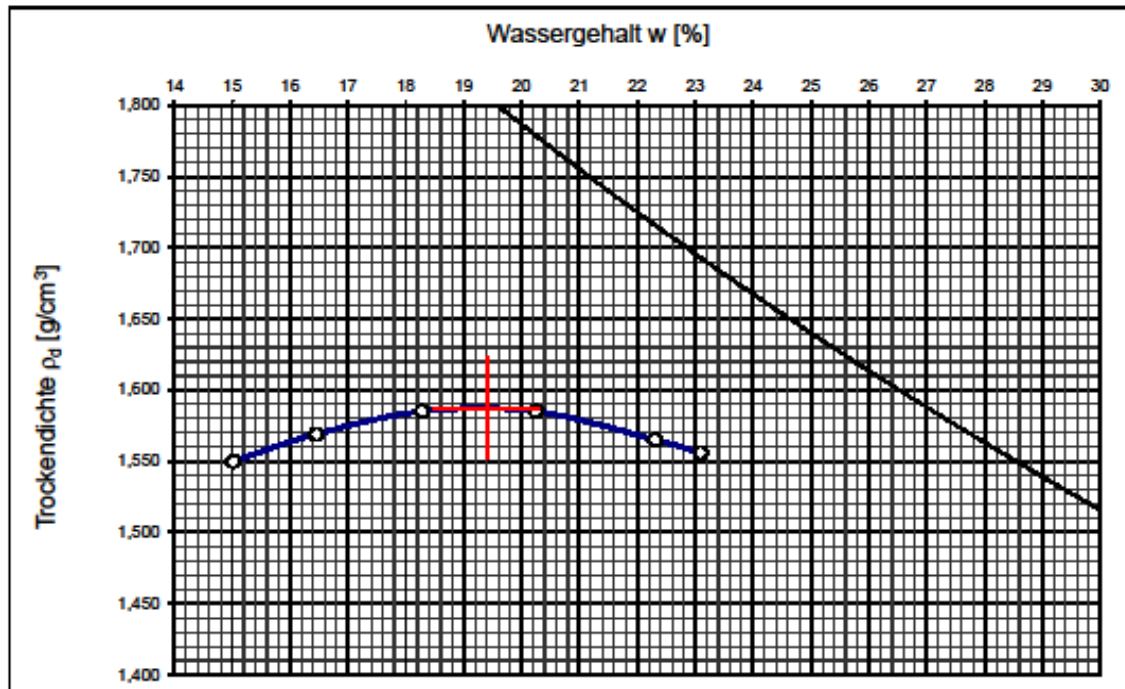
A4 Proctorkurve:

	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: Schrenk Stefan	BEZEICHNUNG:	LABORNUMMER: 19738
	PROJEKT: Masterarbeit 2017	BODENART: si Sa
	BEARBEITER: Schrenk	DATUM: 06.04..2017

PROCTOR-VERSUCH



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



ERGEBNIS		
w_{Pr}	%	19,40
ρ_{Pr}	g/cm ³	1,59

ANMERKUNG:

A5 Protokoll Proctorkurve:

	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: Schrenk Stefan	BEZEICHNUNG:	LABORNUMMER: 19738
	PROJEKT: Masterarbeit 2017	TIEFE:
	BEARBEITER: Schrenk	DATUM: 08.04.2017

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	638,1	490,5
2	Probe trocken + Behälter	md + mB	g		378,7	646	442,3	434,3	553,3	415,9
3	Masse Behälter	mB	g		129,8	190,6	120,6	119,8	173,2	93,2
4	Masse Probe feucht	mf	g	1-3	286,3	530,3	380,5	378,2	464,9	397,3
5	Masse Probe trocken	md	g	2-3	248,9	455,4	321,7	314,5	380,1	322,7
6	Masse Wasser	mW	g	4-5	37,4	74,9	58,8	63,7	84,8	74,6
7	Wassergehalt	W	%	6:5	15,026	16,447	18,278	20,254	22,31	23,1
8	Masse Zylinder + Probe feucht	mZ + mf	g		11841	11883	11928	11957	11965	11966
9	Masse Zylinder	mZ	g		10161	10161	10161	10161	10161	10161
10	Masse Probe feucht	mf	g	8-9	1680,0	1722,0	1767,0	1796,0	1804,0	1805,0
11	Volumen Zylinder	VZ	cm ³		942,48	942,48	942,48	942,48	942,48	942,48
12	Dichte der Probe	p	g/cm ³	10:11	1,783	1,827	1,875	1,906	1,914	1,915
13	Dichte der trockenen Probe	p	g/cm ³	12:(1+w)	1,550	1,569	1,585	1,585	1,565	1,556

ANMERKUNG:

Anhang B – Hydraulische Eigenschaften

- **Anhang B beinhalte folgendes:**

B1 Protokolle Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle

B2 Protokolle Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter

B3 Protokoll Drucktopfmethode

B4 Protokolle Verdunstungsversuch HYPROP®

B1 Protokolle Durchlässigkeitsbestimmung mittels Triaxialzelle:

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 1:
Durchlässigkeitsversuch mittels Triaxialzelle

Schrenk Stefan

Zellen Nr.:	01	Datum:	02.08.2017							
Bearbeiter:	Schrenk	Labornummer:	-							
Durchmesser D:	10 cm	Länge Probe L:	12 cm	Einbaumasse:	1495,5 g					
Fläche A:	78,54 cm ²	Volumen V:	942,48 cm ³	Einbaudichte:	1,59 g/cm ³					
Beginn Datum		02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug
Beginn Zeit t ₁		10:30	10:35	10:40	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20
Temperatur δ ₁	[°C]	24,7	24,7	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	25,0
Ende Datum		02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug
Ende Zeit t ₂		10:35	10:40	10:45	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25
Temperatur δ ₂	[°C]	24,7	24,7	24,8	24,8	24,8	24,8	24,8	25	25
Versuchsdauer t	[sec]	300	300	300	300	300	360	300	300	300
Messglas Beginn m ₁	[g]	106,3	105,5	106,1	106,2	105,8	106,3	105,4	106,3	105,5
Messglas Ende m ₂	[g]	457,4	442,8	426,6	563,2	480,2	579,6	500,5	500,3	459,8
Wassermenge Q	[cm ³]	351,1	337,3	320,5	457,0	374,4	473,3	395,1	394,0	354,3
Höhendifferenz Δh	[cm]	96	96	96	96	96	96	96	96	96
Hydraul. Gefälle i		1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Durchlässigkeit k _δ	[m/s]	1,9E-05	1,8E-05	1,7E-05	2,4E-05	2,0E-05	2,1E-05	2,1E-05	2,1E-05	1,9E-05
Durchlässigkeit k ₁₀	[m/s]	1,3E-05	1,2E-05	1,2E-05	1,7E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,4E-05	1,3E-05
$k_{\delta} = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h \times t \times 100}$							k _δ	<u>2,0E-05</u>	m/s	
							k ₁₀	<u>1,4E-05</u>	m/s	
$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 * \delta + 0,00022 * \delta^2} \times k_{\delta}$							k _δ	<u>1,8</u>	m/d	
							k ₁₀	<u>1,2</u>	m/d	

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 1:
Durchlässigkeitsversuch mittels Triaxialzelle

Schrenk Stefan

Zellen Nr.:	02	Datum:	02.08.2017							
Bearbeiter:	Schrenk	Labornummer:	-							
Durchmesser D:	10 cm	Länge Probe L:	12 cm	Einbaumasse:	1499,4 g					
Fläche A:	78,54 cm ²	Volumen V:	942,48 cm ³	Einbaudichte:	1,59 g/cm ³					
Beginn Datum		02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug
Beginn Zeit t ₁		09:15	09:20	09:25	09:30	09:35	09:50	09:55	10:00	10:05
Temperatur δ ₁	[°C]	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,5	24,5	24,5	24,5
Ende Datum		02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug
Ende Zeit t ₂		09:20	09:25	09:30	09:35	09:40	09:55	10:00	10:05	10:10
Temperatur δ ₂	[°C]	24,3	24,3	24,3	24,3	24,3	24,5	24,5	24,5	24,5
Vesuchsdauer t	[sec]	300	300	300	300	300	300	240	300	300
Messglas Beginn m ₁	[g]	105,0	105,6	105,9	106	105,6	106,4	106,3	105,3	105,4
Messglas Ende m ₂	[g]	452,0	456,6	441,5	438	430,4	469,4	384,9	436,8	429
Wassermenge Q	[cm ³]	347,0	351,0	335,6	332,0	324,8	363,0	278,6	331,5	323,6
Höhendifferenz Δh	[cm]	96	96	96	96	96	96	96	96	96
Hydraul. Gefälle i		1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Durchlässigkeit k _δ	[m/s]	1,8E-05	1,9E-05	1,8E-05	1,8E-05	1,7E-05	1,9E-05	1,8E-05	1,8E-05	1,7E-05
Durchlässigkeit k ₁₀	[m/s]	1,3E-05	1,3E-05	1,2E-05	1,2E-05	1,2E-05	1,3E-05	1,3E-05	1,2E-05	1,2E-05
$k_{\delta} = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h \times t \times 100}$								k _δ	1,8E-05	m/s
								k ₁₀	1,2E-05	m/s
$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 * \delta + 0,00022 * \delta^2} \times k_{\delta}$								k _δ	1,6	m/d
								k ₁₀	1,1	m/d

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 1:
Durchlässigkeitsversuch mittels Triaxialzelle

Schrenk Stefan

Zellen Nr.:	03	Datum:	02.08.2017			
Bearbeiter:	Schrenk	Labornummer:	-			
Durchmesser D:	10 cm	Länge Probe L:	12 cm	Einbaumasse:	1497,4 g	
Fläche A:	78,54 cm ²	Volumen V:	942,48 cm ³	Einbaudichte:	1,59 g/cm ³	
Beginn Datum		02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug
Beginn Zeit t ₁		11:35	11:40	11:45	11:49	11:54
Temperatur δ ₁	[°C]	25,1	25,1	25,1	25,2	25,2
Ende Datum		02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug	02. Aug
Ende Zeit t ₂		11:40	11:45	11:49	11:54	11:59
Temperatur δ ₂	[°C]	25,1	25,1	25,2	25,2	25,2
Versuchsdauer t	[sec]	270	300	240	300	300
Messglas Beginn m ₁	[g]	106,6	106	106,2	105,5	106,2
Messglas Ende m ₂	[g]	695,1	713,9	632,2	699,9	710
Wassermenge Q	[cm ³]	588,5	607,9	526,0	594,4	603,8
Höhendifferenz Δh	[cm]	96	96	96	96	96
Hydraul. Gefälle i	1	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Durchlässigkeit k _δ	[m/s]	3,5E-05	3,2E-05	3,5E-05	3,2E-05	3,2E-05
Durchlässigkeit k ₁₀	[m/s]	2,4E-05	2,2E-05	2,4E-05	2,2E-05	2,2E-05

k _δ	3,3E-05	m/s
k ₁₀	2,3E-05	m/s

k _δ	2,9	m/d
k ₁₀	2,0	m/d

$$k_{\delta} = \frac{Q \times L}{A \times \Delta h \times t \times 100}$$

$$k_{10} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 * \delta + 0,00022 * \delta^2} \times k_{\delta}$$

B2 Protokolle Durchlässigkeitsbestimmung mittels Permeameter:

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 1:
Permeameter Versuch

Schrenk Stefan

Messdatum:	04.05.2017	Start:	14:30 Uhr				
Bearbeiter:	Stefan Schrenk	Temperatur:	22,8 [°C]				
Einbaudatum:	02.05.2017 zuvor jedoch wurde die Probe aufgesättigt						
<u>Messprotokoll:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Volumen	Pegel innen	Pegel außen	dh	Messzeit	Durchflussmenge
		[cm ³]	[cm]	[cm]	[cm]	[sec]	[ml]
19	21	250	6,00	5,80	0,20	606	4
18	23	250	6,65	5,80	0,85	468	10
16	24	250	6,60	5,80	0,80	704	10
<u>Berechnung mit konstantem Höhenunterschied:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Fläche	dh	Volumen V	Länge Probe	Messzeit	k _{22,8°C}
		[cm ²]	[cm]	[ml]	[cm]	[sec]	[cm/s]
19	21	50	0,20	4	4,7	606	0,0031
18	23	50	0,85	10	4,7	468	0,0024
16	24	50	0,80	10	4,7	704	0,0017
<u>Ergebnisse:</u>							
Durchlässigkeit k _{22,8°C}				Durchlässigkeit k _{10°C}			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	k _{22,8°C}	k _{22,8°C}	k _{10°C}	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]	[m/s]	h _T	0,94 [mPa*s]	
19	21	3,1E-03	3,1E-05	2,2E-05	h ₁₀	1,30 [mPa*s]	
18	23	2,4E-03	2,4E-05	1,7E-05			
16	24	1,7E-03	1,7E-05	1,2E-05			

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 2:
Permeameter Versuch

Schrenk Stefan

Messdatum:	18.05.2017	Start:	09:50 Uhr				
Bearbeiter:	Stefan Schrenk	Temperatur:	23,7	[°C]			
Einbaudatum:	12.05.2017						
<u>Messprotokoll:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Volumen [cm ³]	Pegel innen [cm]	Pegel außen [cm]	dh [cm]	Messzeit [sec]	Durchflussmenge [ml]
7	2	250	6,35	6,00	0,35	871	14,3
8	3	250	6,50	6,00	0,50	826	20,7
9	4	250	6,55	6,00	0,55	391	10,0
<u>Berechnung mit konstantem Höhenunterschied:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Fläche [cm ²]	dh [cm]	Volumen V [ml]	Länge Probe [cm]	Messzeit [sec]	k _{23,7°C} [cm/s]
7	2	50	0,35	14,30	5	871	0,0047
8	3	50	0,50	20,70	5	826	0,0050
9	4	50	0,55	10,00	5	391	0,0047
<u>Ergebnisse:</u>							
Durchlässigkeit k _{23,7°C}				Durchlässigkeit k _{10°C}			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	k _{23,7°C} [cm/s]	k _{23,7°C} [m/s]	k _{10°C} [m/s]	Temperaturkorrektur		
					h _T	0,92	[mPa*s]
7	2	4,7E-03	4,7E-05	3,3E-05	h ₁₀	1,30	[mPa*s]
8	3	5,0E-03	5,0E-05	3,5E-05			
9	4	4,7E-03	4,7E-05	3,3E-05			

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 3:
Permeameter Versuch

Schrenk Stefan

Messdatum:	26.06.2017	Start:	15:45 Uhr				
Bearbeiter:	Stefan Schrenk	Temperatur:	25,7 [°C]				
Einbaudatum:	21.06.2017						
<u>Messprotokoll:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Volumen	Pegel innen	Pegel außen	dh	Messzeit	Durchflussmenge
		[cm ³]	[cm]	[cm]	[cm]	[sec]	[ml]
7	21	250	6,25	6,05	0,20	3600	17,4
9	23	250	6,15	6,05	0,10	3600	8,1
10	24	250	6,25	6,00	0,25	5400	32,0
<u>Berechnung mit konstantem Höhenunterschied:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Fläche	dh	Volumen V	Länge Probe	Messzeit	k _{25,7°C}
		[cm ²]	[cm]	[ml]	[cm]	[sec]	[cm/s]
7	21	50	0,20	17,40	5	3600	0,00242
9	23	50	0,10	8,10	5	3600	0,00225
10	24	50	0,25	32,00	5	5400	0,00237
<u>Ergebnisse:</u>							
Durchlässigkeit k_{22,8°C}				Durchlässigkeit k_{10°C}			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	k _{25,7°C}	k _{25,7°C}	k _{10°C}	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]	[m/s]	h _T	0,88	[mPa*s]
7	21	2,4E-03	2,4E-05	1,6E-05	h ₁₀	1,30	[mPa*s]
9	23	2,2E-03	2,2E-05	1,5E-05			
10	24	2,4E-03	2,4E-05	1,6E-05			

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 4:
Permeameter Versuch

Schrenk Stefan

Messdatum:	13.07.2017	Start:	13:30 Uhr				
Bearbeiter:	Stefan Schrenk	Temperatur:	26,1 [°C]				
Einbaudatum:	07.07.2017						
<u>Messprotokoll:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Volumen	Pegel innen	Pegel außen	dh	Messzeit	Durchflussmenge
		[cm ³]	[cm]	[cm]	[cm]	[sec]	[ml]
16	6	250	6,40	6,15	0,25	2700	22,8
17	7	250	6,40	6,15	0,25	2700	23,7
18	9	250	6,60	6,15	0,45	2700	43
<u>Berechnung mit konstantem Höhenunterschied:</u>							
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	STZ Fläche	dh	Volumen V	Länge Probe	Messzeit	k _{22,8°C}
		[cm ²]	[cm]	[ml]	[cm]	[sec]	[cm/s]
16	6	50	0,25	22,80	5	2700	0,00338
17	7	50	0,25	23,70	5	2700	0,00351
18	9	50	0,45	43,00	5	2700	0,00354
<u>Ergebnisse:</u>							
Durchlässigkeit k _{22,8°C}				Durchlässigkeit k _{10°C}			
Permeameter Nr.:	STZ Nr.:	k _{26,1°C}	k _{26,1°C}	k _{10°C}	Temperaturkorrektur		
		[cm/s]	[m/s]	[m/s]	h _T	0,87	[mPa*s]
16	6	3,4E-03	3,4E-05	2,3E-05	h ₁₀	1,30	[mPa*s]
17	7	3,5E-03	3,5E-05	2,3E-05			
18	9	3,5E-03	3,5E-05	2,4E-05			

B3 Protokoll Drucktopfmethode:

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 1:
Drucktopfmethode

Schrenk Stefan

Ergebnisse der Drucktopfmethode:							
Druckstufe 15 bar:		Volumen:		22,06 cm ³		Datum: 06.07.2017	
Ring Nr.:	Gesamtmasse feucht	Masse Probe feucht	Masse Schale	Masse Ring	Gesamtmasse trocken	Masse Probe trocken	Wassergehalt
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[Vol.%]
18a	188,10	29,78	145,62	12,20	187,55	29,23	2,49
19a	185,50	29,65	143,05	12,30	184,95	29,10	2,49
20a	183,29	29,76	140,83	12,20	182,71	29,18	2,63
18b	184,25	29,83	141,62	12,30	183,67	29,25	2,63
19b	182,75	29,80	140,15	12,30	182,18	29,23	2,58
20b	187,76	29,74	145,22	12,30	187,15	29,13	2,76
Ringradius:		5,3 cm		Masse Tuch:		0,5 g	
Ringhöhe		1,0 cm					
<u>Ergebnisse:</u>							
Ring Nr.:	Druckstufe	Masse Wasser	Wassergehalt	Wassergehalt			
	[kPa]	[g]	[Vol.%]	[M-%]			
20a	1.500	0,58	2,63	1,99			
18b	1.500	0,58	2,63	1,98			
19b	1.500	0,57	2,58	1,95			
20b	1.500	0,61	2,76	2,09			
Ergebnis 15 bar (pF 4,2)			2,65	[Vol.%]			

B4 Protokolle Verdunstungsversuch HYPROP®:

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 1:
Homogene Bodenproben

Schrenk Stefan

Probenserie 1: Auswertung der homogenen Bodenproben										
<u>Messprotokoll:</u>										
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	27.04.2017	05.05.2017			15.05.2017		16.05.2017	
			Masse Probe (inkl. STZ) [g]	Masse STZ [g]	Masse Hyprop [g]	Masse Hyprop Start [g]	Schalen Nr.:	Masse Schale [g]	Schale + Probe feucht [g]	Schale + Probe trocken [g]
19	32	21	600,9	206,2	368,4	995,5	10	187,4	724,2	723,7
18	33	23	602,0	207,7	369,3	1002,1	11	189,3	727,4	726,9
16	21	24	597,9	202,7	366,5	994,9	12	186,1	720,8	720,2
<u>Übersichtsberechnungen:</u>			Vol. STZ= 250 cm ³			Verlustvolumen = 1 cm ³				
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	Masse Probe [g]	Dichte bei Einbau [g/cm ³]	Mass Probe gesättigt [g]	Trockenmasse [g]	Masse Wasser Hyprop [g]	Wassergehalt Hyprop [M-%]	Porosität n [%]	Sättigungsgrad [%]
19	32	21	394,6	1,58	420,9	330,0	90,8	27,5	52,3	69,7
18	33	23	394,3	1,58	425,1	329,9	95,3	28,9	52,3	73,1
16	21	24	395,2	1,58	425,7	331,4	94,4	28,5	52,1	72,7
<u>Ergebniszusammenfassung:</u>										
STZ Nr.:	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol.-%]	Porosität n [%]	Porenzahl e [-]	Trockenmasse [g]	Einbaudichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Sättigungsgrad [%]		
21	27,5	36,5	52,3	1,1	330,0	1,58	1,33	69,7		
23	28,9	38,3	52,3	1,1	329,9	1,58	1,32	73,1		
24	28,5	37,9	52,1	1,1	331,4	1,58	1,33	72,7		
Endergebnisse Serie 1:	28,3	37,5	52,3	1,1	330,4	1,58	1,33	71,8		
$n = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s \cdot V}\right) \cdot 100 \quad [\%] \qquad e = \frac{V \cdot \rho_s}{m_d} - 1 \quad [-] \qquad S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad [-]$										

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 2:
Bodenproben 1,75 g/cm³ und 1,59 g/cm³

Schrenk Stefan

Probenserie 2: Auswertung der Bodenproben 1,75 g/cm³ und 1,59 g/cm³										
<u>Messprotokoll:</u>										
			12.05.2017	18.05.2017			30.05.2017			31.05.2017
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	Masse Probe (inkl. STZ) [g]	Masse STZ [g]	Masse Hyprop [g]	Masse Hyprop Start [g]	Schalen Nr.:	Masse Schale [g]	Schale + Probe feucht [g]	Schale + Probe trocken [g]
7	33	2	621,3	204,3	369,4	1028,8	10	187,4	742,6	742,0
8	32	3	621,7	205,3	368,3	1027,9	11	189,3	745,4	744,8
9	21	4	619,2	203,5	366,5	1023,0	12	186,1	738,8	738,2
<u>Übersichtsberechnungen:</u>			Vol. STZ=	250 cm ³	Verlustvolumen =			1 cm ³		
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	Masse Probe [g]	Dichte bei Einbau [g/cm ³]	Mass Probe gesättigt [g]	Trockenmasse [g]	Masse Wasser Hyprop [g]	Wassergehalt Hyprop [M-%]	Porosität n [%]	Sättigungsgrad [%]
7	33	2	417,0	1,67	455,0	350,3	104,8	29,9	49,4	85,2
8	32	3	416,4	1,67	454,3	350,2	104,1	29,7	49,4	84,6
9	21	4	415,7	1,66	453,0	348,6	104,4	29,9	49,6	84,4
<u>Ergebniszusammenfassung:</u>										
STZ Nr.:	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol-%]	Porosität n [%]	Porenzahl e [-]	Trockenmasse [g]	Einbaudichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Sättigungsgrad [%]		
2	29,9	42,1	49,4	1,0	350,3	1,67	1,41	85,2		
3	29,7	41,8	49,4	1,0	350,2	1,67	1,41	84,6		
4	29,9	41,9	49,6	1,0	348,6	1,66	1,40	84,4		
Endergebnisse Serie 2:	29,9	41,9	49,5	1,0	349,7	1,67	1,40	84,7		
$n = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s \cdot V}\right) \cdot 100 \quad [\%] \qquad e = \frac{V \cdot \rho_s}{m_d} - 1 \quad [-] \qquad S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad [-]$										

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 3:
Bodenproben 1,59 g/cm³ und 1,75 g/cm³

Schrenk Stefan

Probenserie 3: Auswertung der Bodenproben 1,59 g/cm³ und 1,75 g/cm³										
<u>Messprotokoll:</u>										
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	21.06.2017	27.06.2017			07.07.2017			
			Masse Probe (inkl. STZ) [g]	Masse STZ [g]	Masse Hyprop [g]	Masse Hyprop Start [g]	Schalen Nr.:	Masse Schale [g]	Schale + Probe feucht [g]	Schale + Probe trocken [g]
7	32	21	623,0	206,3	368,8	1022,2	19	188,8	743,3	742,9
9	21	23	619,1	207,6	366,8	1022,0	20	181,3	736,4	736,0
10	33	24	619,1	202,8	369,5	1021,6	21	186,1	737,2	736,8
<u>Übersichtsberechnungen:</u>										
			Vol. STZ=		250 cm ³		Verlustvolumen =		1 cm ³	
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	Masse Probe [g]	Dichte bei Einbau [g/cm ³]	Mass Probe gesättigt [g]	Trockenmasse [g]	Masse Wasser Hyprop [g]	Wassergehalt Hyprop [M-%]	Porosität n [%]	Sättigungsgrad [%]
7	32	21	416,7	1,67	447,1	347,9	99,2	28,5	49,7	80,1
9	21	23	411,5	1,65	447,7	347,1	100,5	29,0	49,9	81,0
10	33	24	416,3	1,67	449,3	347,8	101,5	29,2	49,8	81,9
<u>Ergebniszusammenfassung:</u>										
STZ Nr.:	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol-%]	Porosität n [%]	Porenzahl e [-]	Trockenmasse [g]	Einbaudichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Sättigungsgrad [%]		
21	28,5	39,9	49,7	1,0	347,9	1,67	1,40	80,1		
23	29,0	40,4	49,9	1,0	347,1	1,65	1,39	81,0		
24	29,2	40,8	49,8	1,0	347,8	1,67	1,40	81,9		
<u>Endergebnisse Serie 3:</u>			28,9	40,3	49,8	1,0	347,6	1,66	1,40	81,0
$n = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s \cdot V}\right) \cdot 100 \quad [\%] \qquad e = \frac{V \cdot \rho_s}{m_d} - 1 \quad [-] \qquad S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad [-]$										

Masterarbeit 2017

Auswertung Probenserie 4:
Bodenproben 1,67 g/cm³

Schrenk Stefan

Probenserie 4: Auswertung der Bodenproben 1,67 g/cm³										
<u>Messprotokoll:</u>										
			07.07.2017	14.07.2017			20.07.2017			24.07.2017
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	Masse Probe (inkl. STZ) [g]	Masse STZ [g]	Masse Hyprop [g]	Masse Hyprop Start [g]	Schalen Nr.:	Masse Schale [g]	Schale + Probe feucht [g]	Schale + Probe trocken [g]
16	21	6	620,1	204,2	367,1	1022,5	19	188,8	745,9	740,3
17	32	7	620,6	204,1	368,6	1023,1	20	181,3	737,6	733,4
18	33	9	621,1	204,3	369,7	1025,1	21	186,1	741,6	737,9
<u>Übersichtsberechnungen:</u>			Vol. STZ=	250 cm ³	Verlustvolumen =			1 cm ³		
Permeameter Nr.:	Hyprop Nr.:	STZ Nr.:	Masse Probe [g]	Dichte bei Einbau [g/cm ³]	Mass Probe gesättigt [g]	Trockenmasse [g]	Masse Wasser Hyprop [g]	Wassergehalt Hyprop [M-%]	Porosität n [%]	Sättigungsgrad [%]
16	21	6	415,9	1,66	451,2	347,3	103,9	29,9	49,8	83,7
17	32	7	416,5	1,67	450,4	348,1	102,3	29,4	49,7	82,7
18	33	9	416,8	1,67	451,0	347,5	103,6	29,8	49,8	83,5
<u>Ergebniszusammenfassung:</u>										
STZ Nr.:	Wassergehalt [M-%]	Wassergehalt [Vol-%]	Porosität n [%]	Porenzahl e [-]	Trockenmasse [g]	Einbaudichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Sättigungsgrad [%]		
6	29,9	41,7	49,8	1,0	347,3	1,66	1,39	83,7		
7	29,4	41,1	49,7	1,0	348,1	1,67	1,40	82,7		
9	29,8	41,6	49,8	1,0	347,5	1,67	1,40	83,5		
Endergebnisse Serie 4:	29,7	41,5	49,8	1,0	347,6	1,67	1,40	83,3		
			$n = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s \cdot V}\right) \cdot 100$ [%]				$e = \frac{V \cdot \rho_s}{m_d} - 1$ [-]			
									$S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e + \rho_w}$ [-]	