



Kevin J. Wiedemaier, Bsc

**Sättigung von verschiedenen Unterböden -
Versuchstechnische Umsetzung zum
Forschungsprojekt "Mud Pumping"**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik, Grundbau
und Numerische Geotechnik

Dipl.-Ing. Christopher Krammer

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.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz,

.....

(signature)

Danksagung

Ich bedanke mich bei Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.tech. Roman Marte, der es mir ermöglicht hat am Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik diese Masterarbeit zu verfassen. Ebenfalls danke ich Dipl.-Ing. Christopher Krammer für die gute Betreuung und die wertvollen Anregungen zur Ausarbeitung dieser Masterarbeit und ich wünsche ihm noch viel Erfolg für seine weiteren Forschungsarbeiten.

Ein großer Dank für die Hilfe bei der Laborarbeit gilt den Mitarbeitern des Geotechnischen Labors der Technischen Universität Graz und des Labors für Erdwissenschaften der Karl-Franzens-Universität Graz.

Des Weiteren danke ich all meinen Kolleginnen und Kollegen aus dem Stahlbauzeichensaal. Der Zeichensaal ist ein Ort an dem nicht nur enorm viel Wissen geteilt wird, sondern auch ein Ort an dem viele neue Freundschaften entstehen. Ich wünsche ein langes Fortbestehen dieser tollen Gemeinschaft und freue mich auf künftige Wiedersehen.

Auf privater Ebene danke ich meinen treuen Freunden und meiner Familie, besonders meinem Vater Alois und meiner Mutter Margarethe. Obwohl es nie offen ausgesprochen wurde, bin ich mir bewusst, dass ich mich mit all meinen noch so großen Sorgen an meine Eltern wenden kann und sie stets hinter mir stehen. Dieser starke familiäre Rückhalt ermöglicht es mir sorgenlos den Blick in die Zukunft zu richten. Ebenfalls bedanke ich mich bei meinem kleinen Bruder Daniel, der mir in vielen Bereichen des Lebens als Vorbild dient. Unsere tiefe Verbindung zueinander ist mir wohl eines der kostbarsten Güter auf dieser Erde.

Zu guter Letzt danke ich meinen guten Freunden Lukas und Florian. Keine Anderen sind so maßgeblich an meiner Persönlichkeitsentwicklung beteiligt wie diese beiden netten Herren. Es fällt mir schwer euch nicht als Familie zu bezeichnen. Für mich seid ihr Freunde und Familie zu gleichen Teilen. Ich küsse euch.

Kurzfassung

Der Sättigungsgrad des Bodens ist ein Schlüsselfaktor für das Auftreten des Phänomens „Mud Pumping“ im Schienenverkehr. Diese Arbeit untersucht das Sättigungsverhalten verschiedener Unterböden im Großmodellversuch. Dabei werden unterschiedlichen Trockendichten und Kornverteilungen betrachtet. Im Labor werden die Versuchsböden künstlich gemischt und die benötigten Bodenparameter bestimmt. Zur Quantifizierung des Sättigungsverhaltens werden Wassergehalts- und Saugspannungsmessungen, anhand von TDR Sensoren und Tensiometer, in den Versuchsaufbau integriert. Die Messtechnik ist somit auf ihre Funktionalität und Anwendbarkeit in den Versuchen zu überprüfen. Im Vorfeld der Versuchsauswertungen wird ein kleiner Einblick in Literatur und ähnliche Studien gegeben. Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Laborarbeit werden mit den Messergebnissen zu einem optimalen Versuchskonzept zusammengeführt.

Abstract

The saturation of soil layers is a key factor in the occurrence of the phenomena called „Mud Pumping“. This master thesis investigates the saturation process of different soil materials in a large-scale model. The soil is compounded in the laboratory and the specific soil parameters are determined. TDR sensors and Tensiometer are used to measure water content and the matrix suction during the saturation. Some test of the measurement equipment, regarding applicability and accuracy has to be done. This thesis also gives a short overview of similar experiments in the literature. At least all knowledge from the laboratory work and the measurement data should come to gather and develop an ideal concept for the saturation of the soils. This is the foundation of further investigations on the topic „Mud Pumping“.

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	1
2	Ähnliche Untersuchungen zum Sättigungsverhalten bindiger Böden	2
2.1	Investigating the mud pumping and interlayer phenomena in railway sub-structure (Duong et al. 2014)	2
2.2	Development of a Large-Scale Infiltration Column for Studying the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Fouled Ballast (Duong et al. 2013)	6
3	Bodenphysikalische Grundlagen	10
3.1	Porenwasser	10
3.1.1	Kapillarwasser	10
3.1.2	Porenwinkelwasser.....	11
3.1.3	Haftwasser und Adsorptionswasser.....	12
3.2	Porenluft.....	13
3.3	Drei-Phasen-System Boden	13
3.3.1	Wasser im Boden	14
3.3.2	Porenzahl und Porenanteil	15
3.3.3	Der Sättigungsgrad.....	15
3.4	Die Porenformen	16
3.5	Das Matrixpotential	17
3.5.1	Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP).....	18
3.6	Die Wasserretentionskurve.....	19
4	Eigenschaften der Versuchsböden	22
4.1	Zusammensetzung der Versuchsböden.....	22
4.2	Bestimmung der Bodenparameter	24
4.3	Hyprop Versuch.....	26
4.3.1	Funktionsprinzip	26
4.3.2	Versuchsablauf.....	27
4.3.3	Versuchsdurchführung.....	29
4.3.4	Auswertung	30

4.4	Versuch zur Bestimmung des Sättigungsgrades der STZ.....	32
4.4.1	Versuch STZ 1: Aufsättigung der STZ mit dem Fokus auf eine längere Sättigungsdauer	32
4.4.2	Versuch STZ 2: Aufsättigung der STZ mit Fokus auf die Kontrolle des Sättigungsgrades vor Einbau in den Hyprop.....	33
4.4.3	Interpretation der Ergebnisse.....	34
4.5	Interpretation der Hyprop Versuche	35
5	Sättigungsversuche	40
5.1	Versuchsaufbau.....	40
5.2	Messtechnik.....	42
5.2.1	UMS EC-5 TDR Sensor	42
5.2.2	Sensorüberprüfung.....	43
5.2.3	T5 Tensiometer	44
5.3	Überprüfung der T5 Tensiometer.....	47
5.3.1	Sensortest im Druckbereich mit Schaftlänge = 20 cm.....	47
5.3.2	Sensortest im Druckbereich mit Schaftlänge = 5 cm.....	49
5.3.3	Sensortest im Saugspannungsbereich mit Schaftlänge = 20 cm.....	49
5.3.4	Sensortest im Saugspannungsbereich mit Schaftlänge = 5 cm.....	50
5.4	Versuchsreihen.....	52
5.5	Versuchsablauf.....	52
6	Versuchsergebnisse	57
6.1	Sättigungsversuche mit $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$	57
6.1.1	Ergebnisse SV 1.7_1-A	58
6.1.2	Ergebnisse SV 1.7_1-B	61
6.1.3	Interpretation	63
6.1.4	Ergebnisse SV 1.7_2-A	64
6.1.5	Ergebnisse SV 1.7_2-B	67
6.1.6	Interpretation	69
6.1.7	Ergebnisse SV 1.7_3-A	70
6.1.8	Ergebnisse SV 1.7_3-B	72

6.1.9	Interpretation	75
6.2	Diskussion der Ergebnisse aus der Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$	75
6.3	Sättigungsversuche mit $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$	76
6.3.1	Ergebnisse SV 1.6_1	76
6.3.2	Ergebnisse SV 1.6_2-A	78
6.3.3	Ergebnisse SV 1.6_2-B	79
6.3.4	Ergebnisse SV 1.6_3	80
6.4	Diskussion der Ergebnisse aus der Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$	81
6.5	Sättigungsversuche mit $\rho_d = 1,50 \text{ g/cm}^3$	82
6.6	Darstellung der Ergebnisse	84
7	Zusammenfassung	86
8	Literatur	88

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Kornverteilungskurven der untersuchten Materialien	2
Abb. 2	Schematische Darstellung des Prüfzylinders	3
Abb. 3	Proctorkurve Boden 70S30K	3
Abb. 4	Verlauf des volumetrischen Wassergehaltes während der Belastung im ungesättigten Bereich.....	4
Abb. 5	(a) Sättigungsverlauf TDR Sonden E2 ($\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$), (b) Aufzeichnungen der Tensiometer E2 ($\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$),.....	5
Abb. 6	Sättigungsgrad: 1. Vor Belastung; 2. Nach konstanter Belastung; 3. Nach dynamischer Belastung; 4. Nach Wassersättigung	6
Abb. 7	Kornverteilungen: ITL_0 = Verschmutzter Gleisschotter, ITL_{10} = Verschmutzter Gleisschotter + 10 % Feinanteile	7
Abb. 8	Schematische Darstellung des Prüfzylinders	7
Abb. 9	TDR Messungen Boden „ ITL_{10} “ während der Sättigungsphase	8
Abb. 10	Entwicklung des Sättigungsgrades der Bodenprobe.....	9
Abb. 11	Porenwasser und Porenluft (Möller 2016).....	10
Abb. 12	Kapillarrohr mit Zug- und Druckbereich (Möller 2016)	11
Abb. 13	Porenwinkelwasser zwischen Bodenkörnern (Möller 2016)	12
Abb. 14	Wechselwirkung zwischen gebundenem Adsorptionswasser und Mineralteilchen (Boley 2012)	13
Abb. 15	Drei-Phasen-System im Boden (Boley 2012)	14
Abb. 16	Porenformen Tonteilchen, a) Fläche an Fläche, b) Kante an Kante, c) Kante an Fläche (Scheffer und Schachtschabel 2010)	16
Abb. 17	Hydraulisches Potential Ψ_H , Gravitationspotential Ψ_z , Matrixpotential Ψ_m in einer homogenen Bodensäule. (Scheffer und Schachtschabel 2010)	17
Abb. 18	Wasserretentionskurven von Sand, Schluff und Ton (Scheffer und Schachtschabel 2010).....	19
Abb. 19	Einfluss der Hysterese bei Sand und Schluff (links); Potentialunterschiede in Be- und Entwässerung (rechts) (Scheffer und Schachtschabel 2010)	20
Abb. 20	Kornverteilung der Ausgangsmaterialien	22
Abb. 21	Kornverteilung Versuchsböden 1, 2, 3.....	23
Abb. 22	Proctorkurve Boden 1.....	25
Abb. 23	Proctorkurve Boden 2.....	25
Abb. 24	Proctorkurve Boden 3.....	25
Abb. 25	Funktionsprinzip Hyprop (UMS Hyprop 2015)	26
Abb. 26	Optimale Messkurve Hyprop, (UMS Hyprop 2015).....	28

Abb. 27	Herstellung im Stechzylinders (links), Probenkörper Boden 1 (rechts).....	29
Abb. 28	Fittingkurve mit Messpunkten; Boden 3, $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$	31
Abb. 29	STZ im Sättigungsbad (links); STZ nach Entnahme aus dem Sättigungsbad (rechts).....	32
Abb. 30	STZ mit „Boden 1“ und Fokus auf eine Aufsättigung über längere Zeit im Sättigungsbad	33
Abb. 31	Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ mit gravimetrischem Wassergehalt	35
Abb. 32	Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ mit gravimetrischem Wassergehalt	36
Abb. 33	Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ mit Sättigungsgrad	38
Abb. 34	Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ mit Sättigungsgrad	38
Abb. 35	Schematische Darstellung des Prüfzylinder.....	41
Abb. 36	Schnitt Prüfzylinder und Prüfzylinder mit eingebauter Messtechnik	41
Abb. 37	UMS EC-5 TDR Sensor.....	43
Abb. 38	Vergleich der TDR Messungen mit tatsächlichen Wassergehalt.....	44
Abb. 39	T5 Tensiometer, schematisch, METER Group München, (UMS T5 2009)..	45
Abb. 40	T5 Tensiometer mit Teflonmembran, Sensorkorpus, Tensiometerkerze + Schutzkappe.....	46
Abb. 41	Tensiometer entlüften mit: A) Vakuumpumpe, B) Tröpfchenflasche, C) Tensiometerkerzen in Behälter mit entgastem und entionisiertem Wasser .	47
Abb. 42	Tensiometertest, Schaftlänge 20 cm,	48
Abb. 43	Tensiometertest im Druckbereich mit einer Schaftlänge von 20 cm.....	48
Abb. 44	Tensiometertest im Druckbereich mit einer Schaftlänge von 5 cm.....	49
Abb. 45	Ansprechverhalten der Tensiometer im Saugspannungsbereich, Schaftlänge = 20 cm	50
Abb. 46	Ansprechverhalten der Tensiometer im Saugspannungsbereich, Schaftlänge = 5 cm	50
Abb. 47	Sensortest, Vergleich der Kerzen in Boden 1, $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$	51
Abb. 48	Flügelmischer	53
Abb. 49	a) Materialabwage, b) Verdichtung, c) Kontrollmessung & Aufräumen. d) TDR Einbau	54
Abb. 50	Wassergehalt nach dem Einbau, „Boden 1“	54
Abb. 51	Eingebauter Versuchsboden mit Gleisschotterplatte und installierter Messtechnik	56

Abb. 52	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_1-A.....	58
Abb. 53	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_1-A	59
Abb. 54	Detail TDR Sensoren für SV 1.7_1-A	59
Abb. 55	Detail Tensiometer für SV 1.7_1-A	60
Abb. 56	Sättigungsgrade für SV 1.7_1-A.....	60
Abb. 57	Sättigungsverlauf für SV 1.7_1-A	61
Abb. 58	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_1-B.....	62
Abb. 59	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_1-B	62
Abb. 60	Sättigungsverlauf für SV 1.7_1-B	63
Abb. 61	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_2-A.....	64
Abb. 62	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_2-A	65
Abb. 63	Detailausschnitt Tensiometer-Messung für SV 1.7_2-A.....	65
Abb. 64	Sättigungsgrade für SV 1.7_2-A.....	66
Abb. 65	Sättigungsverlauf für SV 1.7_2-A	66
Abb. 66	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_2-B.....	67
Abb. 67	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_2-B	68
Abb. 68	Sättigungsverlauf für SV 1.7_2-B	69
Abb. 69	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_3-A.....	70
Abb. 70	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_3-A	71
Abb. 71	Sättigungsgrade für SV 1.7_3-A.....	71
Abb. 72	Sättigungsverlauf für SV 1.7_3-A	72
Abb. 73	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_3-B.....	73
Abb. 74	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_3-B	74
Abb. 75	Sättigungsverlauf für SV 1.7_3-B	74
Abb. 76	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.6_1	77
Abb. 77	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.6_2.....	77
Abb. 78	Versagensmechanismen Hebung und Suffusion (Indraratna et al 2018)	78
Abb. 79	Schadensbilder SV 1.6_2-A	79
Abb. 80	Versagensbilder SV 1.6_2-B	80
Abb. 81	Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.6_3	80
Abb. 82	Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.6_3.....	81
Abb. 83	Boden 1, Unterschiedlicher Wassergehalt beim Materialausbau	82
Abb. 84	Versagensbilder SV 1.5_1	83
Abb. 85	Schichtung bei Tockendichte $\rho_d = 1,50 \text{ g/cm}^3$	83
Abb. 86	Balkendiagramm der Endsättigungsgrade der Versuchsreihen	85
Abb. 87	Sättigungsverläufe der Bodenproben	85

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Einteilung der Porengrößenbereich mit Durchmesser und Matrixpotential...	16
Tab. 2	Kennwerte des Wasserhaushaltes	18
Tab. 3	Zusammensetzung der Versuchsböden	23
Tab. 4	Zusammenstellung der Bodenmechanischen Untersuchungsergebnisse	24
Tab. 5	Sättigungsgrad vor dem Einbau in das Hyprop Gerät.....	33
Tab. 6	Ergebnisse des Hyprop Versuchs mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$	38
Tab. 7	Ergebnisse des Hyprop Versuchs mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$	39
Tab. 8	Sensorabkürzung mit dazugehörigen Eingang am Prüfzylinder.....	42
Tab. 9	Abkürzungen der Sättigungsversuche	52
Tab. 10	Zusammenstellung der erreichten Sättigungsgrade.....	84

Formelzeichen und Abkürzungen

h_k	[cm]	kapillare Steighöhe
σ_0	[N/m ²]	Oberflächenspannung
d	[mm]	Durchmesser der Kapillare
α	[°]	Benetzungswinkel des Wassers
σ_0	[N/m ²]	Wasserspannung
γ_w	[N/m ³]	Wichte des Wassers
ρ_d	[kg/m ³]	Trockendichte Boden
ρ_s	[kg/m ³]	Korndichte
Ψ_d	[kN/m ³]	Trockenwichte Boden
w	[%]	gravimetrischer Wassergehalt
θ	[%]	volumetrischer Wassergehalt
m_w	[kg]	Masse Wasser
m_d	[kg]	Masse Boden
V	[m ³]	Gesamtvolumen
V_v	[m ³]	Porenvolumen
V_s	[m ³]	Feststoffvolumen
V_a	[m ³]	Volumen Porengas
V_w	[m ³]	Volumen Wasser
e	[-]	Porenzahl
n	[-]	Porenanteil
S_r	[%]	Sättigungsgrad
σ_s	[kPa]	Sickerspannung
σ'_{vt}	[kPa]	effektive Vertikalspannung
σ_b	[kPa]	Auftriebsspannung
σ_d	[kPa]	Schleppspannung
σ_h	[kPa]	hydrodynamische Spannung
τ_f	[kPa]	Wandreibung
Δ_y	[m]	Probenhöhe
A	[m ²]	Zylinderfläche
F_U	[kN]	Auftriebskraft
F_A	[kN]	Auflast
G	[kN]	Eigengewicht
U	[kN]	Wasserdruck

1 Einleitung und Problemstellung

Im Schienenverkehr sorgt das Phänomen „Mud Pumping“ oft für Instabilitäten im Gleiskörper. Durch die dynamische Belastung des Zugverkehrs treten in feinkörnigen Böden bei einem entsprechenden Wassergehalt Porenwasserüberdrücke auf, bzw. können Aufweichungen des Unterbodens stattfinden, die eine Teilchenbewegung des Unterbaues in den Gleisschotter verursachen. Der Sättigungsgrad des Bodens ist hierbei einer der Schlüsselfaktoren (Duong et al. 2014) für das Auftreten von „Mud Pumping“.

An der TU Graz wird von DI Christopher Krammer in dem Forschungsprojekt „Mud Pumping“ ein Prüfstand zur labortechnischen Simulation dieses Effektes betrieben. Bei einzelnen Versuchsserien wird ein Versuchszylinder mit Bodenmaterial befüllt, nach Einbau in den Prüfstand mit Wasser gesättigt und anschließend mit unterschiedlichen dynamischen Lasten beansprucht. Die vorliegende Arbeit ist eine Vorstudie und befasst sich mit dem Sättigungsverhalten diverser Versuchsböden und der Ausarbeitung einer geeigneten Methodik für den Einbau des Bodenmaterials in den Versuchszylinder bzw. in den Prüfstand. Es gilt die Schnittstelle zwischen einer theoretischen Sättigung des Bodens und dem praktischen Sättigungsverhalten im Großversuch auszuleuchten und Veränderungen, welche sich eventuell durch die Versuchsdurchführung ergeben, zu erfassen. Recherchen zu vergleichbaren Versuchen von Duong et al. (2014) und Duong et al. (2013) zeigen, dass in der Praxis ein Sättigungsgrad von 100 % bei solchen großen Modellversuchen kaum zu erreichen ist. Das Sättigungsverhalten ist von sehr unterschiedlichen Parametern wie Kornverteilung, Lagerungsdichte, Sättigungsgrad, hydraulischen Eigenschaften des Bodens, hydraulischer Gradient, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung abhängig und dadurch nur schwer vorherzusagen. Allein der relativ große Versuchszylinder und der damit verbundene Aufwand beim Einbau in den Versuchsstand stellt eine Herausforderung dar. Zur Erfassung von Daten sollen während der Sättigungsversuche messtechnische Sensoren installiert und erprobt werden. Die gesammelten Daten sind zu quantifizieren und das Sättigungsverhalten der Versuchsböden zu interpretieren. Es gilt, ein effizientes Versuchskonzept für die Sättigungsphase in Bezug auf die weiterführenden Versuche des Forschungsprojektes „Mud Pumping“ zu entwickeln.

2 Ähnliche Untersuchungen zum Sättigungsverhalten bindiger Böden

2.1 Investigating the mud pumping and interlayer phenomena in railway sub-structure (Duong et al. 2014)

In einem großen Modellversuch wurde das Phänomen „Mud Pumping“ und die sogenannte „Interlayer Creation“ untersucht. Für dieses Forschungsprojekt wurde ein künstlicher Boden (70S30K) aus gebrochenem Sand und Kaolin hergestellt. Somit konnten größere Mengen dieses Materials im Labor reproduzierbar hergestellt werden. Der Boden weist mit 85 % < 0,06 mm einen sehr hohen Prozentsatz an Feinanteilen auf.

In Abb. 1 sind die Kornverteilungen der Ausgangsmaterialien (Kaolin & gebrochener Sand) und des Bodens „70S30K“ dargestellt. Zusätzlich ist noch ein dem Versuchsboden sehr ähnlicher natürlicher Boden namens „Jossigny silt“ abgebildet.

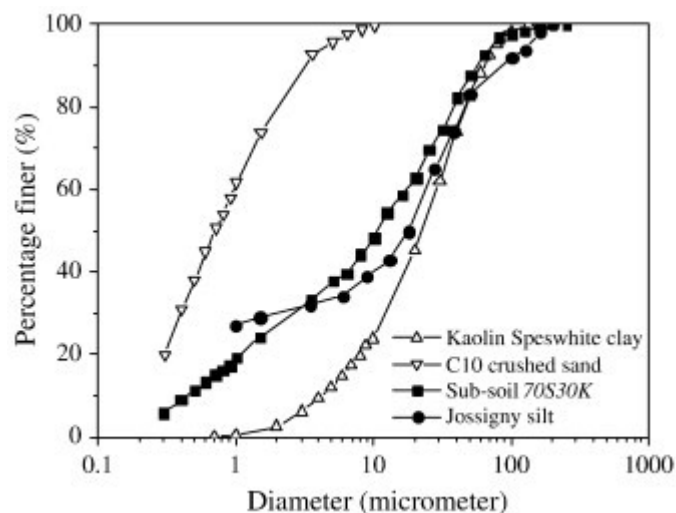


Abb. 1 Kornverteilungskurven der untersuchten Materialien

Der Prüfcylinder hat einen Innendurchmesser von 55 cm und eine Höhe von 60 cm. In der Zylinderwand sind Sensoreingänge für TDR Sensoren (TDR1 = 12 cm, TDR 2 = 16 cm, TDR3 = 20 cm) und Tensiometer (T1 = 12 cm, T2 = 16 cm, T3 = 20 cm) angeordnet (siehe Abb. 2). Der Boden wurde bei den Versuchen lagenweise verdichtet und bis auf eine Höhe von 22 cm eingebracht. Auf dem Boden ist eine 16 cm dicke Schicht Gleisschotter aufgebaut worden. Für die Versuchsdurchführung wurde der Boden mit den drei unterschiedlichen Trockendichten $1,4 \text{ g/cm}^2$ (E1), $1,5 \text{ g/cm}^2$ (E2) und $1,6 \text{ g/cm}^2$ (E3) und mit dem optimalen Wassergehalt von 16 % eingebaut. Die Proctorkurve mit $\rho_{pr} = 1,78 \text{ g/cm}^3$ und $w_{opt} = 16 \%$ ist in Abb. 3 dargestellt.

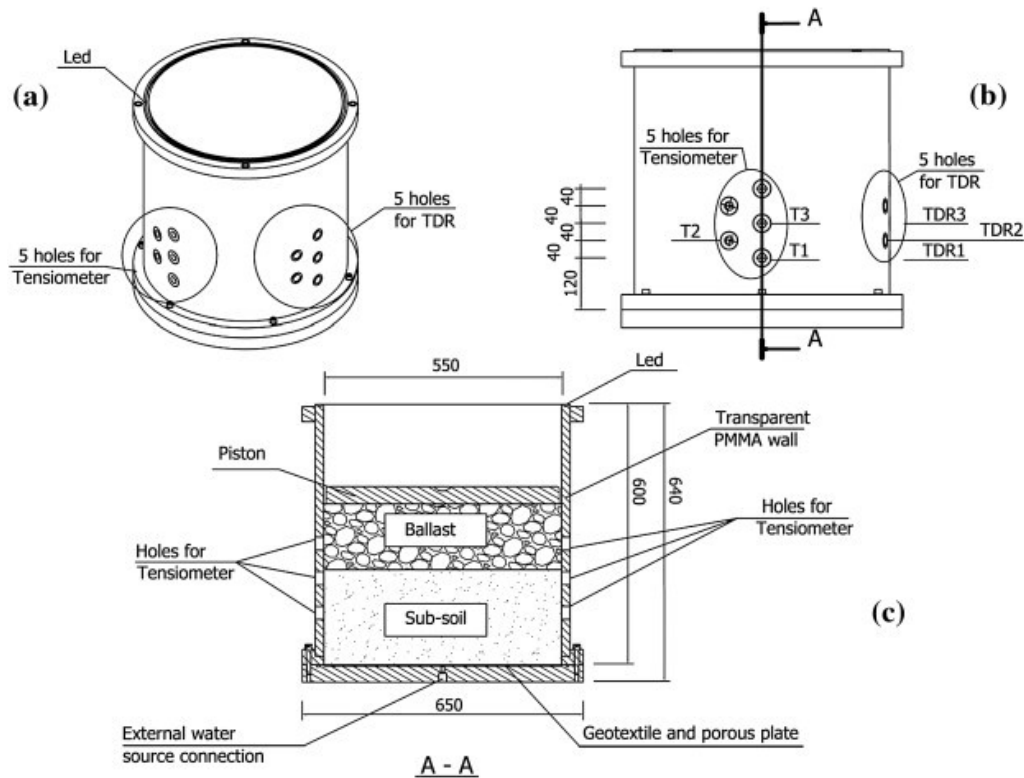


Abb. 2 Schematische Darstellung des Prüfzylinders

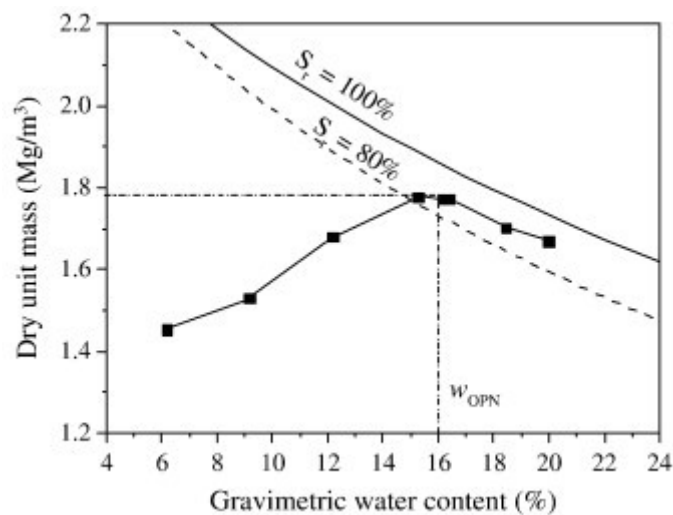


Abb. 3 Proctorkurve Boden 70S30K

Vor dem Sättigen wurde die Probe vorerst im ungesättigten Zustand ($w = 16\%$) belastet. Die Vorbelastung setzt sich zusammen aus einer monotonen Laststeigerung von 0 – 100 kPa mit einer Geschwindigkeit von 2 kN/min und einer zyklischen Belastung von 30 – 100 kPa mit 4 verschiedenen Frequenzen und Zyklenanzahlen: 0,1 Hz mit 20 Zyklen; 1 Hz mit 50 Zyklen; 2 Hz mit 100 Zyklen; 5 Hz mit 500.000 Zyklen.

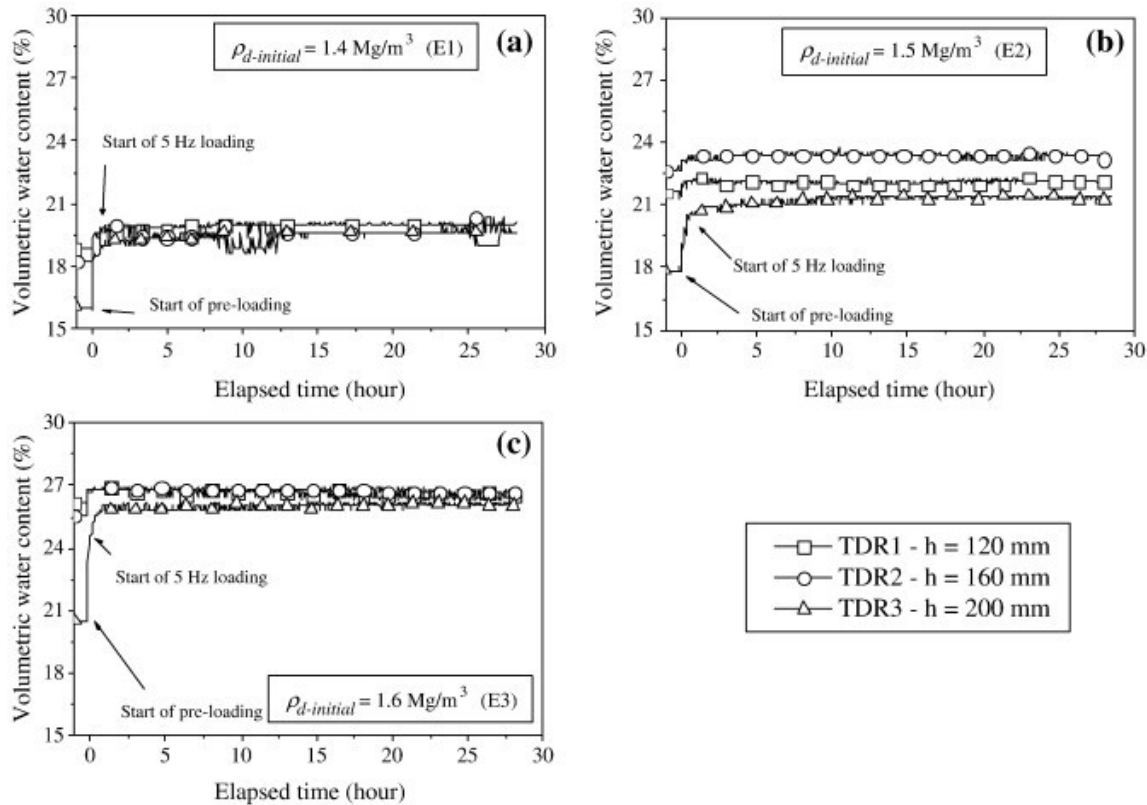


Abb. 4 Verlauf des volumetrischen Wassergehaltes während der Belastung im ungesättigten Bereich

In Abb. 4 sind die Verläufe des volumetrischen Wassergehaltes während der Vorbelastung abgebildet. Alle Böden wurden mit demselben gravimetrischen Wassergehalt $w = 16 \%$ eingebaut und demzufolge weisen die Versuchsreihen einen höheren Anfangswassergehalt auf, je höher die Lagerungsdichte des Bodens ist. Gleich zu Beginn der Belastung steigt der volumetrische Wassergehalt an. Auf einer Höhe von 20 cm und damit mit nur 2 cm Überdeckung steigt besonders TDR 3 bei allen drei Versuchsreihen sehr stark an. Grund dafür ist eine Verdichtung des Bodens. Der Porenraum nimmt daher ab und dadurch steigt der volumetrische Wassergehalt. Auffallend ist, dass TDR 3 auch bei allen Versuchen deutlich weniger Wassergehalt als die anderen Sensoren anzeigt. Ein Grund dafür kann sein, dass beim Einbauprozess die oberste Schicht des Bodens nicht gleich dicht eingebaut wurde wie die anderen, oder in dieser Schicht schon eine Verdunstung stattgefunden hat. Erst durch das Aufbringen der Belastung nehmen alle TDR-Sonden einen beinahe gleichen Wert an, wenn die Abweichung des Sensors von $\pm 2 \%$ berücksichtigt wird.

Nach der Vorbelastung wurden die Proben mit einem Wasserdruck von 12 kPa von unten gesättigt, bis sich ein Wasserspiegel von 2 mm über der Bodenprobe eingestellt hat. In Abb. 5 sind die Verläufe der TDR-Sonden und der Tensiometer während der

Sättigung dargestellt. Die TDR-Sonden stellten sich schon nach 20 h auf einen konstanten volumetrischen Wassergehalt ein. Die Tensiometer hingegen erreichten erst nach 90 h den hydrostatischen Wasserdruck. Diese Verzögerung wird auf das unterschiedliche Sättigungsverhalten von Mikro- und Makroporen zurückgeführt. Die Makroporen füllen sich zuerst und verursachen somit die erste Abnahme der Saugspannung auf 75 kPa. Erst in weiterer Folge füllen sich die Mikroporen und die Saugspannung geht langsam gegen 0 kPa.

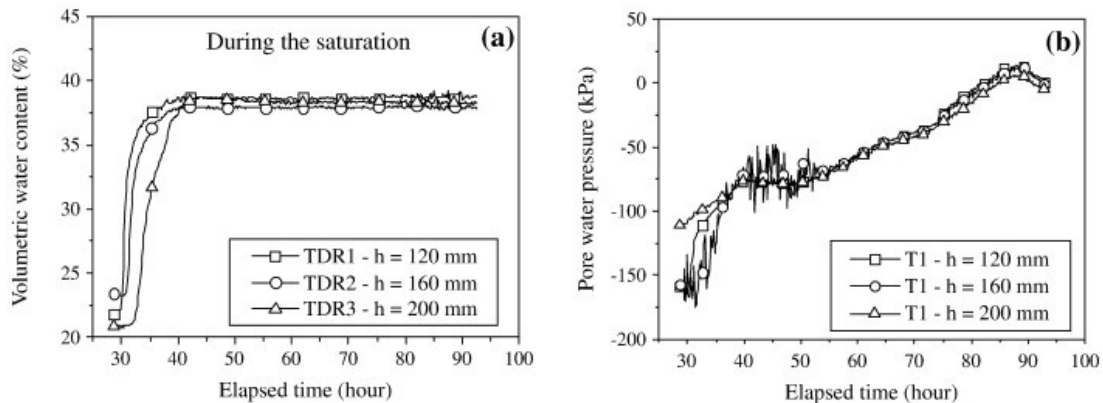


Abb. 5 (a) Sättigungsverlauf TDR Sonden E2 ($\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$), (b) Aufzeichnungen der Tensiometer E2 ($\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$),

Die Ergebnisse der TDR-Messungen der Versuchsreihen sind in Abb. 6 abgebildet. Es wird angenommen, dass sich nach der Vorbelastung die Lagerungsdichte nicht verändert hat und somit wurde der Sättigungsgrad für die vier Zeitpunkte berechnet:

- 1) nach Einbau in den Prüfcylinder
- 2) nach monotone Belastung
- 3) nach zyklischer Belastung
- 4) nach Sättigung mit 2 mm Wasserspiegel auf Bodenprobe

Der erreichte Sättigungsgrad ist bei diesen Versuchen stark von der Einbaudichte der Böden abhängig. E1 ($\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$) erreichte einen Sättigungsgrad von 80 %. E2 ($\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$) und E3 ($\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$) unterscheiden sich mit ca. 85 - 87 % Sättigung kaum.

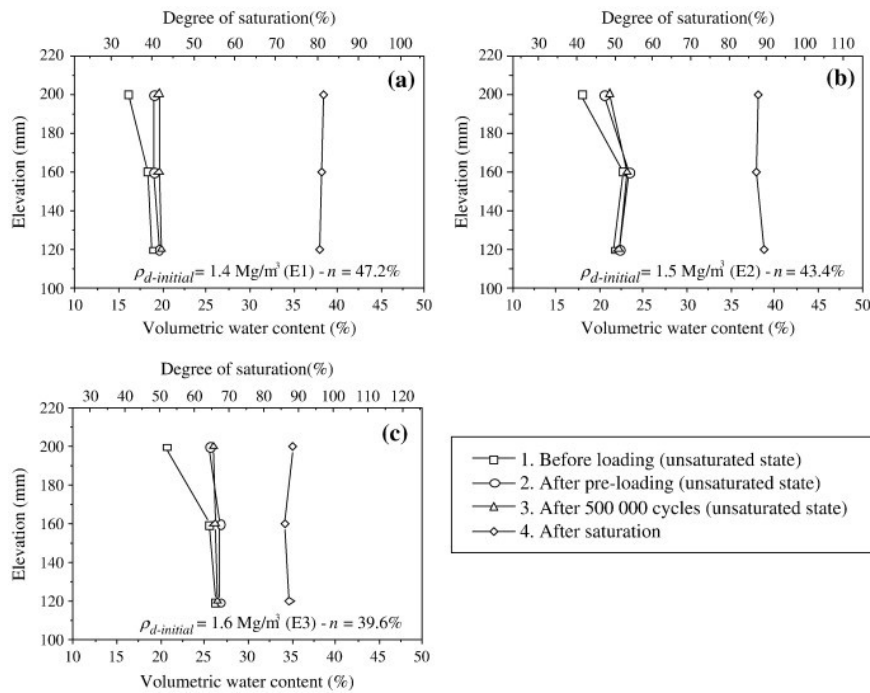


Abb. 6 Sättigungsgrad: 1. Vor Belastung; 2. Nach konstanter Belastung; 3. Nach dynamischer Belastung; 4. Nach Wassersättigung

2.2 Development of a Large-Scale Infiltration Column for Studying the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Fouled Ballast (Duong et al. 2013)

In dieser Studie wurde eine Durchlaufzelle zur Erforschung der hydraulischen Eigenschaften von verschmutztem Gleisschotter entwickelt (siehe Abb. 7). Für den Versuch ist stark mit Schluff und Sand verschmutzter Kies aus einer alten Gleisanlage im Nordwesten von Lyon (FR) entnommen worden. Unter dem Gleisschotter befindet sich dort ein Unterbau aus hochplastischem Schluff mit einer Fließgrenze von $w_L = 57,8 \%$ und einer Bildsamkeitszahl von $I_p = 24,1$. Die Kornverteilungen sind in Abb. 7 dargestellt. Um die Feianteile des verschmutzten Gleisschotters zu erhöhen, wurden 10 % Schluff, bezogen auf die Trockenmasse, hinzugefügt. Für die Korngrößen $< 2 \text{ mm}$ wurde eine Korndichte $\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$ und $> 2 \text{ mm}$ $2,68 \text{ g/cm}^3$ bestimmt.

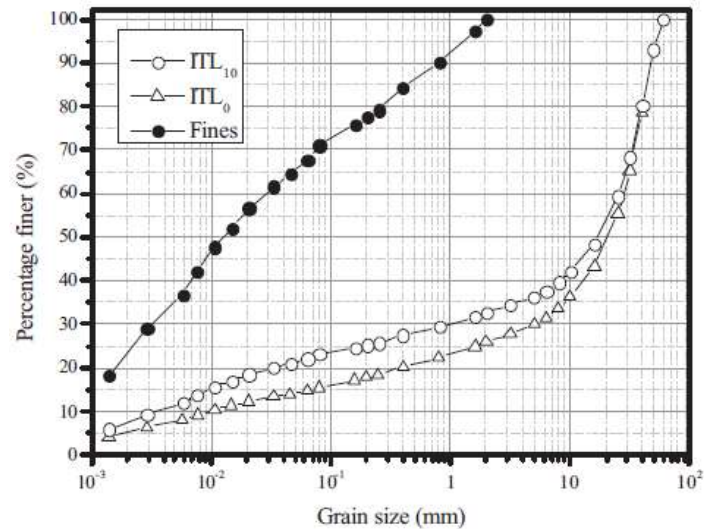


Abb. 7 Kornverteilungen: ITL₀ = verschmutzter Gleisschotter, ITL₁₀ = verschmutzter Gleisschotter + 10 % Feinanteile

Der Durchmesser des Prüfzylinders beträgt 30 cm und die Höhe 60 cm. In 10 cm Abständen sind jeweils 5 Sensoreingänge (10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm) für Tensiometer und TDR Sensoren vorgesehen. Mit einem Deckel wird der Zylinder dicht verschlossen. Im Zylinderboden befinden sich zwei Öffnungen für die Wasserzugabe und ein Loch in der Mitte des Deckels dient als Auslauf für Luft oder Wasser. Geotextile schützen die zuführenden Leitungen vor Verstopfung. Die TDR Sensoren sind 20 cm lang und weisen einen Einflussbereich von 30 mm auf. Die Genauigkeit liegt bei $\pm 2\%$. Die T8 Tensiometer arbeiten in einem Bereich von 100 kPa bis -80 kPa und einer Messgenauigkeit von $\pm 0,5$ kPa (Abb. 8)

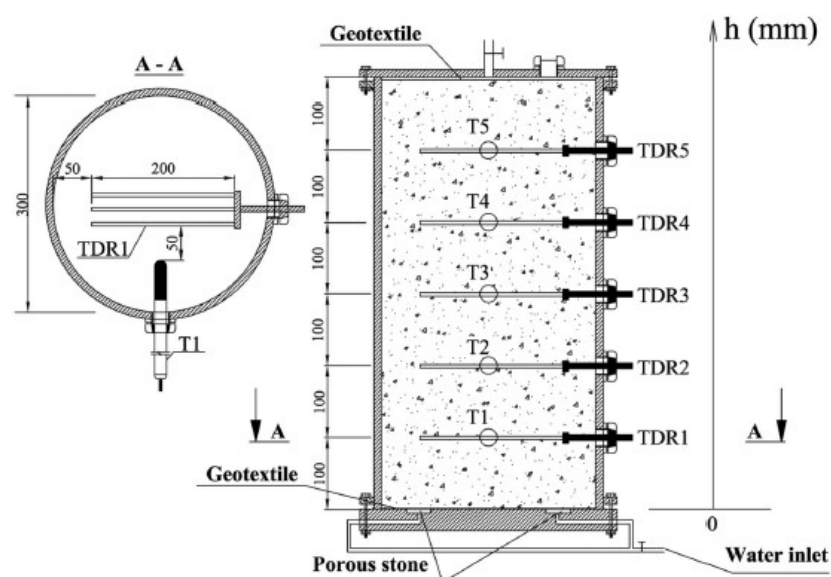


Abb. 8 Schematische Darstellung des Prüfzylinders

Das Material wurde mittels Vibrationshammer mit einem gravimetrischen Wassergehalt von $w = 5,5\%$ und einer Trockendichte von $2,01\text{ g/cm}^3$ eingebaut. Damit die Tensiometer durch diesen niedrigen Anfangswassergehalt nicht austrocknen, wurden sie erst nach der Sättigungsphase installiert. Die Bodenprobe wurde von unten gesättigt und schon nach 1 h war Wasser am oberen Auslass zu erkennen. Das Durchströmen des Zylinders dauerte einen Tag an und die hydraulische Druckhöhe wurde dabei konstant auf 45 cm gehalten. Nach der Sättigung folgte noch eine Entwässerungs- und Verdunstungsphase, dies ist jedoch für dieses Projekt nicht mehr relevant.

Der Anfangswassergehalt variiert von 5 – 10 % (siehe Abb. 9). Nach 80 h wurde der Sättigungsvorgang gestartet und nach weniger als 1 h stellten sich alle TDR Sensoren auf einen konstanten Wassergehalt ein und stiegen sehr schnell auf ein Maximum von 22,4 – 25 %. Bei einer Trockendichte von $2,01\text{ g/cm}^3$ entspricht ein volumetrischer Wassergehalt von 25 % einer Sättigung von 100 %. Die Messwerte der TDR Sonden ergeben an den Sensorpositionen also eine Sättigung im Bereich von 90 – 100 %. Das zeigt, dass die Bodenprobe sehr nah an der Vollsättigung ist.

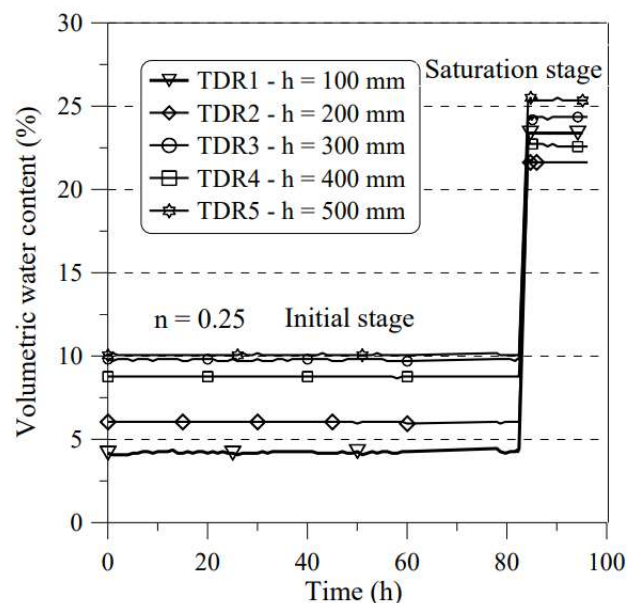


Abb. 9 TDR Messungen Boden „ITL₁₀“ während der Sättigungsphase

Abb. 10 veranschaulicht den Verlauf des Sättigungsgrades über die Tiefe der Bodenprobe. Obwohl Wasser am oberen Ventil des Zylinders ausgetreten ist, bedeutet das nicht, dass die Bodenprobe schon gesättigt ist. Für einen Sättigungsgrad von 100 % ist die Dauer der Durchströmung mit 1 Tag zu kurz, da der ungleichmäßige Durchfluss des Wassers nur in den größeren Poren stattfindet und somit kleinere Poren immer noch mit Luft gefüllt bleiben.

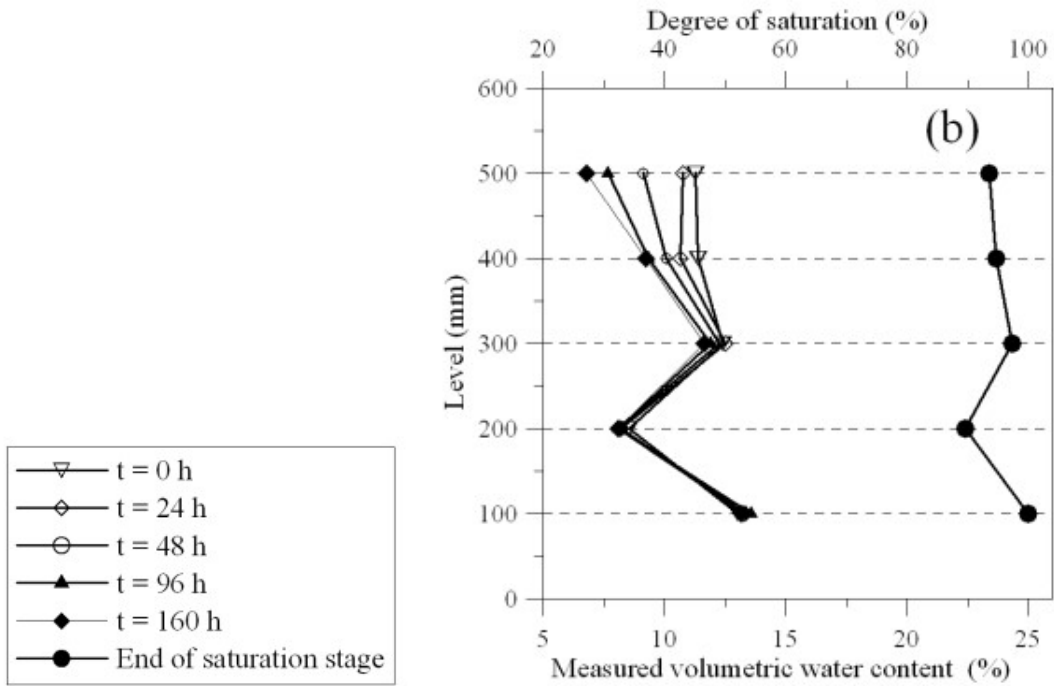


Abb. 10 Entwicklung des Sättigungsgrades der Bodenprobe

3 Bodenphysikalische Grundlagen

3.1 Porenwasser

Wasser in gesättigten und teilgesättigten Böden wird als Porenwasser bezeichnet. Porenwasser versickert entweder durch Niederschlag von oben in den Boden, oder es wird von unten vom Grundwasserspiegel angesaugt bzw. durch umliegende Grundwasserspiegel mittels Potentialausgleich in den Boden gedrückt.

Abb. 11 zeigt zwei Bereiche. Zum einen den gesättigten Bereich mit dem Grundwasserspiegel, dem freien Wasser und der darüber liegenden geschlossenen Kapillarzone. Dort sind alle Porenräume vollständig mit Grundwasser oder Kapillarwasser gefüllt. Im teilgesättigten Bereich befindet sich die offene Kapillarzone, das Sickerwasser und einzelne Bodenteilchen, die von Haftwasser und Adsorptionswasser umgeben sind. (Möller 2016)

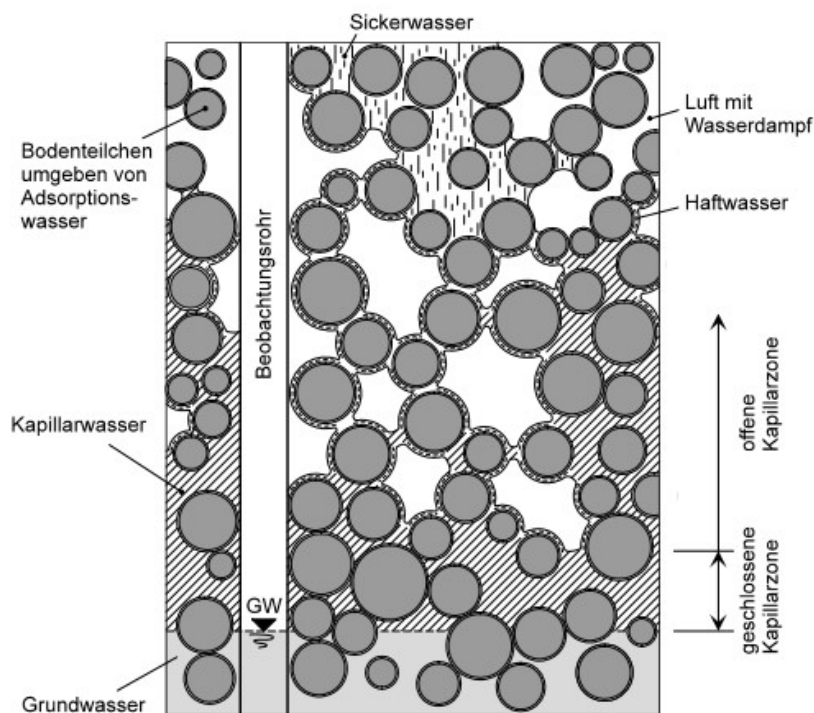


Abb. 11 Porenwasser und Porenluft (Möller 2016)

3.1.1 Kapillarwasser

An den kapillaren Berührungsstellen zwischen Wasser, Bodenteilchen und Luft bilden sich, aufgrund der Grenzflächenspannung von Wasser gegenüber Luft, Menisken aus. Menisken steigen im Boden auf, da Wasser versucht, die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft zu minimieren, damit die höhere Grenzflächenspannung von Wasser einen

energieärmeren Zustand annimmt. Diese Bildung beruht auf Adsorptionskräften der festen Oberfläche und auf Kohäsionskräften im Wasser zwischen den Wassermolekülen. Je kleiner die Hohlräume der Poren sind, umso höher steigt das Wasser in den Porenkanal auf und umso mehr Energie muss aufgewendet werden, um dem Porenkanal das Kapillarwasser zu entziehen. Die Steighöhen des Kapillarwassers sind daher von der Bodenart und seiner Lagerungsdichte abhängig (Abb. 12). (Scheffer und Schachtschabel 2010)

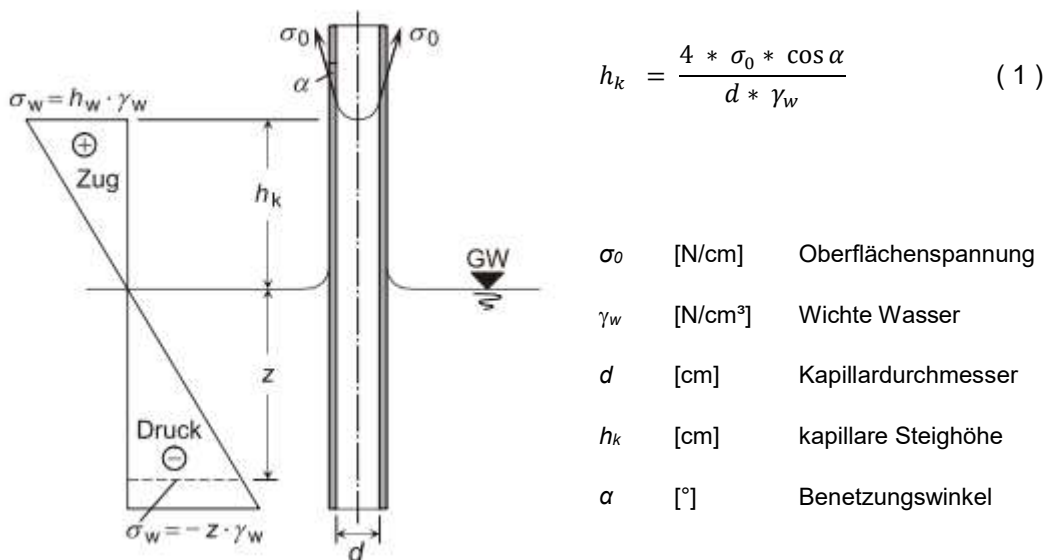


Abb. 12 Kapillarrohr mit Zug- und Druckbereich (Möller 2016)

Die kapillare Steighöhe h_k kann in cm über dem Grundwasser (GW) mittels Oberflächenspannung σ_0 , dem Durchmesser d und dem Benetzungswinkel α berechnet werden. Das Kapillarwasser im gesättigten Bereich weist keine Lufteinschlüsse auf. In der Teilsättigung kommt es als offenes Kapillarwasser, in dem nur ein Teil der Poren mit Wasser gefüllt sind, vor. (Möller 2016)

3.1.2 Porenwinkelwasser

In den Kontaktflächen von nicht bindigen Körnern bildet sich durch Kapillarkräfte das sogenannte Porenwinkelwasser (Abb. 13). Es zieht die Bodenkörner zusammen und führt zu einem Zusammenhaften der Körner, das als Kapillarkohäsion (scheinbare Kohäsion) bekannt ist. Diese scheinbare Kohäsion tritt insbesondere bei feinkörnigen nicht bindigen Böden (z.B. Sand, schluffiger Sand) auf. Die maximale Wirkung der Kapillarkohäsion entsteht bei einem charakteristischen Wassergehalt. Jede Änderung dieses charakteristischen Wassergehaltes reduziert die Kapillarkohäsion. Bei Wasserzugabe wird sie reduziert bis sie bei Sättigung vollkommen wegfällt. Der

Austrocknungsprozess vermindert ebenfalls die Kapillarkohäsion bis der Boden schließlich ganz trocken ist und kein Porenwinkelwasser mehr vorhanden ist.

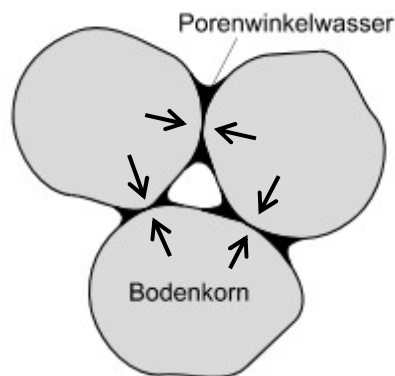


Abb. 13 Porenwinkelwasser zwischen Bodenkörnern (Möller 2016)

3.1.3 Haftwasser und Adsorptionswasser

Als Haftwasser wird die Wassermenge bezeichnet, die sich um einzelne Bodenteilchen oberhalb der geschlossenen Kapillarzone adhäsiv gegen die Schwerkraft bindet. Adsorptionswasser ist ein Teil des Haftwassers. Die Kornoberfläche von mineralischen Böden ist stark negativ geladen. Diese Ladung zieht durch die Dipoleigenschaften (ein Wassermolekül hat eine negative Ladung auf der einen und eine positive Ladung auf der entgegengesetzten Seite) Wassermoleküle an. Abb. 14 veranschaulicht wie die positiven Enden der Wassermoleküle von der negativ geladenen Kornoberfläche angezogen werden. Eine verdichtete Schicht von gebundenem Wasser umgibt das Bodenteilchen, benannt als „diffuse Schicht“ oder „diffuse Hülle“. Das angelagerte Wasser hat hochviskose Eigenschaften, wird aber bei geringerem Abstand zur Teilchenoberfläche immer zähflüssiger, bis die erste Molekülschicht direkt an der Oberfläche durch eine sehr hohe Bindungsenergie ($> 500 \text{ MPa}$) an diese gebunden wird. Die Schichtdicke des Adsorptionswassers hängt vom Elektrolytgehalt des Wassers und von der Bodenart ab. Die Gesamtmenge des Adsorptionswassers ist jedoch stark von der Kornverteilungskurve abhängig, ein höherer Feinanteil erhöht die Kornoberfläche, welche dadurch mehr Adsorptionswasser binden kann. Auch ein trockener Boden adsorbiert durch diesen Effekt Wassermoleküle aus der umgebenden Luft, dies wird als hygroskopisches Wasser bezeichnet. (Möller 2016)

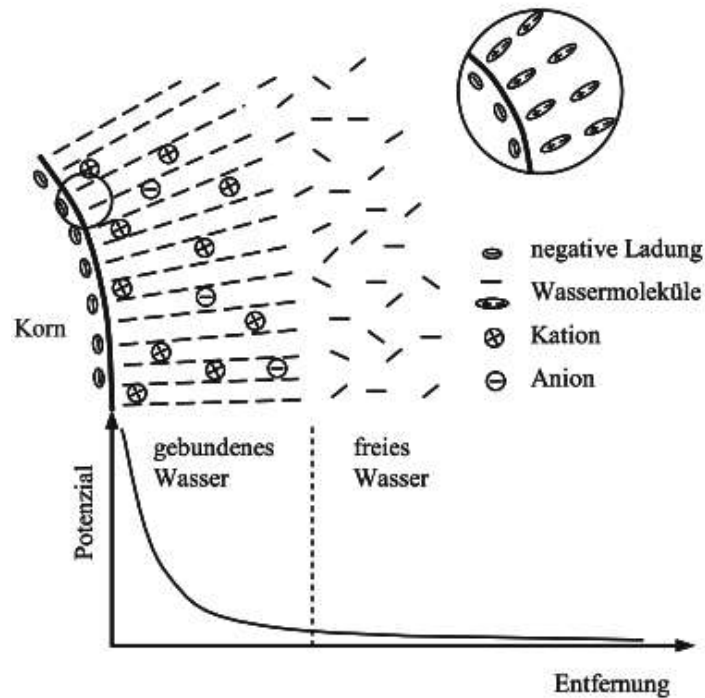


Abb. 14 Wechselwirkung zwischen gebundenem Adsorptionswasser und Mineralteilchen (Boley 2012)

3.2 Porenluft

Porenluft kommt im Boden als freies oder als eingeschlossenes Porengas vor. Im teilgesättigten Bereich spricht man von freiem Porengas, wenn eine direkte Verbindung durch den Porenraum an die Oberfläche besteht. Hier kann durch wenig Energieaufwand die Luft aus dem Boden entweichen und somit kommt es zu keiner Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften.

Das eingeschlossene Porengas ist von Wasser und Bodenteilchen eingesperrt und kann nicht entweichen. Diese Gasblasen sind im Vergleich zu Wasser unter Druck extrem kompressibel und ändern dadurch z.B. die Kompressionsfähigkeit und die Durchlässigkeit des Bodens. (Boley 2012)

3.3 Drei-Phasen-System Boden

Ein Boden besteht in der Regel aus drei Phasen (Abb. 15):

- Die gasförmige Phase - Luft
- Die flüssige Phase - Wasser
- Die feste Phase - Bodenkorn

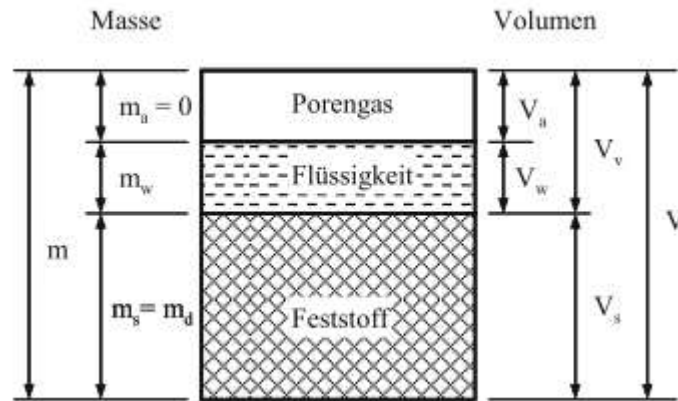


Abb. 15 Drei-Phasen-System im Boden (Boley 2012)

Bei Sättigung von 100 % des Bodens befindet sich kein Porengas mehr im Boden. Es sind nur mehr flüssige und feste Stoffe vorhanden.

3.3.1 Wasser im Boden

- Der gravimetrischer Wassergehalt w [%] ist der Quotient aus der Masse des Wassers m_w [g] Trockenmasse des Bodens m_d [g]. Die Masse des Wassers entspricht dabei dem Faktor aus der Dichte des Wassers ρ_w [g/cm³] und dem Wasservolumen V_w [cm³]. Die Trockenmasse entspricht dem entspricht dem Faktor aus der Trockendichte des Bodens ρ_d [g/cm³] und dem Gesamtvolumen V [cm³].

$$w = \frac{m_w}{m_d} * 100 = \frac{\rho_w * V_w}{\rho_d * V} * 100 \quad (2)$$

- Der Volumetrischer Wassergehalt θ [%] berechnet sich aus dem Wasservolumen und dem Gesamtvolumen

$$\theta = \frac{V_w}{V} * 100 \quad (3)$$

- Zusammenhang zwischen volumetrischen und gravimetrischen Wassergehalt aus (2) und (3)

$$\theta = \frac{\rho_d * w}{\rho_w} ; \quad w = \frac{\rho_w * \theta}{\rho_d} \quad (4)$$

3.3.2 Porezahl und Porenanteil

Die Größe des Porenraumes hängt von der Kornform, der Kornverteilung, der organischen Bestandteile und der Lagerungsdichte ab. Porezahl und Porenanteil sind Kennziffern zur Charakterisierung der Hohlräume des Bodens

- Die Porezahl e [-] (Porenziffer) beschreibt das Verhältnis zwischen Porenvolumen V_v [cm³] und Volumen des Feststoffes V_s [cm³]. Die Porezahl e wird meist über andere Bodenkennwerte berechnet, da das Porenvolumen meist unbekannt ist. So kann es auch aus der Korndichte ρ_s [g/cm³] und dem Gesamtvolumen V und der Trockendichte m_d ermittelt werden.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} = \left(\frac{\rho_s * V}{m_d} - 1 \right) \quad (5)$$

- Der Porenanteil n [-] (Porosität, Porenvolumen) ist das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen V_v und dem Gesamtvolumen V . Wie die Porezahl wird auch der Porenanteil in der Regel aus anderen Bodenkennwerten berechnet.

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s * V} \right) \quad (6)$$

- Wird (5) und (6) gleichgestellt, so ergibt es:

$$\frac{\rho_s * V}{m_d} = 1 + e = \frac{1}{1 - n} ; \quad e = \frac{1}{1 - n} - 1 = \frac{n}{1 - n} \quad (7)$$

$$\frac{m_d}{\rho_s * V} = \frac{1}{1 + e} = 1 - n ; \quad n = 1 - \frac{1}{1 + e} = \frac{e}{1 + e} \quad (8)$$

3.3.3 Der Sättigungsgrad

Der Sättigungsgrad S_r [%] eines Bodens gibt den Anteil von Wasser zum gesamten Porenraum an. Ein Sättigungsgrad von 100 % sagt aus, dass der Boden vollkommen gesättigt ist und sich keine Luft im Boden befindet. Er ist der Quotient aus dem Wasservolumen und dem Porenvolumen (Prinz und Strauß 2011)

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} * 100 = \frac{w * m_d}{\rho_w * (V - V_s)} = \frac{w * \rho_s * V_s}{\rho_w * (V - V_s)} = \frac{w * \rho_s}{\rho_w * e} \quad (9)$$

3.4 Die Porenformen

Betrachtet man einen Querschnitt von Hohlräumen zwischen dichtest bepacktem Sand, so sind ziemlich gleichmäßige Flächen in der Form eines Oktaeders oder Tetraeders mit zur Mitte gebogenen Flächen zu erkennen. Diese körnungsbedingten Poren werden Primärporen genannt.

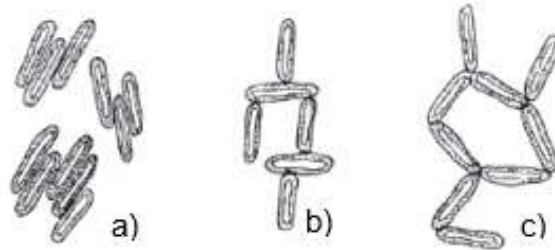


Abb. 16 Porenformen Tonteilchen, a) Fläche an Fläche, b) Kante an Kante, c) Kante an Fläche (Scheffer und Schachtschabel 2010)

Die blättchenförmigen Tonteilchen hingegen können drei unterschiedliche Anordnungen annehmen (Abb. 16): a) Fläche an Fläche, b) Fläche an Kante, c) Kante an Kante. Die Porenformen sind daher abhängig vom gegenseitigen Abstand, dem Salzgehalt des Bodens und dem Ausmaß einer früheren Bewässerung.

Tab. 1 Einteilung der Porengrößenbereich mit Durchmesser und Matrixpotential

Porengrößenbereich	Porendurchmesser (µm)	Matrixpotential (kPa)	pF – Wert
weite Grobporen	> 50	< 6	< 1,8
enge Grobporen	50 – 10	6 – 30	1,8 – 2,5
Mittelporen	10 – 0,2	30 - 1500	2,5 – 4,2
Feinporen	< 0,2	> 1500	> 4,2

Neben den Primärporen gibt es auch noch Sekundärporen auch genannt Makroporen. Die Makroporen entstehen gefügebedingt durch die Einbaudichte. Des Weiteren gehören zu ihnen Wurm- und Wurzelgänge sowie unregelmäßige Hohlräume, die durch Bearbeitungsmaßnahmen entstehen können. Der Boden und somit die Kornverteilung wird in Porengrößen unterteilt. Die Grenzen zwischen diesen Porenbereichen sind an charakteristische Werte des Wasserhaushaltes orientiert. Die Grobporen sind in der Regel wasserfrei und dienen der Belüftung des Bodens. In den Mittelporen ist das Wasser für die Pflanzen verfügbar. Feinporen hingegen halten das Wasser mit einem hohen Potential zurück, sodass es von den meisten heimischen Pflanzen nicht mehr

genutzt werden kann (siehe Feldkapazität und Permanenter Welkepunkt Kap. 3.5.1). Des Weiteren gibt es noch die Innenkorporen. Dies sind Poren, die vollständig im Bodenkorn eingeschlossen sind. (Scheffer und Schachtschabel 2010)

3.5 Das Matrixpotential

Das Matrixpotential (pF – Wert) ist der negative Wert der Saugspannung (Tension, Wasserspannung). Es beschreibt die Bindungsenergie mit der sich Wasser an dem Bodenteilchen festhält. Je weniger Wasser in einem Boden enthalten ist, desto schwerer kann es durch die matrixbedingten Kräfte dem Boden entzogen werden. Geht man von der Grundwasseroberfläche als Bezugspunkt aus, wird das Wasser umso stärker an die Matrix gebunden, je größer die Entfernung zum Grundwasserspiegel (GWS) ist.

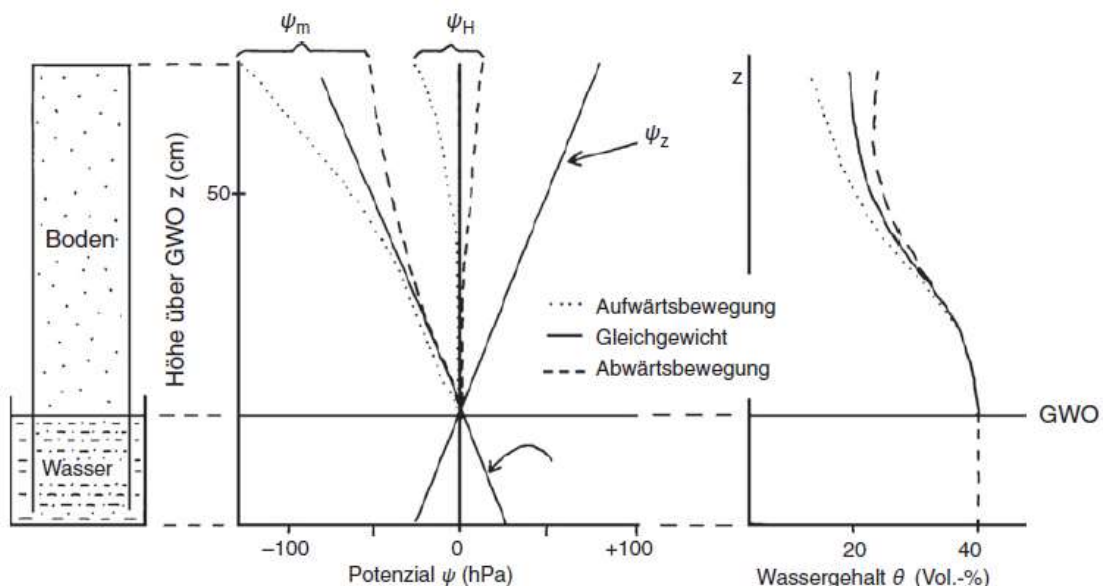


Abb. 17 Hydraulisches Potential Ψ_H , Gravitationspotential Ψ_z , Matrixpotential Ψ_m in einer homogenen Bodensäule. (Scheffer und Schachtschabel 2010)

Betrachtet man in Abb. 17 eine Bodenprobe, die mit dem unteren Ende in einem Wasserbad steht und nach oben hin gegen Verdunstung geschützt ist, so zieht sie Wasser an. Nach einer Weile herrscht hierbei Gleichgewicht, welches durch einen nach oben abnehmenden Wassergehalt gekennzeichnet wird. Das hydraulische Potential ($\Psi_H = \Psi_z + \Psi_m$) ist an allen Stellen des Bodens gleich. Geht man vom WSP als Bezugsebene aus und definiert $\Psi_H = 0$, dann stellt sich das Matrixpotential Ψ_m betragsmäßig mit dem Gravitationspotential Ψ_z gleich. Das Gravitationspotential ist die benötigte Arbeit, um eine bestimmte Wassermenge von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe emporzuheben. Über dem GWS hat das Gravitationspotential somit ein positives und das Matrixpotential ein negatives Vorzeichen. Herrscht Gleichgewicht, so

ist der Verlauf von ψ_m und ψ_z linear. Verdunstet nun Wasser an der Oberfläche, verändert dies das Gleichgewicht. Der negative Wert des Matrixpotentials erhöht sich, das Gravitationspotential bleibt jedoch gleich und demzufolge sinkt das hydraulische Potential bei konstantem Wasserspiegel bis zum GWS auf $\psi_H < 0$. Das heißt das hydraulische Potential wird durch das Verdunsten in den negativen Bereich verschoben. Potentialunterschiede werden immer vom höchsten zum niedrigsten Potential ausgeglichen. Dies ist der Grund für einen Wasserfluss von unten nach oben, da Wasser vom gleichbleibenden GWS nach oben in die Verdunstungszone nachgezogen wird. Wird im entgegengesetzten Fall die Probe von oben bewässert, so sinkt der negative Betrag des Matrixpotentials. Da das Gravitationspotential wieder gleichbleibt, schiebt sich das hydraulische Potential von dem GWS in den positive Bereich $\psi_H > 0$. Die Wasserbewegung findet dann von oben nach unten statt. (Scheffer und Schachtschabel 2010)

3.5.1 Luftkapazität (LK), Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP)

Für Rekultivierungen und Pflanzenbewuchs ist das pflanzenverfügbare Wasser äußerst wichtig. Die Speicherefähigkeit ist abhängig von der Kornverteilung, der Lagerungsdichte und dem Anteil von organischen Substanzen. Das pflanzenverfügbare Wasser befindet sich zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt.

Die **Feldkapazität** ist jenes Wasservolumen, das nach Sättigung des Bodens mit einer Wasserspannung von ≥ 6 kPa gegen die Schwerkraft zurückgehalten wird. Zur Bestimmung wird der Boden bewässert und gegen Evaporation abgedeckt. Wenn sich kein weiterer Wasserverlust aufgrund der Gravitation einstellt, so ist die Feldkapazität erreicht. Bei Saugspannungen unter der Feldkapazität (< 6 kPa) versickert das Wasser im Boden, ohne dass es für die Pflanzen gespeichert werden kann. Dieser Bereich wird **Luftkapazität** genannt.

Tab. 2 Kennwerte des Wasserhaushaltes

weite Grobporen	enge Grobporen	Mittelporen	Feinporen
< 6 kPa	6 – 30 kPa	30 – 1500 kPa	> 1500 kPa
Luftkapazität (LK)	nutzbare Luftkapazität (nFK)		Totwasser
	Feldkapazität (FK)		

Der **permanente Welkepunkt** befindet sich bei einem pF-Wert von 4,2 (ca. 1500 kPa). Der Großteil der mitteleuropäischen Pflanzen ist im Stande, das Bodenwasser mit einer

Saugspannung unter < 1500 kPa zu nutzen. Somit wird der Bereich zwischen Feldkapazität (6 kPa) und permanentem Welkepunkt (1500 kPa) nutzbare Feldkapazität (nFK) genannt. Bei Saugspannungen über dem PWP kann Wasser nicht mehr von Pflanzen angezogen werden. Es wird als Totwasser bezeichnet und tritt als Adsorptions- und Kapillarwasser in den Feinporen auf und ist stark abhängig vom Tongehalt des Bodens. Ein hoher Anteil der Tonfraktion erhöht die benetzte, spezifische Oberfläche und beeinflusst somit den Wassergehalt beim PWP. Zur Bestimmung des PWP muss ein Druck-Membran-Apparat, wie die Drucktopf Methode, mit 1500 kPa verwendet werden. (Boley 2012)

3.6 Die Wasserretentionskurve

Das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung bestimmen die Wassermenge, welche bei einem gewissen Matrixpotential vorherrscht. Die Wasserretentionskurve (Desorptionskurve, Saugspannungskurve, Retentionsfunktion, pF-Kurve, Bodenwassercharakteristik, Matrixpotentialkurve, Wasserspannungscharakteristik) beschreibt den idealisierten Zusammenhang zwischen Matrixpotential und Wassergehalt für einen Boden.

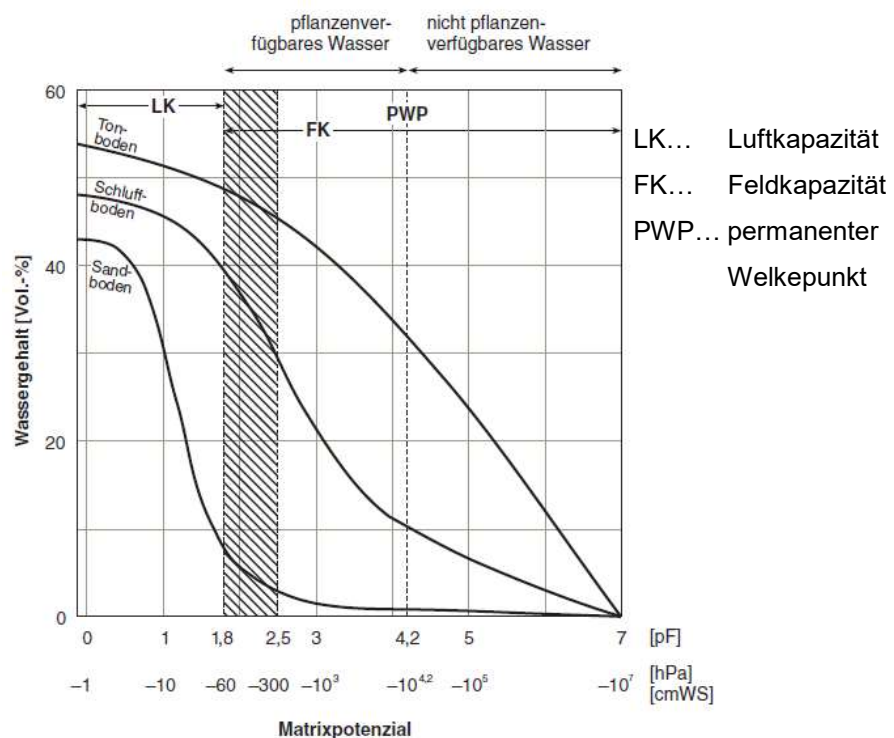


Abb. 18 Wasserretentionskurven von Sand, Schluff und Ton (Scheffer und Schachtschabel 2010)

Drei Wasserretentionskurven für unterschiedliche Kornverteilungen sind in Abb. 18 dargestellt. Alle Funktionen starten bei Vollsättigung, dies entspricht einem volumetrischen Wassergehalt von 43 – 53 % und einem Matrixpotential von 0 hPa. Bei dem Sand fällt die Kurve gleich zu Beginn steil ab. Es wird nur ein geringes Matrixpotential von -6 kPa benötigt, um den volumetrischen Wassergehalt Θ auf 10 % zu reduzieren. Das bedeutet, der größte Teil des entzogenen Wassers ist in Grobporen enthalten und das restliche Wasser wird durch Adsorptionskräfte um die Körner und deren Kontaktstellen und durch Kapillarkräfte zurückgehalten. In der Praxis ist dies daran erkennbar, dass Sand eine ziemlich klare Grenze der kapillaren Saugfähigkeit über dem Grundwasserspiegel aufweist.

Der Anteil an Feinporen ist bei Schluff und Ton hingegen deutlich höher. Je größer der Feinanteil der Kornverteilung ist, desto betragsmäßig größer muss das Matrixpotential sein, um dem Boden Wasser zu entziehen. Bei gleichbleibenden Wassergehalt steigt das Matrixpotential mit der Feinheit der Porenverteilung an (Sand < Schluff < Ton).

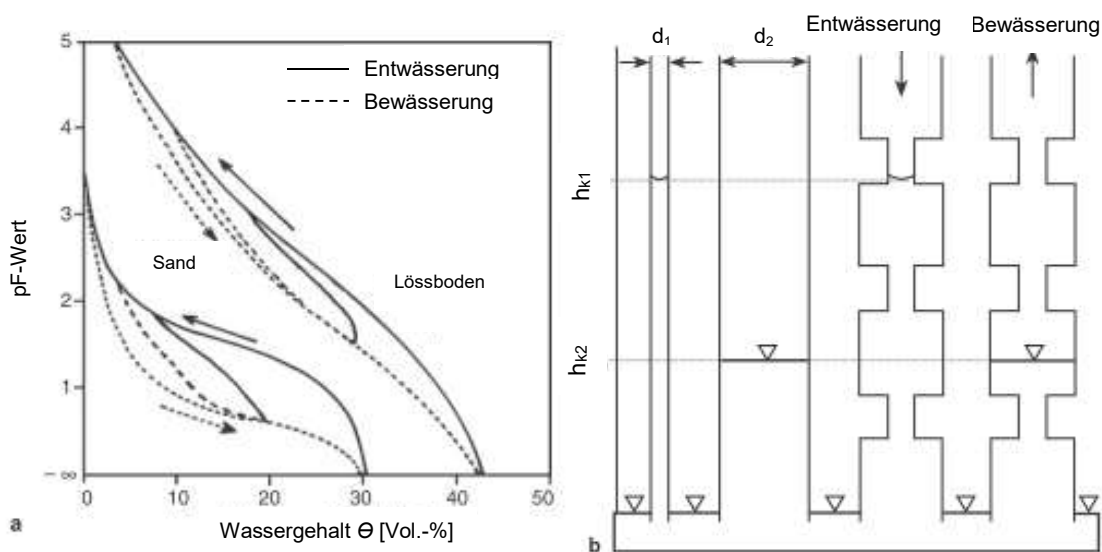


Abb. 19 Einfluss der Hysterese bei Sand und Schluff (links); Potentialunterschiede in Be- und Entwässerung (rechts) (Scheffer und Schachtschabel 2010)

Neben der Kornverteilung hat auch die Lagerungsdichte und die Richtung der Wassergehaltsänderung großen Einfluss auf die Wasserretentionskurve. Eine Veränderung der Lagerungsdichte wirkt sich am stärksten auf die sekundären Grobporen aus. Somit ist auch die Änderung des Matrixpotentials im Bereich niedriger Saugspannungen groß, speziell im Bereich von 0 kPa – 6 kPa, wirkt sich das Porenvolumen auf den Wassergehalt bei Vollsättigung aus. Eine geringe Lagerungsdichte hat die Bildung von Makroporen zur Folge. Diese werden mit einer

verhältnismäßig großen Wassermenge gefüllt, können aber das Wasser nur gegen geringe Saugspannungen halten (siehe Tab. 2).

Die Wasserretentionskurve ist auch sehr stark von der Richtung der Wassergehaltänderung abhängig. Der Verlauf der Entwässerungskurve eines Bodens unterscheidet sich zum Verlauf der Bewässerungskurve. Dieser Unterschied stellt eine typische Hysterese dar. Ursachen für die Hysterese sind die gegensätzliche Wirkung von Porenengpässen in der Ent- oder Bewässerung und die damit verbundenen unterschiedlichen Luftinklusionen. In Abb. 19 ist dieser Effekt dargestellt. In der Entwässerung entleeren sich Grobporen vor den Feinporen. Feinporen bzw. Porenengpässe können aufgrund von höheren Kapillarkräften die Entwässerung von darunterliegenden Grobporen verzögern. Die kapillare Steighöhe der Feinporen wird hier mit h_{k1} beschrieben. Die Feinporen halten das Wasser gegen ein höheres Matrixpotential zurück. (siehe Abb. 19b). Während einer langsamen Bewässerungsphase hingegen, sättigen sich die kleineren Poren zuerst durch die Kapillarität. Die Grobporen weisen einen zu großen Durchmesser auf, um durch die Kapillarwirkung vollständig gesättigt zu werden. Die kapillare Steighöhe der Grobporen ist hier als h_{k2} bezeichnet. Sie entspricht der Höhe des Wasserspiegels. Deswegen ergibt sich bei gleichen Wassergehalt ein höheres Matrixpotential aus der Entwässerungskurve gegenüber der Bewässerungskurve. (Scheffer und Schachtschabel 2010)

4 Eigenschaften der Versuchsböden

Bei den verwendeten Versuchsböden handelt es sich um zusammengesetzte Böden aus Schluff und Sand. Sie werden künstlich im Labor hergestellt, da größere Mengen für die Versuchsdurchführung benötigt werden. Dies ermöglicht eine gute Reproduzierbarkeit und gewährleistet eine gleichbleibende Kornverteilung.

4.1 Zusammensetzung der Versuchsböden

Das Verhältnis der Masseanteile wurde im Vorhinein für alle drei Böden im Projekt vorgegeben.

- „Boden 1“: Ein schluffiger Sandboden (ca. 70 % Sa, 30 % Si)
- „Boden 2“: Ein sandiger Schluff (ca. 70 % Si, 30 % Sa)
- „Boden 3“: Ein Schluff/Sand Gemisch, intermittierend gestuft bei 40 % – 50 % Masse, Ausfallkörnung im Bereich des Feinsandes

Die Ausgangsmaterialien dafür stammen aus einem Schotterwerk aus der Obersteiermark und werden als enggestufter Mittelsand (MSa), leicht schluffiger Feinsand, (FSa) und leicht toniger Schluff (Si) unterteilt (siehe Abb. 20). Die beiden Sande stammen hierbei aus der Siebanlage des Schotterwerkes, der Schluff hingegen wird aus der Filterkammerpresse entnommen.

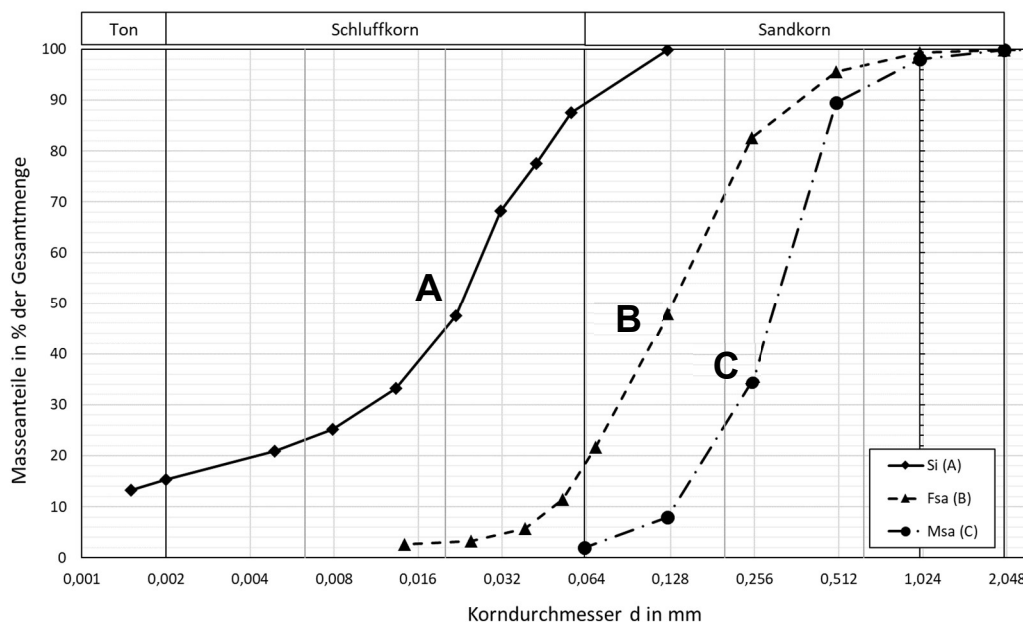


Abb. 20 Kornverteilung der Ausgangsmaterialien

4 Eigenschaften der Versuchsböden

Die projektbezogenen Kornverteilungen der Versuchsböden werden durch folgendes Mischverhältnis der Trockenmassen erreicht (Abb. 21):

- „Boden 1“: 20 % Si (A) + 80 % FSa (B)
- „Boden 2“: 65 % Si (A) + 35 % FSa (B)
- „Boden 3“: 60 % Si (A) + 40 % MSa (C)

Die sich daraus ergebenden Kornverteilungskurven wurden durch eine kombinierte Sieb- und Schlämmanalyse gemäß ÖNORM EN ISO 17892-4:2017 ermittelt.

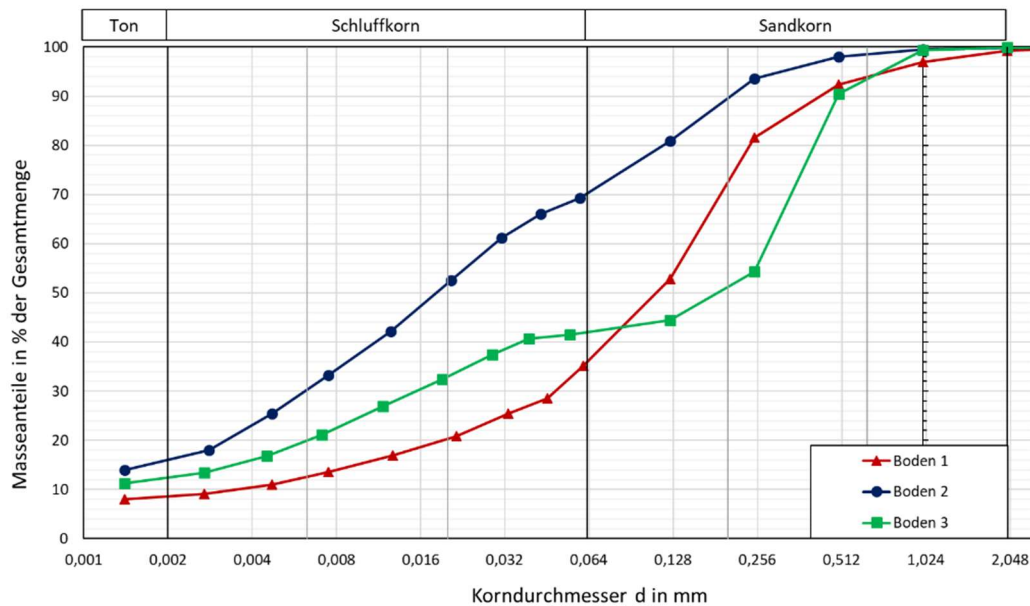


Abb. 21 Kornverteilung Versuchsböden 1, 2, 3

Vollständigkeitshalber ist noch zu erwähnen, dass sich im Schluff auch Masseanteile der Tonfraktion wiederfinden. Deswegen weisen alle Versuchsböden einen Anteil von 8 % - 17% Ton auf.

Tab. 3 Zusammensetzung der Versuchsböden

Bezeichnung	Bodenart	Ton	Schluff	Sand
„Boden 1“	cl' si Sa	8 %	27 %	65 %
„Boden 2“	cl sa Si	17 %	53 %	30 %
„Boden 3“	cl' si Sa	13 %	30 %	57 %

4.2 Bestimmung der Bodenparameter

Im geotechnischen Labor der TU Graz wurden zusätzlich zur Korngrößenverteilung die Proctordichte und der optimale Wassergehalt im Standard Proctorversuch ermittelt. Die Bestimmung der gesättigten Durchlässigkeit erfolgte in der triaxialen Durchlässigkeitszelle. Weiters wurden die Korndichten mittels Pyknometer sowie die Konsistenzgrenzen im Kegelfallversuch ermittelt. Die Ergebnisse der labortechnischen Versuche sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4 Zusammenstellung der Bodenmechanischen Untersuchungsergebnisse

Labornummer			19950-1	19950-2	19950-3
Bezeichnung			„Boden 1“	„Boden 2“	„Boden 3“
Korndichte	ÖN B 4413:2010	ρ_s g/cm ³	2,78	2,74	2,7
Optimaler Wassergehalt	ÖN EN 13286-2 und ÖN B 418:2007	w_{opt} %	13,5	13,1	10,6
Proctordichte		ρ_{Pr} g/cm ³	1,91	1,98	2,05
Durchlässigkeit	ÖN B 4422-1:1992	k_{10} m/s	1,9E-7	4,8E-8	1,6E-6
Fließgrenze		w_L %	22,5	22,6	18,4
Ausrollgrenze	ÖN B 4411:2009	w_P %	22,0	17,6	14,2
Plastizitätszahl		I_P %	0,5	4,9	4,2

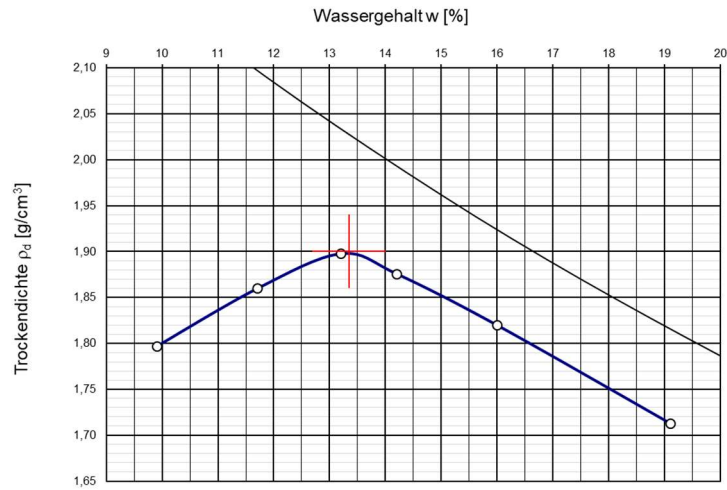


Abb. 22 Proctorkurve Boden 1

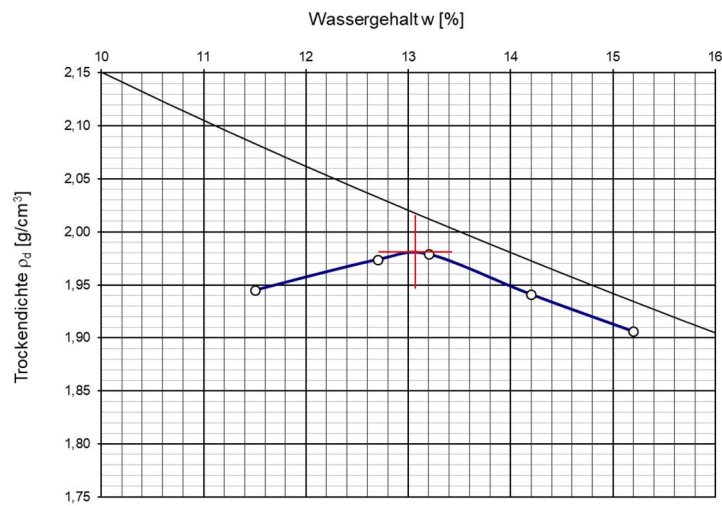


Abb. 23 Proctorkurve Boden 2

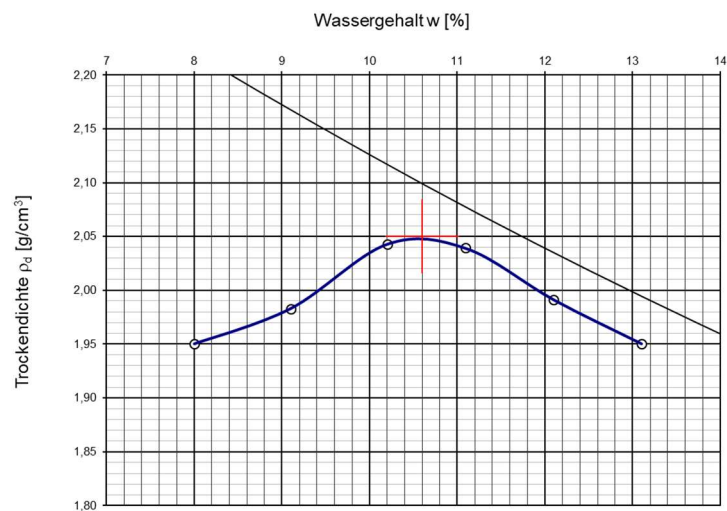


Abb. 24 Proctorkurve Boden 3

4.3 Hyprop Versuch

Der Hyprop Versuch dient zur Messung bodenhydraulischer Kennfunktionen nach dem Verdunstungsprinzip. Dieses Verfahren wurde von Wind (1968) und in weiterer Folge von Schindler (1980) adaptiert. Dadurch kann die Wasserretentionskurve und die ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit zwischen Vollsättigung und einer Saugspannung von ca. 1500 kPa (entspricht dem permanenten Welkepunkt) bestimmt werden. (Schick 2002)

4.3.1 Funktionsprinzip

Das Hyprop System der Firma UMS besteht aus einem Edelstahlring mit einem Volumen von 250 cm³, zwei Tensiometerkerzen, einer Sensoreinheit mit eingebauten Drucksensoren, einer Waage und der Software TensioView (Abb. 25).

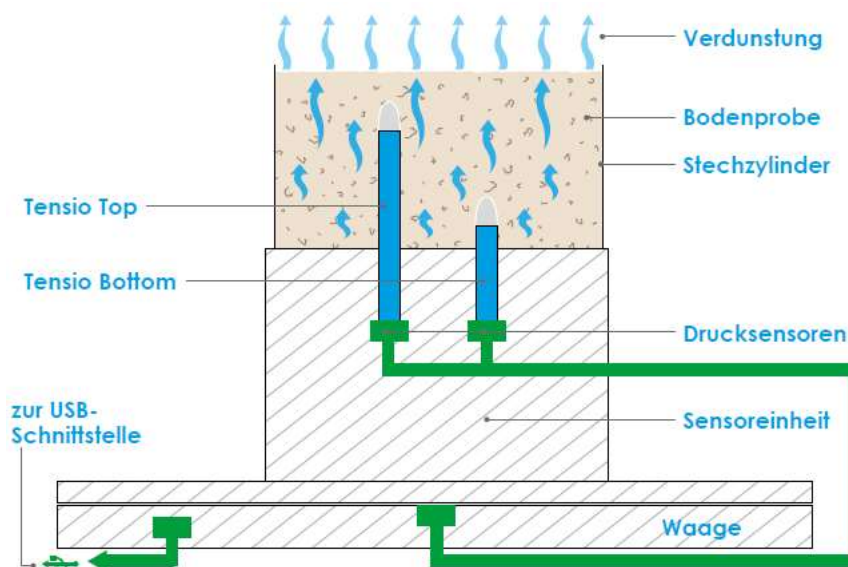


Abb. 25 Funktionsprinzip Hyprop (UMS Hyprop 2015)

Die Tensiometer werden über eine Bohrung in der Sensoreinheit auf die Druckmembran geschraubt. Die Tensiometerkerzen haben einen Durchmesser von 0,5 cm und sind mit einer Keramikspitze (Al₂O₃ – Sinter) bestückt. Die Keramik stellt den Kapillarkontakt zwischen dem Wasser im Boden, dem entgasteten Wasser im Tensiometerschaft und der Sensormembran her. Verdunstet das Wasser aus der gesättigten Probe, steigt die Saugspannung im Boden. Das Bodenmaterial gleicht diesen Potentialunterschied aus und versucht Wasser aus dem Tensiometerschaft zu ziehen. Die Sensoreinheit misst dabei die Saugspannungen, die auf die Membran übertragen werden. Gleichzeitig wird die Masse des verdunstenden Wassers gemessen und mit den Messpunkten in Beziehung gesetzt. Für die Auswertung der

Wasserretentionskurve werden die Saugspannungen zwischen dem oberen und unteren Tensiometer letztendlich gemittelt.

Der Begriff Saugspannung (Tension, Matrixpotential, Wasserspannungswert, pF-Wert) bezieht sich auf die Bindungsenergie, mit der Wasser durch Kapillarität und Adhäsion an Bodenteilchen gebunden ist. In der Bodenkunde wird als Einheit oft der pF-Wert angegeben. Dies ist der dekadische Logarithmus der Druckhöhe in Zentimeter (zB. $pF\ 2 = 100\ \text{cm}\ \text{WS} = 100\ \text{hPa} = 10\ \text{kPa}$).

4.3.2 Versuchsaufbau

Zu Beginn wird der zu untersuchende Boden in den UMS Stechzylinder mit der gewünschten Lagerungsdichte eingepresst. Daraufhin folgt die Sättigungsphase des Stechzylinders (STZ) in einem Wasserbad mit entgastem und entionisiertem Wasser. Die Sättigungsdauer ist stark vom Versuchsboden abhängig. So wird bei Sand schon nach wenigen Stunden, bei Schluff und Ton erst nach mehreren Tagen die Wassersättigung erreicht. Gleichzeitig erfolgt die Präparation der Tensiometerkerzen und des Hyprop Gerätes. Es ist äußerst wichtig, die Kerzen und den Hyprop mit entgastem und entionisiertem Wasser zu befüllen und Luftblasen aus dem System zu entfernen. Dafür sollten die trockenen Keramikspitzen zuerst 24 h im entgastem Wasser eingelegt werden, damit sich die Kapillaren der Keramik mit dem Wasser füllen. Die Schäfte der Kerzen werden durch einen Unterdruck von min. 0,8 bar befüllt. Dies erfolgt entweder mit einer Vakuumpumpe oder mit speziellen Füllspritzen. Durch den Unterdruck wird dabei das entgaste Wasser durch die Keramikspitze in den Kerzenschaft gezogen und eingeschlossene Luftbläschen abgesaugt. Die Druckmembrane befinden sich in einer Bohrung am Sensorkopf. Für ein geschlossenes System ohne Luftblasen, wird auch diese Bohrung mit Wasser befüllt und durch das Vakuum entlüftet. Sind die Tensiometer einmal entgast, muss die Keramikspitze mit einer Schutzkappe feucht gehalten werden, da die Spitze ansonsten austrocknet und Luft in die Kerze gesogen wird. Nachdem die Keramikkerzen an die Membrane geschraubt werden, dürfen innerhalb der Kerze keine Luftblasen vorhanden sein. Hierbei ist unbedingt darauf zu achten, dass die Sensormembran nicht zerstört wird. Der maximale Druck auf die Membran darf 3000 hPa nicht übersteigen. Der Hyprop muss für den Einbau der Tensiometerkerzen daher mit dem PC verbunden sein, da die Software TensioView die Live Anzeige für den Druck auf die Membran bietet. Danach werden für die Tensiometer zwei Löcher in die gesättigten STZ gebohrt und der STZ auf den Hyprop gesteckt (Der Hyprop bleibt von nun an am PC angeschlossen). Durch regelmäßiges Wiegen des Hyprop Gerätes wird der Wasserverlust durch Verdunstung

aufgezeichnet. Während des gesamten Vorgangs erfasst die Software die Änderungen in der Saugspannung. Somit ergibt sich für jeden Messzeitpunkt eine Saugspannung–Wassergehalt-Beziehung, also die Wasserretentionskurve. (UMS Hyprop 2015)

Die optimale Messung einer Retentionskurve läuft in 4 Phasen ab (Abb. 26).

- In Phase 1 finden die regulären Messungen statt. Die Saugspannung steigt ohne Verflachen bis zum Erreichen des Dampfdruckes.
- Danach folgt die Siedeverzugsphase. Hier erreicht die Saugspannung den Dampfdruck des Wassers. Im Idealfall steigt der Tensionswert auf > 850 hPa.
- In der Kavitationsphase bildet sich Wasserdampf im Tensiometer und die Saugspannung fällt schlagartig auf den Siedepunktswert ab. Der Tensionswert nimmt nur geringfügig ab.
- Phase 4 ist die Lufteintrittsphase. Hier wird Luft durch die poröse Keramik in den Schaft gesaugt. Es folgt ein Potentialausgleich mit dem atmosphärischen Luftdruck, sodass Saugspannung auf 0 hPa abfällt. Der Lufteintrittspunkt ist ein Materialkennwert der Keramik und liegt bei 8800 hPa. Er wird in der Messkurve nicht mehr vom Tensiometer erfasst und kann daher nur von der Software extrapoliert werden.

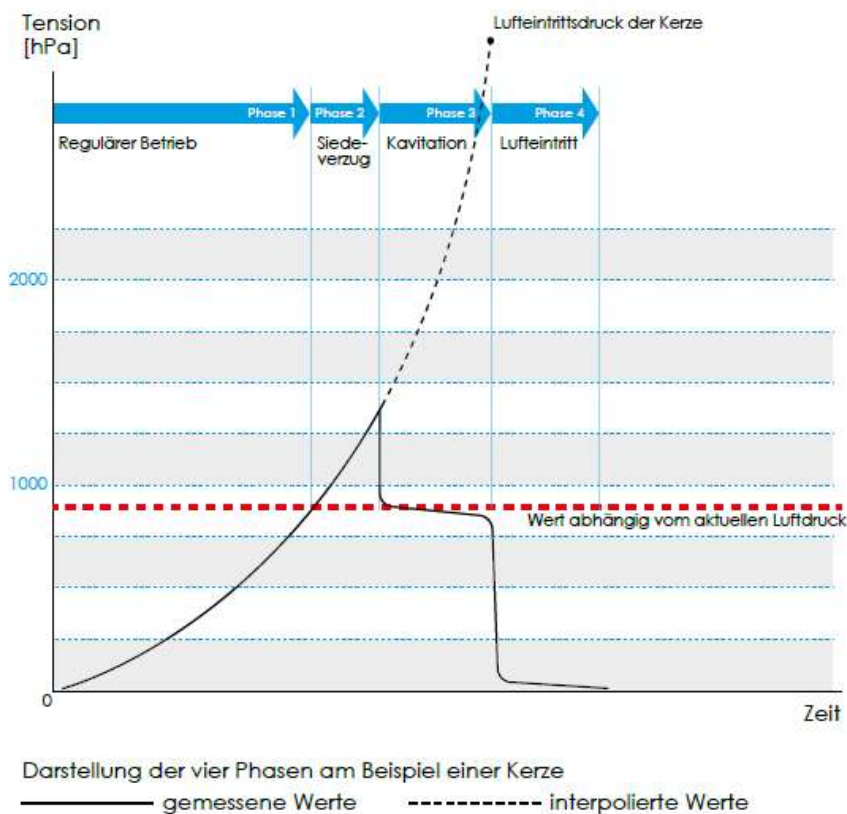


Abb. 26 Optimale Messkurve Hyprop, (UMS Hyprop 2015)

Für die Auswertung ist eine optimale Messkurve nicht nötig. In der Praxis ist speziell Phase 2 oft nur schwach ausgeprägt und es wird schnell die Kavitationsphase erreicht. (UMS Hyprop 2015)

4.3.3 Versuchsdurchführung

Mit der Wasserretentionskurve eines Bodens kann über die Saugspannung auf den Wassergehalt und somit auf den Sättigungsgrad des Bodens geschlossen werden. Betreffend dieses Verhältnis wird in dieser Arbeit untersucht, ob sich die Ergebnisse des Hyprop Versuchs auch mit Ergebnissen des Hauptversuches decken bzw. verbinden lassen. Dafür wurden die Wasserretentionskurven für mehrere Trockendichten ermittelt.

Die Durchführung des Hyprop Versuchs erfolgte im Labor des Institutes für Erdwissenschaften der Karl-Franzens-Universität Graz. Die erste Versuchsreihe wurde mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ und die zweite Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ durchgeführt. Je Boden und Trockendichte wurden zwei Stechzylinder für den Versuch hergestellt. Mittels einer hydraulischen Presse wurde das Material in zwei Schichten zu je 2,5 cm mit den benötigten Trockendichten eingepresst.

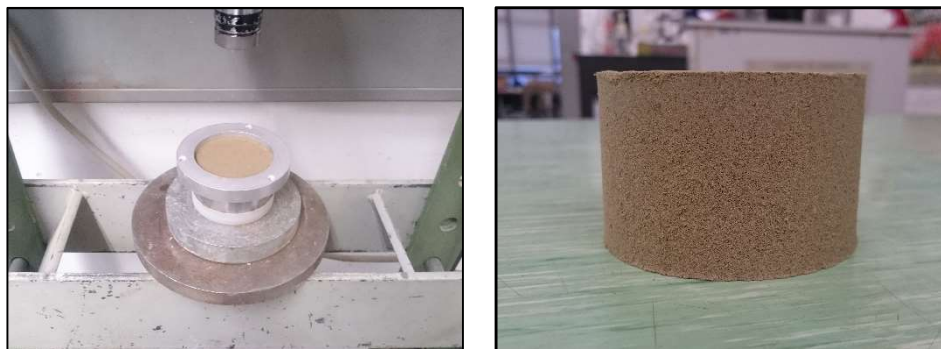


Abb. 27 Herstellung im Stechzylinders (links), Probenkörper Boden 1 (rechts)

Abb. 27 zeigt, dass mit dieser Methode ein sehr homogener Probenkörper erstellt werden kann. Die Aufsättigung der STZ erfolgte über die Kapillarwirkung der Böden mit entionisiertem & entgastem Wasser. Der Wasserspiegel im Sättigungsbecken wurde in einem Zeitintervall von ca. 8h um 1 cm erhöht. Ein über die STZ gespanntes Filtertuch verhindert hierbei, dass Feinanteile aus dem Boden geschwemmt werden.

Das Entgasen der Tensiometerkerzen erfolgte mit einer Vakuumpumpe. Diese ist im Stande einen Unterdruck von 0,90 bar zu erzeugen. Dieses hohe Vakuum zieht die Luftblasen aus dem System und gewährleistet eine optimale Entgasung der Tensiometerkerzen und der Sensormembran.

Nachdem die Kerzen in das Hyprop Gehäuse geschraubt wurden, konnte das Ansprechverhalten der Tensiometer getestet werden. Dabei werden die Keramikkerzen mit einem Papiertuch abgetrocknet. Die Saugspannung soll dabei innerhalb von 15 s auf ca. 800 hPa steigen. Sobald dieser Wert erreicht ist, muss die Keramikspitze wieder mit Wasser befeuchtet werden, da sonst Luft in die Kerze gesaugt wird und der Entgasungsprozess wiederholt werden muss. (UMS Hyprop 2015)

In den Probenkörper wurden zwei unterschiedlich lange Löcher für die lange und kurze Tensiometerkerze gebohrt und der Hyprop dann auf den STZ gesetzt. Für jedes Wiegen muss der Hyprop vom PC getrennt werden. Die Software erfasst dadurch automatisch welcher Hyprop auf die Waage gestellt wird und kann den Gewichtsverlust, durch Verdampfen des Wassers, dokumentieren. Die Proben wurden zweimal täglich abgewogen. Der Wassergehalt zwischen den Messzeitpunkten wurde vom Programm TensioView linear interpoliert.

4.3.4 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgte ebenfalls mit dem Programm TensioView. Im Vorfeld muss jedoch der exakte Sättigungsgrad der Bodenproben bestimmt werden. Durch Trocknen der Bodenprobe und Bestimmung der Trockenmasse m_d können der Anfangswassergehalt und die tatsächliche Trockendichte bestimmt werden.

$$e = \frac{V * \rho_s}{m_d} \quad \text{aus (7)}$$

$$S_r = \frac{w * \rho_s}{e * \rho_w} \quad \text{aus (9)}$$

Obwohl die gesättigten Böden einen Sättigungsgrad von 100 % aufweisen sollten, stellte sich bei der Rückwägung der Stechzylinder heraus, dass sich alle Proben im Bereich von 85 % - 95 % Sättigung befanden. Dieser Unterschied im Sättigungsgrad wurde mit zwei eigenen Versuchen untersucht (siehe Kap. 4.4).

Der Hyprop mittelt die gemessene Saugspannung der oberen und unteren Tensiometerkerze. Um zu kontrollieren ob die Messergebnisse Deckungsgleich sind, wurden für jeden Versuchsboden zwei Hyprop Versuche gestartet. Die Daten dieser zwei Versuche wurden übereinandergelegt. In Abb. 28 sind Messpunkte von STZ 25 (rot) und STZ 26 (blau) ersichtlich. Die Wasserretentionskurve wurde dann an die gesamten Messpunkte gefittet. Da die Software von $S_r = 1$ ausgeht, tatsächlich aber nur $S_r = 85 - 95$ % erreicht wurde (Tab. 6 & Tab. 7), muss für die Fitting Kurve ein

Anfangswassergehalt vorgegeben werden. Dieser wurde aus den Ergebnissen des Hyprop Versuchs auf den Wassergehalt bei Sättigung Θ_s extrapoliert. Dies ist auch der Grund, warum das Fitting im Bereich zwischen 0 – 1 kPa nicht mit den Messpunkten übereinstimmt. Für die Fitting Kurve wurde das Van Genuchten/Mualem Modell gewählt. Der Bodenwassergehalt ist als eine Funktion der Druckhöhe gegeben durch Gleichung (10) und (11) (Mualem 1976). Das kombinierte Van Genuchten/Mualem Model (van Genuchten 1980) in Gleichung (12) enthält vier unabhängige Parameter (Θ_r , Θ_s , α , n). Der Wassergehalt bei Sättigung kann theoretisch berechnet werden und der residuale Wassergehalt wird im Versuch bestimmt. Er ist in dem Punkt definiert, in dem sich das Matrixpotential einer horizontalen Tangente annähert. Diese vier unabhängigen Parameter können im Programm TensioView zum optimalen Fitting vorgegeben werden.

$$\theta = \frac{\Theta_s - \theta}{\Theta_s - \Theta_r} \quad (10)$$

$$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha^h)^n} \right]^m \quad (11)$$

$$\theta = \frac{(\Theta_s - \Theta_r)}{[1 + (\alpha^h)^n]^m} \quad (12)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (13)$$

- Θ momentaner Wassergehalt [Vol. %]
- Θ_s Wassergehalt bei Sättigung [Vol. %]
- Θ_r residueller Wassergehalt [Vol. %]
- α Konstante, entspricht Wendepunkt der Retentionskurve [1/hPa]
- h Matrixpotential [cm WS, hPa]
- n Konstante, beschreibt die Steilheit der Retentionskurve [-]
- m Fitting Parameter [-]

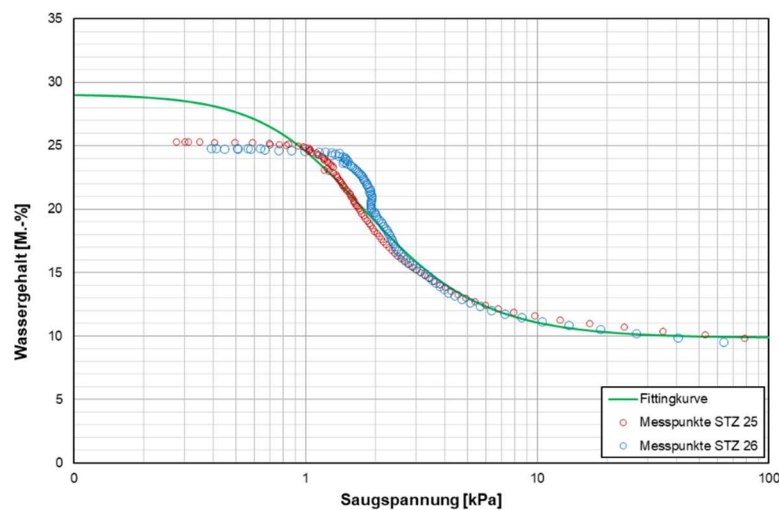


Abb. 28 Fitting Kurve mit Messpunkten; Boden 3, $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$

4.4 Versuch zur Bestimmung des Sättigungsgrades der STZ

Dadurch, dass die Ergebnisse des Hyprop Versuches einen Sättigungsgrad $< 100\%$ liefern, wurden zwei weitere Versuchsreihen durchgeführt. Hierbei sollte der Sättigungsgrad der Stechzylinder vor dem Einbau ins Hyprop Gerät ermittelt werden. Diese Versuche sollten erörtern, inwieweit die Sättigungsmethode und das Einbauprozedere des Hyprop Versuches den Sättigungsgrad beeinflussen. Die beiden Versuche sind als „Versuch STZ 1“, und „Versuch STZ 2“ benannt.

4.4.1 Versuch STZ 1: Aufsättigung der STZ mit dem Fokus auf eine längere Sättigungsdauer

Um zu kontrollieren welchen Sättigungsgrad die Böden tatsächlich nach der Sättigungsphase vorweisen, wurden 15 STZ mit „Boden 1“ und $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ eingepresst. Die Proben sind auf einem Gitterrost am Wannboden platziert worden, um die Kontaktfläche auf den Boden zu reduzieren. Die Wanne wurde mit entgastem und entionisiertem Wasser gesättigt (siehe Abb. 29). Ein Filtertuch schützte hierbei gegen ein Ausschwemmen der Feinanteile. Der Sättigungsvorgang sollte wie beim Hyprop Versuch nur über die Kapillarwirkung erfolgen. Daher wurde von 0 - 4,5 cm zweimal am Tag 1 cm Wasser eingefüllt. Der Wasserspiegel wurde bis ca. 4,5 cm aufgefüllt und nach Entnahme eines STZs konstant auf 4,5 cm gehalten. Dies entspricht der Unterkante der Plastikkappen, welche die STZ vor Verdunstung schützen sollen. Die erste Entnahme eines Stechzylinders erfolgte unmittelbar nach der Sättigung auf Wasserspiegel 4,5 cm. Die weiteren wurden in den darauffolgenden Tagen entnommen, jeweils eine Probe morgens und eine Probe abends. Die STZ wurden sofort nach dem Herausnehmen aus dem Sättigungsbad in eine Schüssel gegeben und zur Wassergehaltsbestimmung abgewogen. Der Versuch sollte zeigen, ob sich der Sättigungsgrad über längere Zeit noch erhöht. Dies würde bedeuten, dass sich gewisse Kapillare erst unter längerem Sättigen füllen.

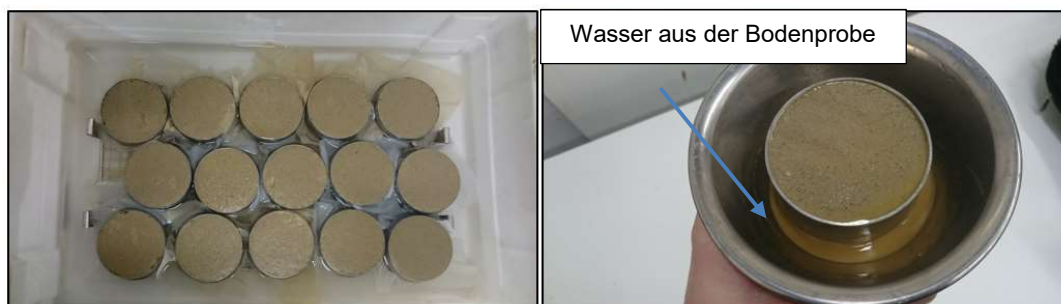


Abb. 29 STZ im Sättigungsbad (links); STZ nach Entnahme aus dem Sättigungsbad (rechts)

Abb. 30 zeigt, dass sich alle Bodenproben in einem Sättigungsbereich von 92 % - 95 % befinden. Nur der erste Punkt weist eine Sättigung < 90 % auf. Dieser Stechzylinder wurde jedoch direkt nach dem Auffüllen des letzten Sättigungsschrittes entnommen und kann deswegen als noch nicht gesättigt angesehen werden.

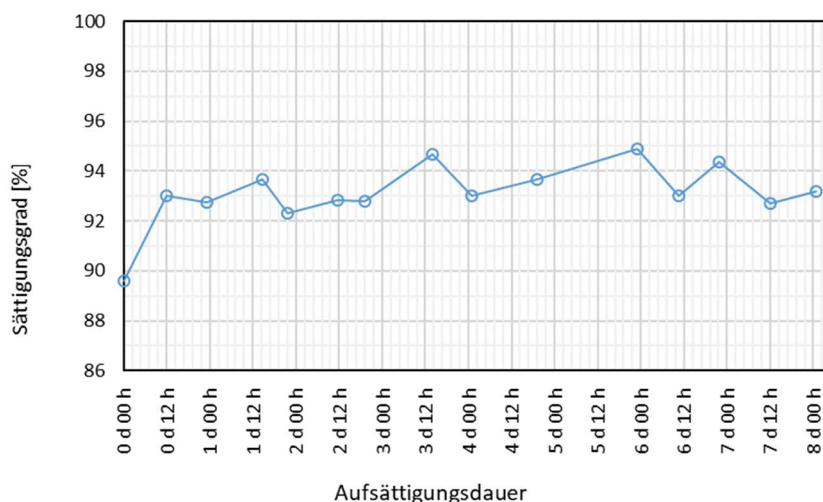


Abb. 30 STZ mit „Boden 1“ und Fokus auf eine Aufsättigung über längere Zeit im Sättigungsbad

4.4.2 Versuch STZ 2: Aufsättigung der STZ mit Fokus auf die Kontrolle des Sättigungsgrades vor Einbau in den Hyprop

Tab. 5 Sättigungsgrad vor dem Einbau in das Hyprop Gerät.

Bodenart	STZ Nr	m_{STZ} [g]	$m_{Beh.}$ [g]	$m_{Beh.} + m_{STZ} + m_{sat^*}$ [g]	$m_{Beh.} + m_{STZ} + m_d$ [g]	w [g]	e [-]	ρ_d [g/cm ³]	S_r [-]
„Boden 1“	13	206,4	94,8	822,1	732,0	0,220	0,628	1,71	0,974
„Boden 1“	14	206,6	121,4	849,1	759,7	0,221	0,629	1,71	0,978
„Boden 2“	17	205,0	120,6	842,3	749,8	0,218	0,615	1,70	0,986
„Boden 2“	18	206,2	93,7	816,2	724,1	0,217	0,615	1,70	0,982
„Boden 3“	21	206,2	125,0	844,0	758,9	0,199	0,578	1,71	0,957
„Boden 3“	22	206,7	205,8	927,3	841,2	0,201	0,575	1,71	0,972

Bei der zweiten Hyprop Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ wurde die doppelte Anzahl an STZ mit Versuchsböden eingepresst. Für jeden STZ der in einem Hyprop eingebaut wurde, wurde ein STZ direkt aus dem Sättigungsbad entnommen und der

Sättigungsgrad bestimmt. Somit konnte für jeden Boden der Sättigungsgrad vor dem Einbau in das Hyprop Gerät ermittelt werden. Die Ergebnisse in Tab. 5 zeigen einen Sättigungsgrad nahe 100 %.

4.4.3 Interpretation der Ergebnisse

„Versuch STZ 1“ veranschaulicht, dass auch längeres Sättigen keine signifikante Erhöhung des Sättigungsgrades der Bodenproben bewirkt. Das Sättigungsverfahren wurde gleich durchgeführt wie beim Hyprop Versuch. Wie die Auswertung zeigt, stellte sich bei allen Bodenproben ein Sättigungsgrad von ca. 92 – 94 % ein (siehe Abb. 30). Die Schwankungen zeigen keine Tendenz aufgrund einer längeren Sättigungsdauer, sondern weisen eher auf ungleiche Größen der Porenräume bedingt durch Lagerungsdichte und Heterogenität des Bodenmaterials. Obwohl Lagerungsdichte und Kornverteilung bei allen STZ gleich ist, kann niemals eine gleiche Aufteilung der Kapillarporen erreicht werden.

Mit „Versuch STZ 2“ sollte der Sättigungsgrad direkt vor Einbau des Hyprop Gerätes untersucht werden. Vergleicht man Tab. 5 mit den Ergebnissen des Hyprop Versuchs aus Tab. 7 so ist ersichtlich, dass der Sättigungsgrad vor Einbau um ca. 5 % höher ist, als zu Beginn des Hyprop Versuchs dokumentiert. Dies lässt darauf schließen, dass durch den Einbauprozess in den Hyprop Wasser aus der Bodenprobe entrinnt. Wenn ein STZ aus dem Sättigungsbad genommen wird, erkennt man augenscheinlich, dass der Wasserfilm an der Oberfläche sofort verschwindet. Die Grobporen können das Kapillarwasser nicht gegen die Schwerkraft halten, dadurch fließt ein Teil des Wassers sofort nach Herausnahme des Stechzylinders aus dem Boden (siehe Abb. 29). Um diesen Wasserverlust zu minimieren, wurden das Bohren der Tensiometerlöcher und das Aufsetzen der Sensoreinheit noch im Sättigungsbad durchgeführt. Die verlorene Wassermenge für 100 % Sättigung setzt sich wahrscheinlich aus solch einem gravimetrischen Verlust beim Herausnehmen aus dem Sättigungsbad und einem Verlust durch das Einbauprozedere zusammen.

Die Ergebnisse dieser beiden Sättigungsversuche zeigen, dass „Boden 1“ bei gleichem Sättigungsverfahren einen höheren Sättigungsgrad erreicht, wenn ρ_d ebenfalls größer ist. Bei dichterem Einbau verringert sich der Porenraum. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl an Grobporen überproportional im Vergleich zu kleineren Poren abnimmt. Somit verändert sich das Verhältnis zwischen Grob- und Mittelporen. Dies führt zu einem erhöhten Sättigungsgrad, da die Makroporen das Porenwasser nicht gegen die Schwerkraft zurückhalten können.

4.5 Interpretation der Hyprop Versuche

Die Retentionskurve spiegelt die Korn- bzw. die Porenverteilung wieder. Abb. 31 und Abb. 32 stellen die Wasserretentionskurven der Versuchsböden für die Trockendichten $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ und $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ dar. Für die Auswertung wurde nur der Detailbereich der Wasserretentionskurve von 0 – 100 kPa betrachtet, da dieser für die weiteren Versuche von Bedeutung ist. Durch die Aufgabenstellung ist das Hauptaugenmerk auf niedrige Saugspannungen unter 20 kPa gerichtet.

Alle Böden der ersten Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ starten bei einem gravimetrischen Wassergehalt bei Sättigung von knapp unter 30 %. Durch die geringe Lagerungsdichte ist der Anteil an Grobporen sehr hoch und die Böden verlieren schon bei niedrigen Saugspannungen Wasser. „Boden 3“ beginnt gleich nach Versuchsbeginn Wasser zu verlieren. Bei einer Saugspannung von 6 kPa reduziert sich der Wassergehalt der Probe auf 12 %. Dies entspricht schon fast dem residualen Wassergehalt und einem Verlust von 60 % des Wassers. „Boden 1“ und „Boden 2“ halten das Porenwasser ungefähr gleich lange zurück. Die beiden Retentionskurven unterscheiden sich in der Steigung und im residualen Wassergehalt. Im Übergang von Grob- zu Mittelporen (6 kPa) haben „Boden 1“ & „Boden 2“ circa gleich viel Porenwasser (45 %) verloren. Wobei der Wasserverlust des „Boden 1“ länger anhält und mit einem residualen Wassergehalt von 8 % deutlich unter dem von „Boden 2“ mit 11 % liegt.

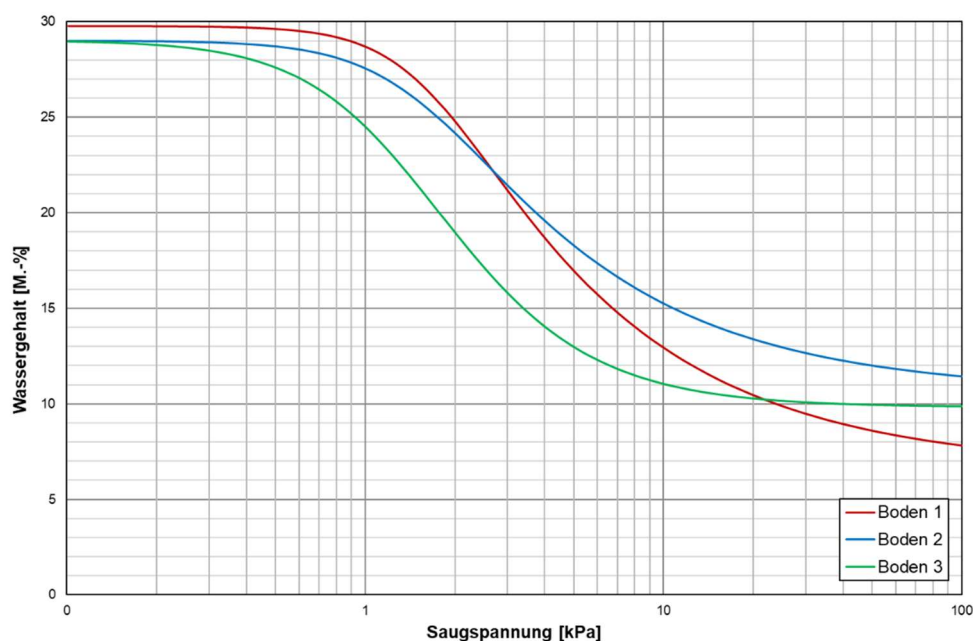


Abb. 31 Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ mit gravimetrischem Wassergehalt

In der 2. Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ sind die Wasserretentionskurven deutlich unterschiedlicher (siehe Abb. 32). Der Anfangswassergehalt bei Sättigung ($w = 21 - 23 \%$) ist niedriger als jener der 1. Versuchsreihe. Die höhere Lagerungsdichte verringert den Porenraum speziell im Bereich der Makroporen. Diese sind neben der Kornverteilung, wesentlich von der Lagerungsdichte abhängig. „Boden 1“ verliert erst „spät“ Wasser, jedoch fällt die Kurve danach sehr steil ab. Das ist typisch für einen enggestuften Sand. Erst bei einer Saugspannung von 15 kPa flacht die Kurve wieder ab. Dies spiegelt den Schluffanteil des Bodens wider. Der residuale Wassergehalt stellt sich für „Boden 1“ bei $w = 6 \%$ ein.

„Boden 2“ weist eine klar flachere Kurve als „Boden 1“ auf. Die kleinen Schluffkörner verursachen eine Abnahme der Grobporen und eine Zunahme der Mittelporen. Die Retentionskurve verläuft flacher, da für einen Wasserverlust aus den feineren Poren eine höhere Saugspannung erforderlich ist. Der Versuch endete mit einem verbleibenden Wassergehalt von $w = 10 \%$.

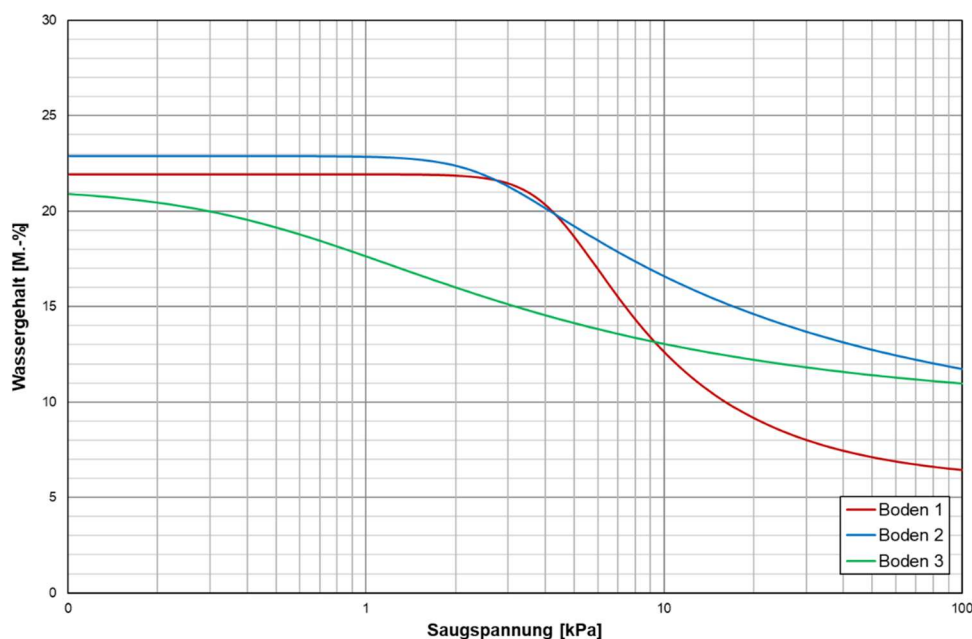


Abb. 32 Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ mit gravimetrischem Wassergehalt

Die Wasserspannungskurve mit der geringsten Steigung gehört zu „Boden 3“. Eine weite Porenverteilung ist signifikant für eine flache Retentionskurve. Gleich nach Beginn entleeren sich die Grobporen des Sandes. Der kontinuierlich flache Übergang von Grobporen zu Mittelporen, also von dem Mittelsand zum Schluff, ist durch die Ausfallskörnung bedingt. Der residuale Wassergehalt gleicht mit 10% „Boden 2“.

Wird auch hier der Wassergehalt bei einer Saugspannung von 6kPa (FK) betrachtet, erkennt man, dass der Wasserverlust der Böden deutlich geringer ist als bei Versuchsreihe 1. „Boden 1“ verliert bis zur Feldkapazität 20 % seines Wassers, „Boden 2“ ca. 22 % und „Boden 3“ gibt ca. 35 % des Porenwassers ab.

Die beiden Hyprop Versuchsreihen zeigen deutlich den Einfluss von Lagerungsdichte und Kornverteilung. Die geringe Lagerungsdichte von $1,5 \text{ g/cm}^3$ konstruiert sehr große Porenräume und mindert somit den Einfluss der Körnungslinie auf die Wasserretentionskurven. Je geringer das Porenvolumen wird, umso größer ist der Einfluss der Kornverteilung. Ebenfalls verschiebt ein kleineres Porenvolumen die Wasserretentionskurven nach rechts, das deutet ganz klar auf eine Abnahme des Verhältnisses von Grobporen zu Mittelporen.

In den Abb. 33 und Abb. 34 sind hier die Wasserretentionskurven in Abhängigkeit des Sättigungsgrades dargestellt. Die Ergebnisse des Hyprop Versuchs werden in Tab. 6 & Tab. 7 zusammengefasst.

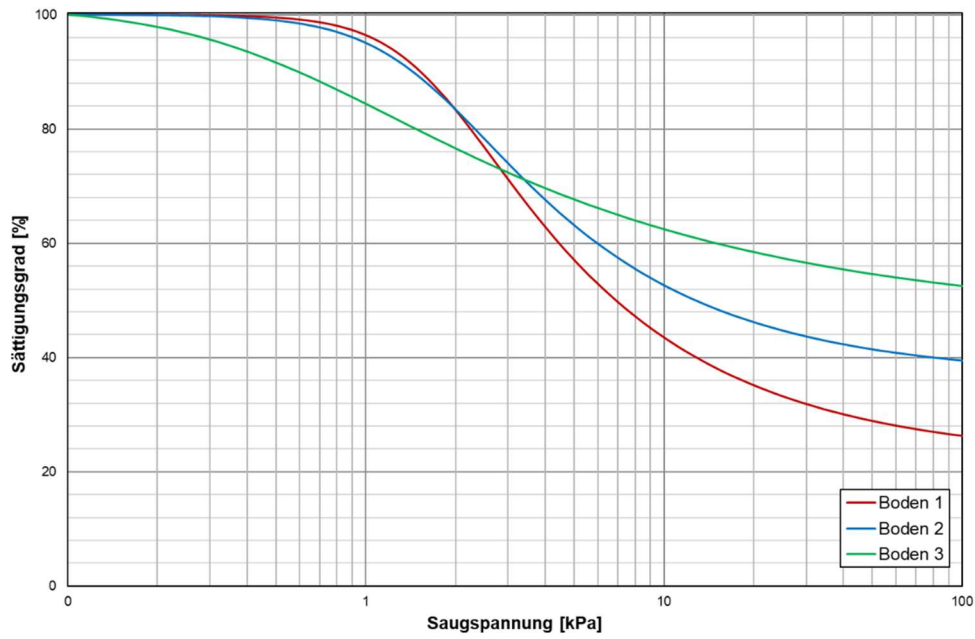


Abb. 33 Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ mit Sättigungsgrad

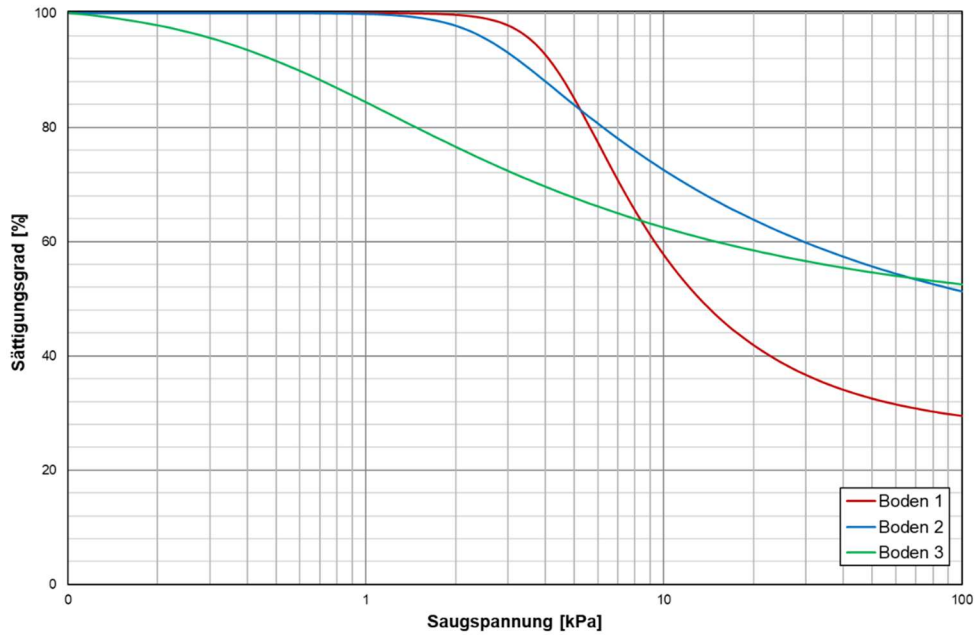


Abb. 34 Wasserretentionskurven der Versuchsböden mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ mit Sättigungsgrad

Tab. 6 Ergebnisse des Hyprop Versuchs mit $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$

Bodenart	STZ Nr	Hyprop Nr	ρ_d [g/cm ³]	Θ [Vol.-%]	w [M-%]	e [-]	n [-]	S_r [%]
Boden 1	21	676	1,50	39,2	26,0	0,85	0,46	85,3
Boden 1	22	33	1,49	39,2	26,2	0,86	0,46	84,6
Boden 2	23	705	1,50	41,0	27,2	0,82	0,45	91,0
Boden 2	24	33	1,51	39,8	26,3	0,81	0,45	89,0
Boden 3	25	675	1,50	38,2	25,4	0,80	0,44	86,2
Boden 3	26	32	1,51	37,8	25,1	0,79	0,44	85,6

Tab. 7 Ergebnisse des Hyprop Versuchs mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$

Bodenart	STZ Nr	Hyprop Nr	ρ_d [g/cm ³]	Θ [Vol.-%]	w [M-%]	e [-]	n [-]	S_r [%]
Boden 1	11	32	1,71	33,29	19,42	0,62	0,38	86,8
Boden 1	12	705	1,72	34,66	20,10	0,61	0,38	91,3
Boden 2	15	21	1,70	35,86	21,16	0,62	0,38	94,1
Boden 2	16	676	1,70	34,14	20,13	0,62	0,38	89,6
Boden 3	19	33	1,71	32,33	18,89	0,58	0,37	88,3
Boden 3	20	675	1,71	32,65	19,08	0,58	0,37	89,2

5 Sättigungsversuche

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Sättigungsversuche und die Erprobung der Messtechnik ausgeführt. Dabei wird der Versuchsaufbau erläutert und genauer auf den Versuchsablauf eingegangen. Die Saugspannungen wurden in den Sensortests mit einem negativen Vorzeichen gekennzeichnet. Konventionsgemäß herrschen unter dem Grundwasserspiegel positive Porenwasserdrücke, also sind die Saugspannungen oberhalb des Grundwasserspiegels mit einem negativen Vorzeichen zu versehen.

5.1 Versuchsaufbau

Für die labortechnische Umsetzung der Sättigungsversuche wurde im Vorfeld ein Acrylglaszylinder mit einer, ebenfalls aus Acrylglas bestehenden Bodenplatte verschweißt. Der Zylinder ist 60 cm hoch und hat einen Innendurchmesser von 38,8 cm. In der Bodenplatte sind vier $\frac{3}{4}$ " Bohrungen angeordnet in denen Wasseranschlussstücke aus Messing eingeschraubt sind. Die Sättigung erfolgt durch einen Wasserkanister, der über einen Wasserschlauch und Verteilerschläuche an die Bodenplatte angeschlossen ist. Dabei beträgt die Höhendifferenz zwischen Wasserspiegel im Behälter und dem Prüfzylinderboden 140 cm (Abb. 35). Über der Bodenplatte ist im Zylinder eine 0,5 cm dicke Filterplatte aus Kupfer platziert. Die Kontaktstellen zum Zylinderrand sind mit Silikon abgedichtet. Dies hat den Vorteil, dass sich das Wasser unter der Kupferplatte verteilt und gleichmäßig in den Boden aufsteigt. Die Filterwirkung der Platte wirkt für die Sättigungsdauer nicht limitierend. Auf den Unterboden wird vor dem Sättigungsversuch eine Gleisschotterplatte aufgesetzt. Diese wurde mit Kunstharz vergossen und kann so als eine Einheit auf den Unterboden positioniert werden. Die Belastungen aus späteren Versuchen werden durch sie in den Unterboden eingeleitet. Die Zylinderwand ist in den Höhen von 20 – 35 cm mit 2 x 4 um 90 ° versetzte Löcher für die Messsensoren versehen. An diesen Eingängen werden die TDR Sensoren und die Tensiometer installiert (siehe Abb. 36).

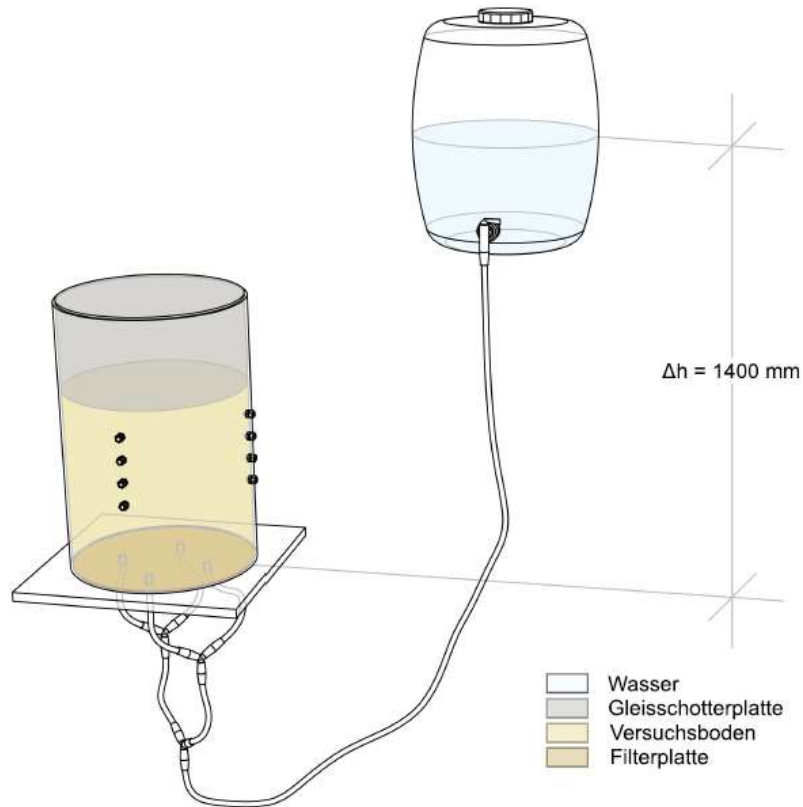


Abb. 35 Schematische Darstellung des Prüfzylinder

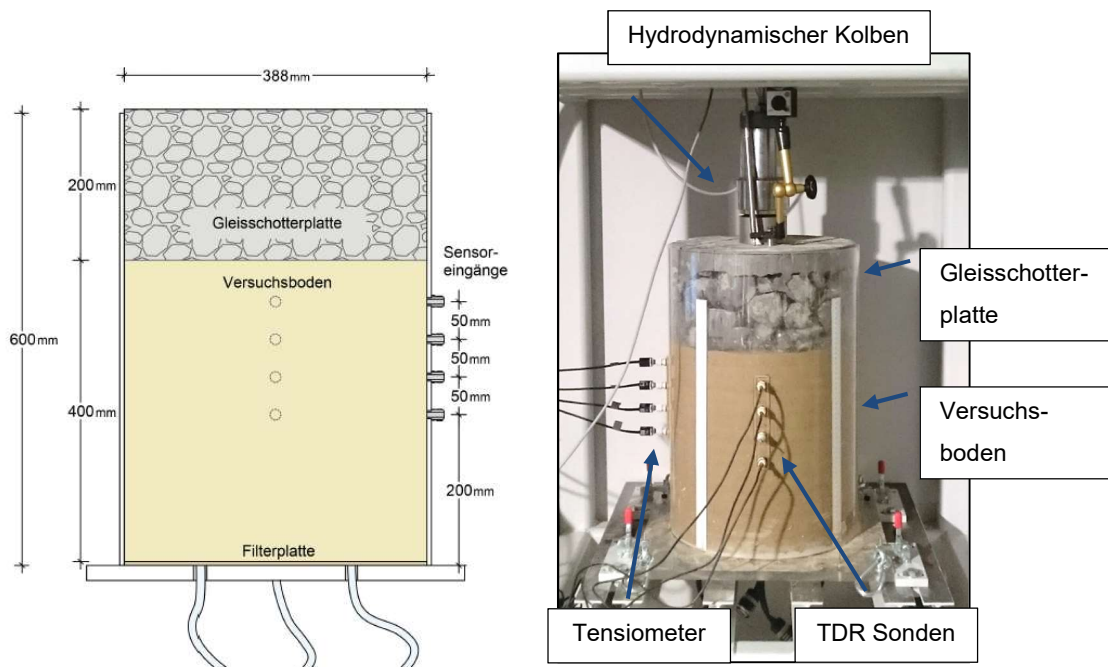


Abb. 36 Schnitt Prüfzylinder und Prüfzylinder mit eingebauter Messtechnik

5.2 Messtechnik

Zur Aufzeichnung von Änderungen des Wassergehaltes der Bodenproben werden Messsensoren in den Höhen von 20, 25, 30 und 35 cm im Versuchszylinder installiert. Die Änderung des Wassergehaltes der Bodenproben wird mit zwei Arten von Sensoren aufgezeichnet. TDR Sensoren messen den volumetrischen Wassergehalt und Tensiometer dokumentieren eine Veränderung der Saugspannung durch Zunahme des Sättigungsgrades. Tab. 8 zeigt die Abkürzungen der Sensoren und den Sensoreingang zur Lokalisierung des Sensors am Prüfcylinder

Tab. 8 Sensorabkürzung mit dazugehörigen Eingang am Prüfcylinder

Tensiometer	TDR Sonde	Sensoreingang
T1	TDR 1	20 cm
T2	TDR 2	25 cm
T3	TDR 3	30 cm
T4	TDR 4	35 cm

5.2.1 UMS EC-5 TDR Sensor

Für die Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes wird ein EC-5 TDR Sensor der Firma UMS GmbH München verwendet. Die Time-Domain-Reflectometry (TDR) dient zur indirekten Feuchtemessung des Bodens. Dabei misst der TDR Sensor die dielektrischen Eigenschaften des Bodens. Aus der relativen Dielektrizitätszahl ϵ_r (Permittivität) kann auf den Wasseranteil geschlossen werden. Um ϵ_r zu bestimmen, wird eine Laufzeitmessung eines hochfrequenten elektromagnetischen Impulses entlang der Messstäbchen durchgeführt (Rost 1978). Der Impuls breitet sich entlang der Stäbe in den umliegenden Boden aus und wird an den Spitzen des Sensors reflektiert. Somit ergibt sich eine Zeitmessung über die doppelte Länge der Sensorstäbe. Da Bodenteilchen, Wasser und Luft deutlich unterschiedlichere Dielektrizitätszahlen aufweisen, ändert sich bei Veränderungen im Wasserhaushalt die Laufzeit eines Impulses durch den Boden um den Sensor und es kann somit auf den Wassergehalt geschlossen werden. (zb. Shukla und Lal 2004)

Der EC-5 Sensor (Abb. 37) ist wenig empfindlich gegen Veränderungen in der Kornverteilung und der elektrischen Leitfähigkeit, da er auf einer sehr hohen Frequenz von 70 MHz operiert. Die werkseitige Kalibrierung gilt für alle Bodenarten bis zu einer

elektrischen Leitfähigkeit von 8 dS/m [Dezisiemens pro Meter]. Gleichung (14) gilt nur wenn der Sensor mit einer Versorgung von 2,5 V gespeist wird. Die Tensiometer-Messung gibt die elektrische Spannung mV [mV] wieder und über sie wird der volumetrische Wassergehalt berechnet. Für andere Versorgungsspannungen muss der Sensor neu kalibriert werden. Der EC-5 ist vom Kabel bis zu den Sensortippen 9 cm lang und weist eine Breite von 1,8 cm sowie eine Dicke von 0,7 cm auf. Der Messbereich hat dabei einen Durchmesser von 5 cm über die Sensorlänge.

$$\theta = 11,9 * 10^{-4} * mV - 0,401 \quad (14)$$

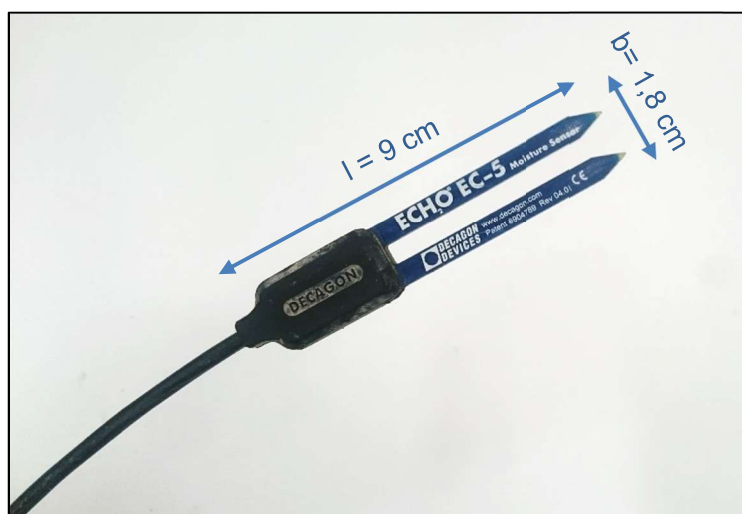


Abb. 37 UMS EC-5 TDR Sensor

5.2.2 Sensorüberprüfung

Mit Gleichung (14) ist der Sensor für einen maximalen volumetrischen Wassergehalt von 60 % limitiert. Dies gründet darauf, dass feinkörniger Boden charakteristischerweise bei 40 – 50 % volumetrischen Wassergehalt gesättigt ist. Wird der Sensor zur Überprüfung in Wasser gelegt, gibt er, mit der obigen Gleichung, keinen Wassergehalt von 100 % wieder. (UMS EC-5 2009)

Alle Sensoren wurden im Vorfeld der Sättigungsversuche auf ihre Genauigkeit in den Versuchsböden getestet. Laut Herstellerangaben liegt die Schwankungsbreite der kalibrierten Sensoren bei $\pm 2\%$ des volumetrischen Wassergehaltes. Bei stärkeren Abweichung muss Formel (14) für den jeweiligen Versuchsboden adaptiert werden.

In einem Zylinder mit definiertem Volumen wurden die Versuchsböden mit unterschiedlichen Wassergehalten eingebaut. Nach Durchführung der Wassergehaltsmessungen der TDR Sonden wurde der Boden im Trockenschrank bis

auf Massekonstanz getrocknet und der gravimetrische Wassergehalt des Bodens ermittelt. Über das Volumen des Probenkörpers kann mit Gleichung (4) der volumetrische Wassergehalt in den gravimetrischen Wassergehalt umgerechnet werden. Somit konnte eruiert werden, wie weit der gemessene Wassergehalt der TDR Sonden vom tatsächlichen Wassergehalt im Prüfkörper abweicht. Diese Überprüfung wurde mit allen drei Böden und mit vier verschiedenen Wassergehalten durchgeführt. Der gravimetrische Wassergehalt variiert dabei von 10 – 20 %, da dieser Bereich auch für die späteren Sättigungsversuche relevant ist. Die Ergebnisse der TDR Messungen werden auf der Ordinate dem tatsächlichen Wassergehalt auf der Abszisse aufgetragen.

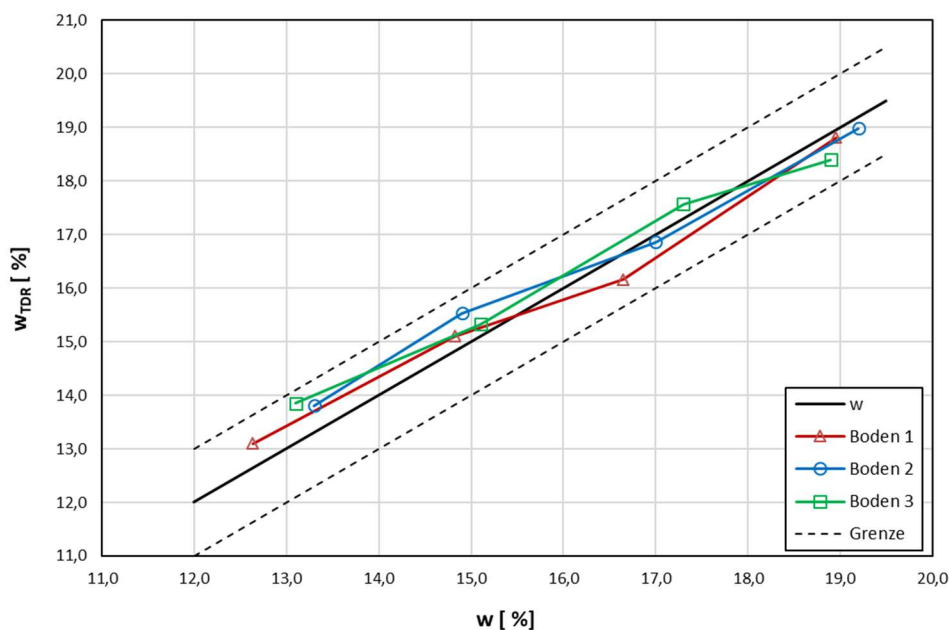


Abb. 38 Vergleich der TDR Messungen mit tatsächlichen Wassergehalt

In Abb. 38 ist veranschaulicht, dass sich die Abweichungen vom tatsächlichen Wassergehalt w alle innerhalb einer Schwankungsbreite von ± 1 % befinden. Somit ist eine spezifische Kalibrierung der Sensoren auf die einzelnen Versuchsböden nicht notwendig.

5.2.3 T5 Tensiometer

Die T5 Tensiometer der METER Group AG München dienen zur Messung des Matrixpotentials. Der Messbereich geht von +1000 hPa (Druckbereich) bis -850 hPa (Saugspannungsbereich). Die Funktionsweise ist dieselbe wie bei den Tensiometer im Hyprop Versuch. Die poröse Keramik stellt die Verbindung vom Bodenwasser und dem entgasten Wasser im Kerzenschaft her. Dadurch überträgt sich die Bodenwasserspannung direkt auf die Sensormembran, welche im Korpus verbaut ist.

Über eine wasserdichte Membran am Sensorkabel wird der atmosphärische Druck zum Druckaufnehmer geleitet. So wird der differenzielle Druckunterschied zwischen Bodenwasserspannung zum atmosphärischen Referenzdruck berechnet und anschließend über einen Anschluss am Datalogger aufgezeichnet.

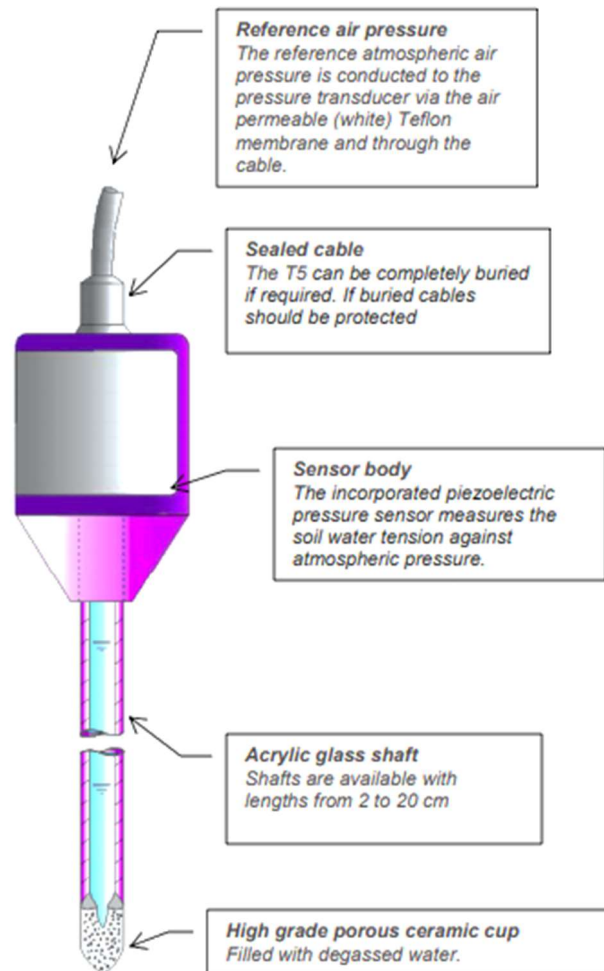


Abb. 39 T5 Tensiometer, schematisch, METER Group München, (UMS T5 2009)

Die gesamte Elektronik des T5 ist im Sensorkorpus verbaut und hermetisch gegen Wasser abgedichtet (Abb. 39). Die weiße Teflonmembran am Sensorkabel (Abb. 40) ist wasserdicht, lässt aber Kondenswasser vom Kabelinneren nach außen entweichen. Somit ist die gesamte Elektronik optimal gegen Feuchtigkeit geschützt. Über ein Gewinde im Kunststoffgehäuse wird die Tensiometerkerze an einen Dichtring vor der Sensormembran geschraubt. Die Kerzen können je nach Anforderungen in den Längen von 2 – 20 cm verwendet werden. Die Spitze besteht aus einem keramischen Al_2O_3 -Sintermaterial. Durch ein spezielles Herstellungsverfahren weist die Keramik eine homogene Porosität auf und mit einer Porenweite von $r = 0,3 \mu\text{m}$ ist ein osmotischer Effekt vernachlässigbar. Der Lufteintrittspunkt der Keramikkerze ist bei 8800 hPa und

somit nicht für den Messbereich limitierend. Der Dampfdruck von Wasser hingegen liegt bei einer Temperatur von 20° C bei 23 hPa über absolutem Vakuum. Das bedeutet, dass Wasser bei 1000 hPa Luftdruck bei einem Differenzdruck von > 977 hPa zu sieden beginnt. Der messbare Bereich ist also bei 1000 hPa Luftdruck bis -977hPa. Wenn der Boden über den Dampfdruck von Wasser austrocknet, so nimmt der Messwert von diesem Niveau nur langsam ab, bis er beim Lufteintrittspunkt schlagartig auf Null abfällt. An diesem Punkt tritt Luft durch die Keramik in den Schaft ein und es findet ein Druckausgleich mit der Atmosphäre statt. Die Schwankungsbreite liegt bei dem T5 Tensiometer bei ±3 hPa. (UMS T5 2009)

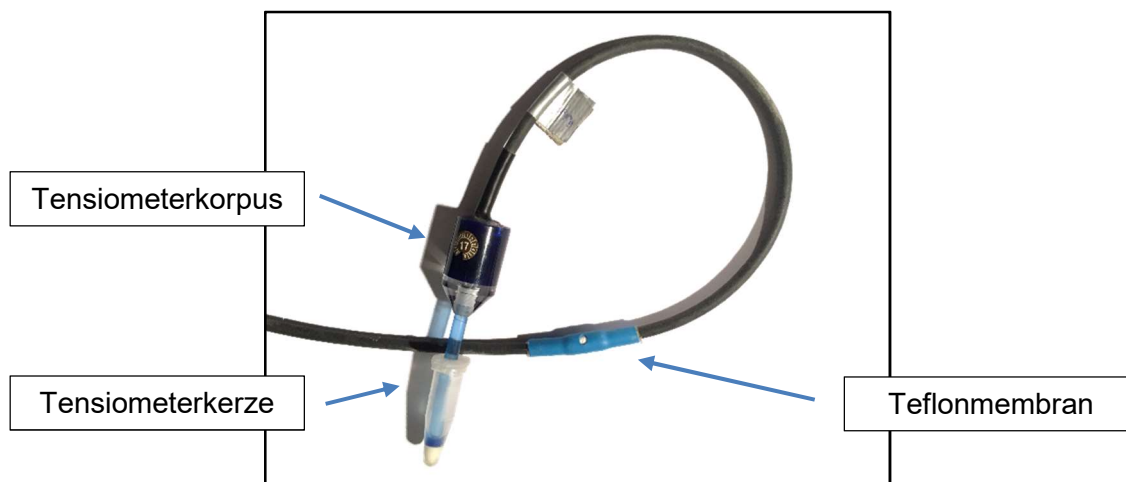


Abb. 40 T5 Tensiometer mit Teflonmembran, Sensorkorpus, Tensiometerkerze + Schutzkappe

Wenn der Lufteintrittspunkt der Keramik erreicht ist, muss der Tensiometer entlüftet und neu befüllt werden (siehe Kapitel 4.3.2). Dies erfolgt wie beim Hyprop Versuch mit einer Vakuumpumpe. Die Keramikspitzen müssen ca. 24 h in entgastem und entionisiertem Wasser eingelegt werden. Danach werden sie mit einem Silikonschlauch über eine Tröpfchenflasche mit der Vakuumpumpe verbunden (Abb. 41). Das entgaste Wasser wird durch die Keramik in den Kerzenschaft gesogen. Dadurch werden alle eingeschlossenen Luftblasen aus der Kerze entfernt. Um den Sensorkorpus blasenfrei zu befüllen, wird eine Spritze mit einer Nadel verwendet. Es wird die Bohrung vor der Membran mit entgastem Wasser befüllt. Der durchsichtige Korpus Sensorkopf ermöglicht die Kontrolle, ob alle Luftblasen vor der Membran entfernt wurden. Hier ist höchste Vorsicht geboten, damit die Sensormembran nicht durch die Spritzennadel zerstört wird. Beim Zusammenschrauben des Sensors mit der Kerze muss der Sensor an einem PC oder einem Voltmeter angeschlossen sein. Der maximale Druck auf den Sensor darf 3000 hPa nicht übersteigen, ansonsten wird die Sensormembran beschädigt. Danach wird überprüft, ob das Tensiometer gut befüllt ist. Dafür wird die Keramikspitze mit einem Taschentuch abgetrocknet und in der Luft geschwenkt. Die

Saugspannung soll nach ca. 15 Sekunden einen Wert von -800 hPa erreichen. Ist das nicht der Fall, so muss das Tensiometer neu befüllt werden. Wenn die Keramikspitze nicht ausgetrocknet ist und sich nur eine Luftblase im Schaft oder an der Membran gebildet hat, so kann diese Blase auch nur mit einer Spritze und Nadel entfernt werden. Voraussetzung ist hierfür, dass die Keramik mit Wasser gesättigt ist und dort keine Luftblasen eingeschlossen sind.

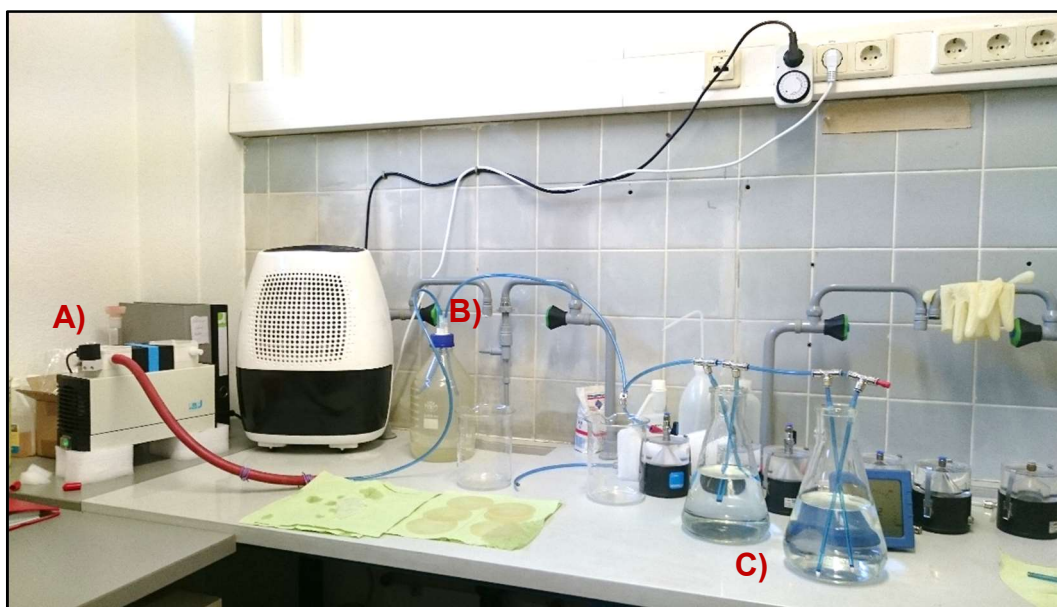


Abb. 41 Tensiometer entlüften mit: A) Vakuumpumpe, B) Tröpfchenflasche, C) Tensiometerkerzen in Behälter mit entgastem und entionisiertem Wasser

5.3 Überprüfung der T5 Tensiometer

Die T5 Tensiometer können mit unterschiedlichen Kerzenlängen verwendet werden. In dieser Masterarbeit werden Schäfte mit den Längen 5 und 20 cm verwendet. Die Überprüfung der Sensoren und der Tensiometerkerzen erfolgte jeweils im Saugspannungs- und im Druckbereich.

5.3.1 Sensortest im Druckbereich mit Schaftlänge = 20 cm

Die Tensiometerkerzen sind durch die Sensoreingänge in den leeren Versuchszylinder geführt worden (Abb. 42). Die Keramik wurde gegen Austrocknung durch Plastikkappen geschützt. Wenn die Kerzen mit ganzer Länge in den Zylinder geschoben sind, biegen sich die Schäfte leicht nach unten und verursachen durch diese Biegebeanspruchung Druck auf die Sensormembran. Deswegen wurden die Kerzen nur ca. 3 cm in den Zylinder gesteckt. Der Wasserspiegel im Zylinder wurde kontinuierlich von 12 cm bis 40 cm erhöht. Dieser Wasserstand wurde gehalten, bis sich alle Tensiometer auf den

hydrostatischen Wasserdruck eingestellt haben. Die Saugspannungen sind negativ, eine Wassersäule wird also als positive Saugspannung angegeben. +1 kPa Saugspannung entspricht also genau 10 cm hydrostatischem Wasserdruck. Ein Wasserstandssensor zeichnet den Verlauf des Wasserspiegels auf. Beim Absenken des Wasserspiegels auf Ausgangsniveau, sind die zuvor entfernten Schutzkappen wieder auf die Keramikkerzen gestülpt worden. Somit stellte sich bei den Tensiometern wieder Nullpotential ein.

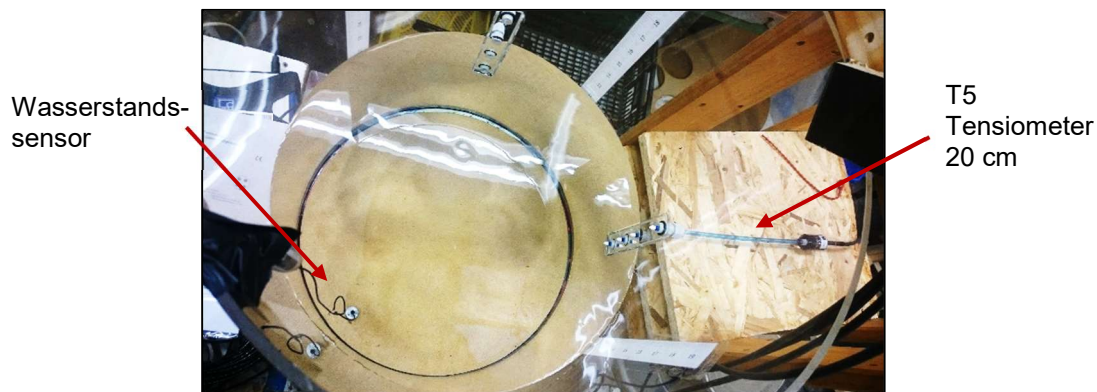


Abb. 42 Tensiometertest, Schaftlänge 20 cm,

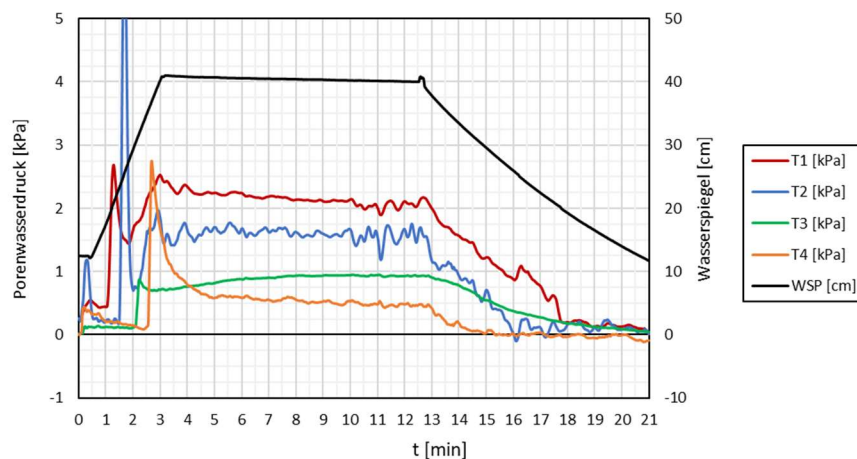


Abb. 43 Tensiometertest im Druckbereich mit einer Schaftlänge von 20 cm

Der Wasserspiegel im Versuchszylinder ist in Abb. 43 in Zentimeter angegeben. Bei einem Wasserspiegel von 40 cm zeigt der unterste Tensiometer T1 einen Wasserdruck von 2 kPa an. Dies entspricht genau der Höhendifferenz von 20 cm. Sensor T4 ist in 35 cm Höhe installiert und somit dem geringsten Druck von 5 cm Wassersäule ausgesetzt. Der extreme Ausschlag der einzelnen Graphen während der Zylinderfüllung zeigt genau den Punkt, an dem die freie Wasseroberfläche die Keramikspitze erreicht. Diese Extremwerte sind nur ein Resultat aus der Abnahme der Schutzkappen. Die angezeigten Druckwerte der Tensiometer stimmen mit dem hydrostatischen Wasserdruck überein. Das Oszillieren der Datenwerte lässt auf eine Schwingung im

Zylinderwasser, oder auch auf eine Schwingung im Kerzenwasser bei horizontalem Einbau schließen.

5.3.2 Sensortest im Druckbereich mit Schaftlänge = 5 cm

Die 5 cm Schäfte wurden auf dieselbe Weise einem hydrostatischen Wasserdruck ausgesetzt. Schon nach wenigen Minuten stellen sich alle Tensiometer auf den richtigen Druckwert ein. (siehe Abb. 44)

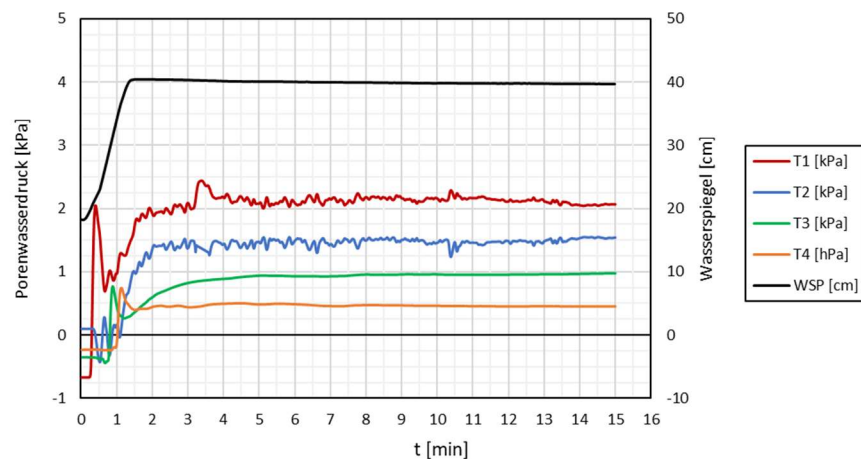


Abb. 44 Tensiometertest im Druckbereich mit einer Schaftlänge von 5 cm

Bei den Sensortests im Druckbereich ist kein signifikanter Unterschied zwischen 5 cm und 20 cm Kerzen ersichtlich. Beide stellen sich auf den korrekten hydrostatischen Druck ein. Bei den längeren Kerzen treten größere Oszillationen auf. Es bleibt jedoch im vernachlässigbaren Bereich, da sich der Schwankungsbereich der Tensiometer bei $\pm 0,3$ kPa befindet.

5.3.3 Sensortest im Saugspannungsbereich mit Schaftlänge = 20 cm

Vor Versuchsbeginn wurden alle Tensiometerkerzen neu befüllt und entgast. Die Idee hinter diesem Test ist, das Ansprechverhalten der Sensoren im Saugspannungsbereich während der Austrocknungsphase zu dokumentieren. Dafür wurden die Tensiometer wieder in den Sensoreingängen installiert und die Schutzkappen auf die Keramikspitzen gesetzt. Somit ist beim Start des Versuches das Nullpotential hergestellt. Durch das Entfernen der Kappen trocknen die Tensiometerspitzen langsam aus und die daraus resultierenden Graphen geben Auskunft über das Ansprechverhalten der einzelnen Sensoren.

Abb. 45 zeigt die unterschiedlichen Steigungen der Tensiometer. Schon nach wenigen Minuten ist eine klare Differenz im Ansprechverhalten erkennbar. T2 weist mit der größten Steigung die schnellste Austrocknungsrate auf. Die Abweichung zum Tensiometer mit der trögsten Reaktion beträgt schon nach 4,5 min ca. 200 hPa. Obwohl im Vorfeld alle Tensiometer neu befüllt wurden, ist die Differenz in der gemessenen Saugspannung deutlich.

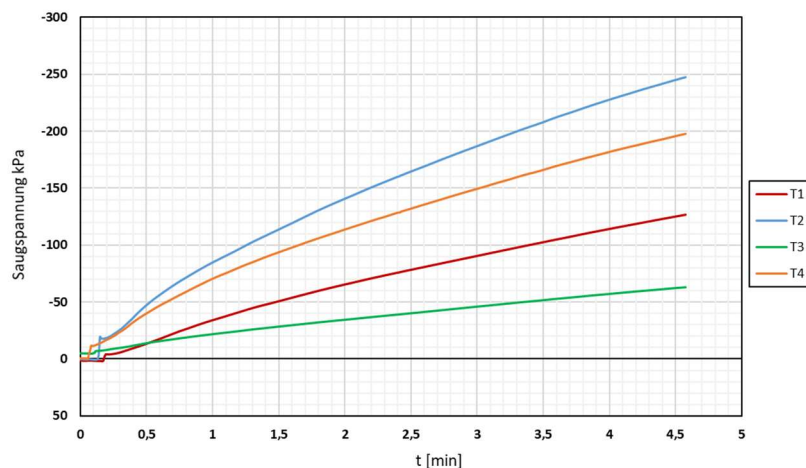


Abb. 45 Ansprechverhalten der Tensiometer im Saugspannungsbereich, Schaftlänge = 20 cm

5.3.4 Sensortest im Saugspannungsbereich mit Schaftlänge = 5 cm

Auch für eine Kerzenlänge von 5 cm wurde das Ansprechverhalten während der Austrocknung dokumentiert. Beim Erreichen von 500 hPa wurden jedoch wieder die Schutzkappen auf die Keramikspitzen gesteckt und das Abfallen der Saugspannungen auf das Nullpotential gemessen.

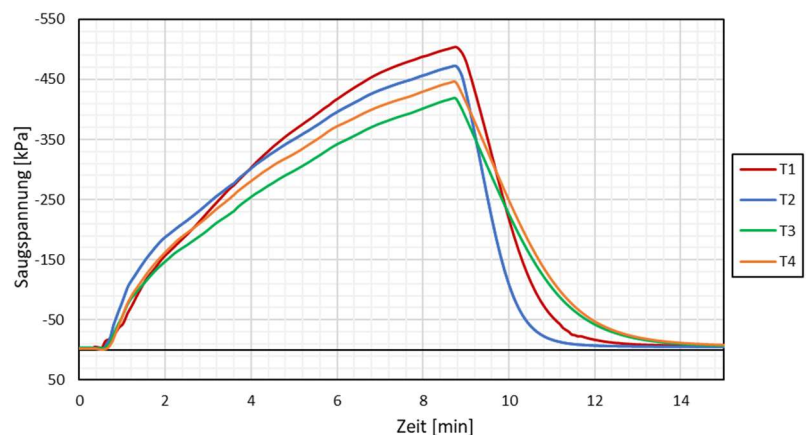


Abb. 46 Ansprechverhalten der Tensiometer im Saugspannungsbereich, Schaftlänge = 5 cm

Die kürzeren Tensiometerkerzen weisen einen deutlich gleichmäßigeren Verlauf der Saugspannungskurven auf. Die Differenz nach 9 Minuten liegt bei ca. 50 hPa (siehe Abb. 46). Auch nach dem Höhepunkt unterscheiden sich die abfallenden Graphen nur wenig. Der Einfluss auf das Ansprechverhalten ist durch die lange Wassersäule in den 20 cm Schäften deutlich höher als bei den kurzen Kerzen.

Weiteres wurden auch noch die Übereinstimmung der Tensiometer untereinander überprüft. Dazu wurde ein Versuchsboden in Behälter mit definiertem Volumen eingebaut und die Sensoren in den Boden gesteckt. Nach kurzer Zeit haben sich die Tensiometer auf die Saugspannungen im Bodenmaterial eingestellt. Die Abweichungen unter den Tensiometern entsprachen alle der betrieblichen Schwankungsbreite (siehe Abb. 47).

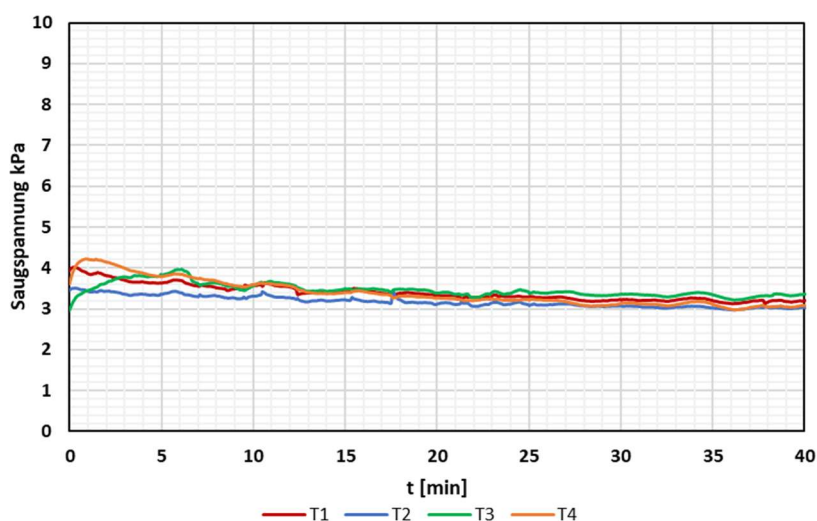


Abb. 47 Sensortest, Vergleich der Kerzen in Boden 1, $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$

Für die Sättigungsversuche wurden die 5 cm Schäfte verwendet. Diese Entscheidung beruht zum einen auf das gleichmäßigere Ansprechverhalten der Kerzen und zum anderen stellte sich im Verlauf der Masterarbeit immer mehr heraus, dass mit einer Eindringung der Gleisschotterplatte in den Versuchsboden zu rechnen ist (vergleiche Kapitel 5.5). Die langen Tensiometerkerzen erfahren dadurch eine höhere mechanische Beanspruchung als die kurzen Kerzen. Um die Tensiometer nicht zu beschädigen, wurden die 5 cm Schäfte verwendet, da diese nur 3 cm in den Prüfzylinder ragen.

5.4 Versuchsreihen

Das Sättigungsverhalten wurde anhand unterschiedlicher Kornverteilungen und unterschiedlicher Lagerungsdichten untersucht. Die drei Versuchsböden sollten jeweils mit den Trockendichten $1,5 \text{ g/cm}^3$, $1,6 \text{ g/cm}^3$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ eingebaut und gesättigt werden. Jedem Sättigungsversuch wurde ein Kürzel zugewiesen (siehe Tab. 9). Zum Beispiel „SV 1.7_1“, SV steht für Sättigungsversuch, die Zahl rechts steht für den Versuchsboden (1, 2, 3) und links vom Unterstrich steht die Lagerungsdichte mit der der Versuchsboden eingebaut worden ist. Im Laufe der Versuche stellte sich heraus, dass eine repräsentative Versuchsdurchführung mit der Trockendichte $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ nicht möglich ist. Daher wurden mit der Trockendichte $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ je Boden zwei Sättigungsversuche durchgeführt. In der Abkürzung sind dafür die Buchstaben „A“ & „B“ hinzugefügt.

Tab. 9 Abkürzungen der Sättigungsversuche

	Boden 1	Boden 2	Boden 3
$\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$	SV 1.5_1	SV 1.5_2	SV 1.5_3
$\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$	SV 1.6_1	SV 1.6_2	SV 1.6_3
$\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$	SV 1.7_1-A	SV 1.7_2-A	SV 1.7_3-A
	SV 1.7_1-B	SV 1.7_2-B	SV 1.7_3-B

5.5 Versuchsablauf

Der generelle Versuchsablauf eines Sättigungsversuches gliedert sich in fünf Schritte:

- Mischen des Bodens mit w_{opt}
- Einbau des Bodens samt TDR Sensoren in den Prüfzylinder
- Entgasen und Installation der Tensiometer
- Sättigungsphase
- Materialausbau und Trocknen des Bodens im Trockenschrank

Die Versuchsböden wurden allesamt nach dem gleichen Ablauf in den Prüfzylinder eingebaut. Vor dem Einbau wird das Material im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet. Jeder Boden sollte mit dem optimalen Wassergehalt w_{opt} aus dem Proctorversuch eingebaut werden. Jedoch bilden sich durch das Trocknen sehr

festen Schluffklumpen, die ein Mischen des Bodens mit einem Rührwerk oder einer Mischmaschine erschweren bzw. ausschließen. Um den Boden gleichmäßig mit dem optimalen Wassergehalt abzumischen, müssen die trockenen Schluffklumpen aufgebrochen werden.



Abb. 48 Flügelmischer

Ein Flügelmischer bricht mit eingebauten Messern diese Schluffbrocken auf und vermischt gleichzeitig das Bodenmaterial mit dem dazugegebenen Wasser (Abb. 48). So kann eine sehr gute Durchmischung zwischen trockenem Boden und Wasser erreicht werden. Schon durch eine optische Kontrolle erkennt man, wie die trockenen Klumpen immer kleiner werden und sich sehr gut mit dem restlichen Material vermischen. Auch die farbliche Veränderung des Bodenmaterials ist ein Anzeichen für eine gute Vermischung. Die trockenen Bodenteilchen sind als helle Punkte im feuchten Boden leicht zu erkennen. Im Mischvorgang verschwinden sie und der Boden nimmt einen einheitlichen Farbton an. Ein Indikator dafür, dass keine trockenen Klumpen im Boden vorhanden sind.

Auf den Mischvorgang folgt der Einbau des Bodens in den Versuchszylinder. Dabei wird das Material für eine Schichtdicke von 2,5 cm abgewogen und gleichmäßig im Zylinder verteilt. Die Verdichtung des Bodens erfolgt mechanisch mit einem Stampfer. Eine Skala am Acrylglas hilft hier, um den Versuchsboden möglichst homogen auf die gewünschte Trockendichte einzubauen. Nach jeder Schicht, wird die Oberfläche des Bodens aufgeraut, um die unnatürliche, glatte Orientierung der Bodenkörner zu zerstören. Somit wird verhindert, dass sich eine Art horizontale Trennschicht bildet, wenn Wasser die Probe vertikal durchströmt (siehe Abb. 49).

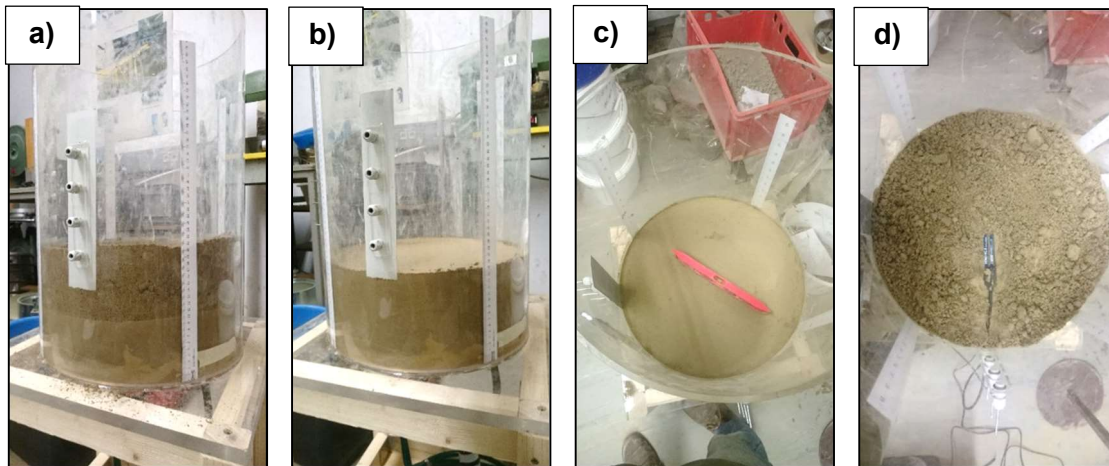


Abb. 49 a) Materialabwage, b) Verdichtung, c) Kontrollmessung & Aufräuen. d) TDR Einbau

Die TDR Sonden müssen während dem Einbau in den Zylinder ebenfalls mit eingebaut werden. Durch die Öffnungen werden die Kabel geführt und mit Dichtmanschetten abgedichtet. Die Befüllung erfolgt bis 40 cm und somit ergibt sich eine Überdeckung von 5 cm über der obersten Sensoreinheit. Es wurde überprüft, ob sich mit dieser Einbaumethode der Wassergehalt in der Probe verändert. Dazu wurde „Boden 1“ mit $w = 13,7\%$ abgemischt und in den Zylinder eingebaut. Mittels einem kleinen Stechzylinder sind alle 2,5 cm (also für jede Schichtdicke) eine Probe entnommen worden. Der daraus ermittelte Verlauf des Wassergehaltes über die Tiefe ist in Abb. 50 zu sehen. Der tatsächliche Wassergehalt weicht kaum vom theoretischen Wassergehalt ab. Das bekräftigt das Mischverfahren und die Einbaumethode.

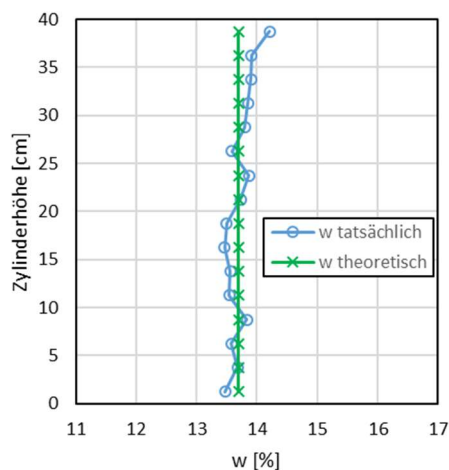


Abb. 50 Wassergehalt nach dem Einbau, „Boden 1“

Nach dem Einbau des Bodens werden die Tensiometer in den Prüfzylinder gesteckt. Mit einem Handbohrer wird bei jedem Sensoreingang ein 5 cm langes und 0,5 cm dickes Loch vorgebohrt. Die Sensoren werden in die Vorbohrung gedrückt und eine Kabelverschraubung dichtet gegen Wasserverlust ab. Dieser Vorgang erzeugt oft hohe

Spannungen im Tensiometer, die nicht den tatsächlichen Saugspannungen des Bodens entsprechen. Vor dem Einbau der Tensiometer müssen diese noch auf Luftblasen in den Kerzen überprüft und gegebenenfalls entlüftet werden.

In der Sättigungsphase wird der Wasserschlauch an den Wasserbehälter angeschlossen. Dabei ist darauf zu Achten, dass der Schlauch möglichst gut mit Wasser gefüllt wird. Für das Sättigen wird entgastes und entionisiertes Wasser verwendet.

Der Höhenunterschied zwischen Wasserspiegel und Zylinderboden beträgt beim Start der Sättigung 140 cm (0,14 bar). Deswegen müssen die Bodenproben, welche außerhalb des Prüfstandes gesättigt werden, gegen Hebung gesichert werden. Die Wandreibung wird hierbei vernachlässigt und der Bodenkörper als homogenes Element betrachtet. Daher muss eine Auflast $F_A = 90$ kg auf die Bodenprobe aufgebracht werden.

$$F_U = A * u$$

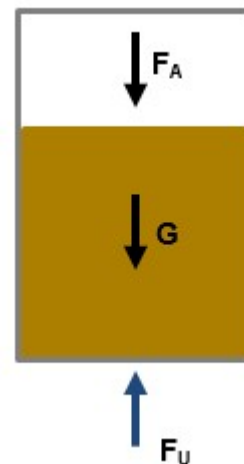
$$F_U = \frac{0,388^2 * \pi}{4} * 14 = 1,66 \text{ kN}$$

$$G = V * \psi_d * \left(1 + \frac{w}{100}\right)$$

$$G = \frac{0,388^2 * \pi}{4} * 0,4 * 15 * 1,11 = 0,79 \text{ kN}$$

$$F_U < G + F_A = 1,66 \text{ kN} < 0,79 \text{ kN} + F_A$$

$$F_A > 0,87 \text{ kN}$$



w	[%]	gravimetrischer Wassergehalt	u	[kN/m ²]	Wasserdruck
V	[m ³]	Zylindervolumen	F_U	[kN]	Auftriebskraft
A	[m ²]	Bodenfläche	F_A	[kN]	Auflast
ψ_d	[kN/m ³]	Trockenwichte Boden	G	[kN]	Eigengewicht

Bei einer Sättigung im Prüfzylinder ist eine solche Auflast nicht notwendig. In diesem Fall wird zuerst die Gleisschotterplatte auf den Unterboden gesetzt und dann der Zylinder in den Versuchsstand geschoben (Abb. 51). Der hydraulische Kolben sperrt eine Vertikalbewegung der Schotterplatte nach oben. Diese bildet keine geschlossene Oberfläche. Daher wird die Gleisschotterplatte vor Sättigungsbeginn mit einer Vorbelastung in den Unterboden gedrückt. Dies erhöht die Kontaktfläche zwischen Unterboden und Gleisschotter und verhindert somit eine Relativbewegung des Bodens durch den Wasserdruck. Das Aufsetzen der Gleisschotterplatte auf den bereits

gesättigten Boden führt zu einem Eindringen in die Bodenprobe. Bodenmaterial wird an den Zylinderseiten hochgedrückt. Dies verfälscht die Ergebnisse weiterführender Versuche zur Quantifizierung der hochgepumpten Feinanteile. Daher muss die Gleisschotterplatte schon vor dem Sättigen auf den Boden platziert werden. Eine Installation eines Geotextiles während dem Sättigungsvorgang ist daher nicht möglich.

Der Versuch wird nach Wasseraustritt auf der Bodenprobe beendet. Zum Teil wird noch ein Wasserspiegel auf dem Unterboden belassen um eine nachhergehende Sättigung von oben zu untersuchen. Nach dem Sättigen werden die Sensoren ausgebaut und gereinigt. Beim schichtweisen Ausbau des Materials werden Wassergehaltsbestimmungen zum Abgleich mit den TDR Daten durchgeführt. In den Höhen der TDR Sonden wird dabei ungefähr 1,5 kg/5 cm Schicht über den ganzen Durchmesser des Prüfzylinders entnommen. Aus dieser Probe kann der gravimetrische Wassergehalt und in weiterer Folge der Sättigungsgrad bestimmt werden. Im Anschluss wird der restliche Versuchsboden im Trockenschrank auf Massekonstanz getrocknet.

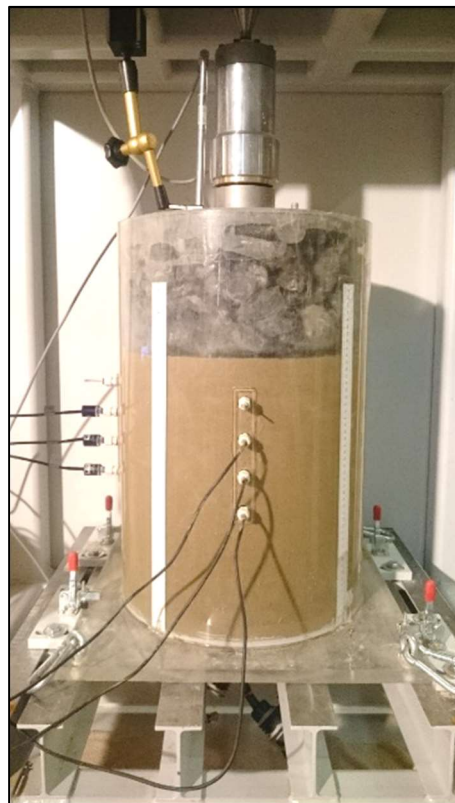


Abb. 51 Eingebauter Versuchsboden mit Gleisschotterplatte und installierter Messtechnik

6 Versuchsergebnisse

Die Resultate aus den durchgeführten Sättigungsversuchen sind in den Versuchsreihen nach den Trockendichten unterteilt. Die Ergebnisse zeigen die Auswertung der TDR Sensoren und der Tensiometer. Die Böden wurden bei allen Versuchen nach Kapitel 5.5 abgemischt und eingebaut. Die ausgewerteten Diagramme der Tensiometer-Messungen stellen auf der Ordinate die Porenwasserdrücke dar. In dieser Arbeit sind die Saugspannungen als negative Porenwasserdrücke definiert.

Die Saugspannungen werden von den Tensiometer an den jeweiligen Sensoreingängen wiedergegeben. Auch im teilgesättigten Bereich messen die Tensiometer einen positiven Druckanteil des Bodenwassers. Das kapillare Netz erzeugt zusammenhängende Porenkanäle, die auf die Tensiometerspitzen drücken. Deshalb sind die Saugspannungskurven auch im teilgesättigten Bereich um diesen Druckanteil versetzt.

6.1 Sättigungsversuche mit $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$

Im Verlauf dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass für weiterführende Versuche die Trockendichte $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ relevant sein wird. Daher wurden hier je Boden zwei Versuchsreihen durchgeführt.

In dieser Versuchsreihe erfolgte eine Gegenüberstellung der Wasserretentionskurven aus den Sättigungsversuchen mit dem Hyprop Versuch. Dafür wurden Sättigungsgrad-Saugspannungs-Diagramme erstellt. Die TDR-Messungen erfolgten während des Sättigungsprozesses manuell mit einem Voltmeter. Für jeden Datenpunkt aus der TDR-Messung wurde über einen Zeitstempel ein Saugspannungswert zugewiesen und der Verlauf zwischen den Messpunkten linear interpoliert. Die Kombination aus TDR-Sonden und Tensiometer ergibt somit den Sättigungsverlauf für den Bewässerungsvorgang. Die Kurven beginnen bei einer Saugspannung von 0 kPa. Dies entspricht genau dem Zeitpunkt, an dem der Wasserspiegel in der Bodenprobe die Tensiometerspitzen benetzt. Ab diesem Moment wurde von den Tensiometern nur der Strömungsdruck und in späterer Folge der hydrostatische Wasserdruck gemessen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Boden hier schon eine Sättigung von 100 % erreicht hatte. Eine weitere Sättigung durch Wasser auf der Bodenoberkante konnte nicht mehr von den Tensiometern aufgezeichnet werden, da sich die Porenwasserdrücke von dem Saugspannungsbereich in den Druckbereich verschoben haben. Die Bewässerungskurve aus der Sättigungsphase verläuft bis zum Sättigungsgrad bei dem

Materialeinbau. Dieser ist je nach Versuchsboden unterschiedlich. Für die Auswertung wurden die TDR- und Tensiometer-Daten gemittelt.

6.1.1 Ergebnisse SV 1.7_1-A

„Boden 1“ wurde mit einem Anfangswassergehalt von $w_{opt} = 14 \%$ und mit $\rho_d = 1,73 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,61$) eingebaut. Die höhere Trockendichte ergab sich daraus, dass das Volumen der Trockenmasse mit einem Durchmesser von 39 cm berechnet wurde. Erst später erfolgte eine genaue Bestimmung des Zylindervolumens, welches auf einen Durchmesser von 38,8 cm rückschließen ließ. 20 h nach dem Einbau des Materials startete die Wasserzugabe („A“). Es dauerte 2 h bis Wasser an der Oberfläche des Bodens erschienen ist („B“). Zeitpunkt „C“ und „D“ zeigen ein Schließen und darauffolgendes Öffnen der Wasserzufuhr. Im Anschluss wurde die Bodenprobe durchströmt, bis sich ein Wasserspiegel von 5 cm über der Bodenoberkante eingestellt hat und auf diesem Niveau für 12 h belassen („E“). In den folgenden Diagrammen sind wichtige Zeitpunkte des Ablaufes eingezeichnet:

- A: Start der Wasserzugabe
- B: Wasser erscheint auf der Bodenoberkante
- C: Wasserzufuhr geschlossen
- D: Wasserzufuhr geöffnet
- E: Wasserzufuhr geschlossen, 5 cm Wasserspiegel auf dem Unterboden
- F: freier Wasserspiegel wird abgesaugt

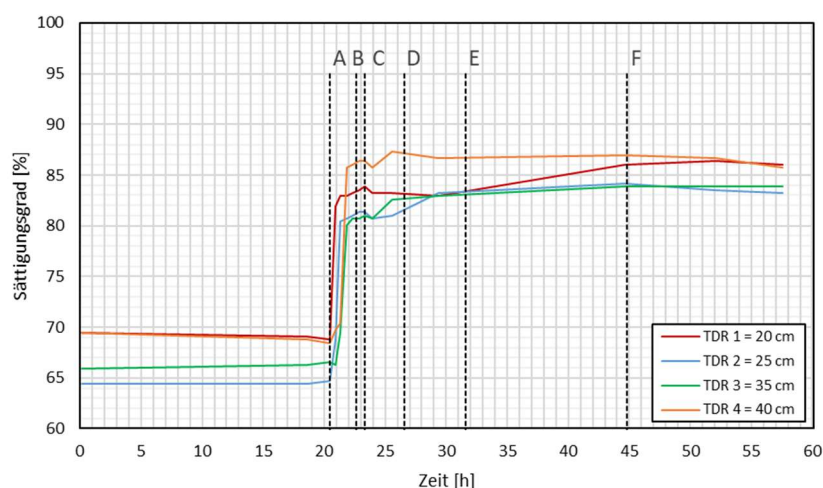


Abb. 52 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_1-A

In Abb. 52 ist der Verlauf der TDR Sensoren ersichtlich. Der Anfangswassergehalt resultierte in den Sättigungsgraden von 69,4 %, 64,4 %, 65,9 %, 69,4 % für

TDR 1 – TDR 4. Nach Wasserzugabe stiegen die Messwerte steil an. Schon bevor Wasser an der Oberfläche des Bodens austrat, stellten sich die Werte auf einen gleichbleibenden Wassergehalt ein. Bis auf TDR 1 zeigen die TDR Sonden einen nahezu horizontalen Verlauf ab 30 h. Die gemessenen Werte am Ende des Versuches entsprachen einem Sättigungsgrad für TDR 1 = 86,0 %, TDR 2 = 83,2 %, TDR 3 = 83,8 %, TDR 4 = 85,7 %.

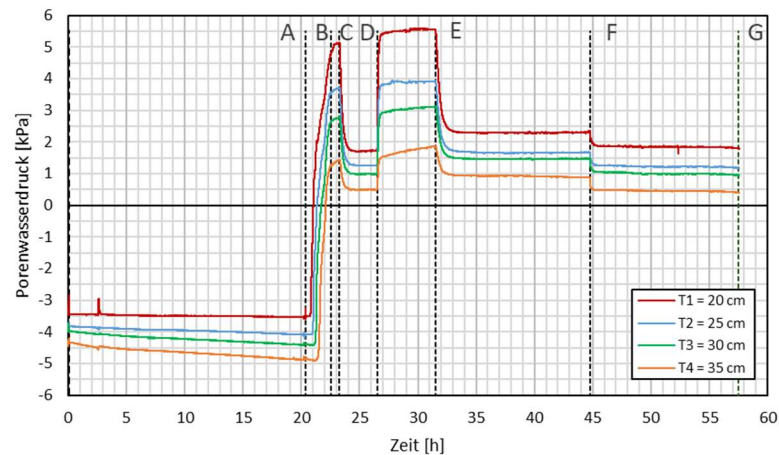


Abb. 53 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_1-A

Die Daten der Tensiometer-Messung sind in Abb. 53 dargestellt. Die Tensiometer starteten mit einer Saugspannung von -3,5 bis -4,5 kPa. Bei Wasserzugabe sank die Saugspannung und wanderte in den Druckbereich. Die Zunahme des Porenwasserdrucks dauerte bis Zeitpunkt „C“ an. Zu diesem Zeitpunkt wurde das Zulaufventil geschlossen und die Messwerte stellten sich sofort auf den hydrostatischen Wasserdruck ein. Direkt nach dem Fortsetzen der Wasserzugabe, erhöhten sich die Messdaten auf den Durchströmungsdruck, der auf die Tensiometer ausgeübt wurde und über dem hydrostatischen Niveau lag.

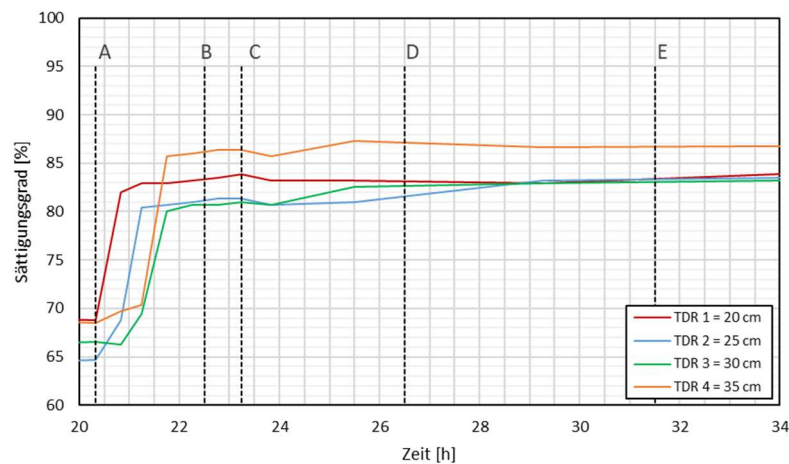


Abb. 54 Detail TDR Sensoren für SV 1.7_1-A

In Abb. 54 und Abb. 55 sind die Messdaten vom Moment der Wasserzugabe bis zum Erreichen des freien Wasserspiegels von 5 cm noch einmal im Detail dargestellt. Hier ist der Sättigungsprozess über die Höhe des Zylinders besser zu erkennen. Die TDR Sensoren haben, gleich wie die Tensiometer, der Reihe nach auf die Wasserzugabe angesprochen. Die Verläufe der Graphen sind sehr ähnlich, was auf eine gleichmäßig vertikale Sättigung deutet.

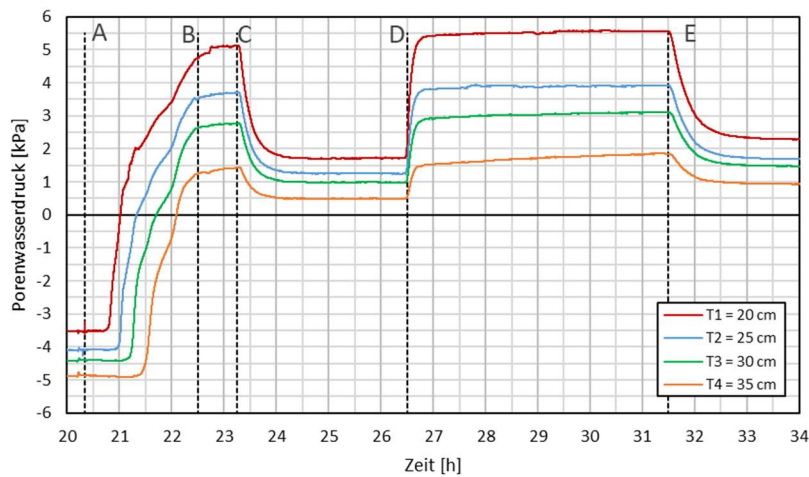


Abb. 55 Detail Tensiometer für SV 1.7_1-A

Beim Ausbau des Materials wurden bei diesem Versuch noch 6 Proben zur Bestimmung des Wassergehaltes entnommen. In Abb. 56 sind die TDR-Messungen beim Start und Ende des Versuches dargestellt. TDR 1 und TDR 4 waren nach dem Einbau deutlich höher als der theoretische Sättigungsgrad von 64 %. Verschmiert man die Messwerte nach dem Sättigungsvorgang so erhält man für die TDR Sensoren $S_r = 83,4 \%$ und für die entnommenen Bodenproben $S_{r,Ausbau} = 83,7 \%$.

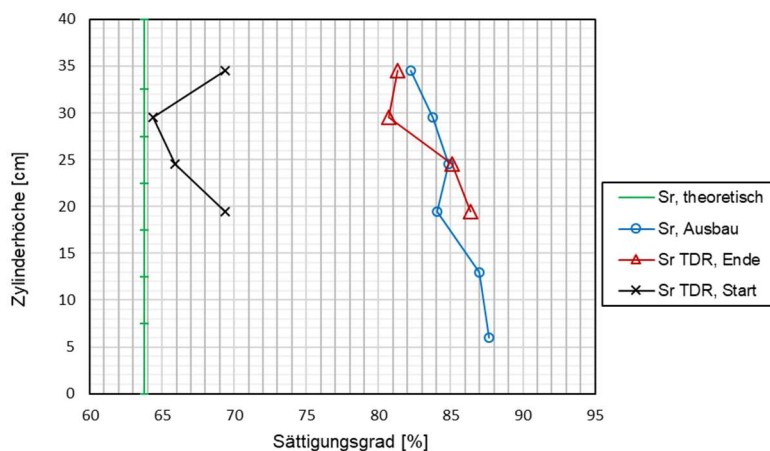


Abb. 56 Sättigungsgrade für SV 1_7.1-A

In Abb. 57 ist die Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch und der Sättigungsverlauf dargestellt. Zwischen Wasserzugabe und Erscheinen des Wasserspiegels an der Bodenoberkante wurden hier 5 TDR-Messungen durchgeführt. Im Bereich zwischen 0 kPa und 2 kPa fehlen Messpunkte, um die Kurve genauer zu definieren. Es ist jedoch gut erkenntlich, dass sich der Bewässerungsversuch deutlich vom Hyprop Versuch unterscheidet. Bei einem Anfangswassergehalt $w = 14 \%$ ergibt sich eine Saugspannung von -4 kPa und einen Sättigungsgrad von 67% . Somit unterscheidet sich der Sättigungsverlauf in diesem Bereich um ca. 4 kPa zu dem Hyprop Ergebnis.

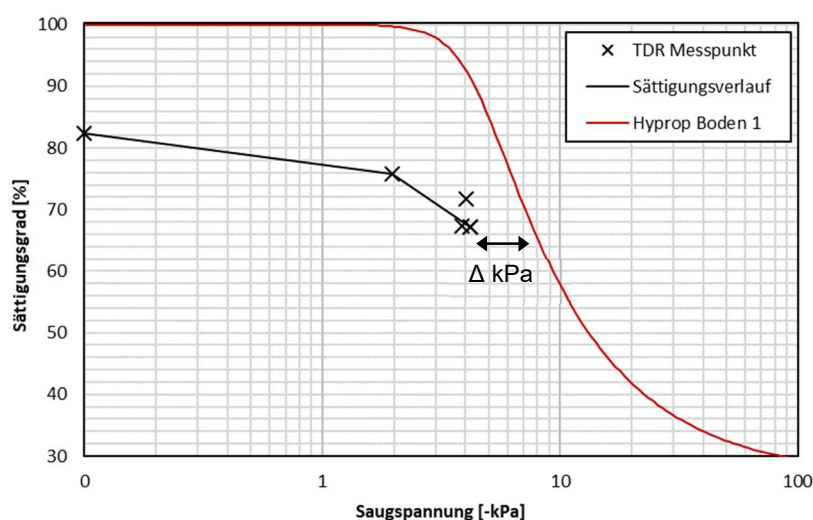


Abb. 57 Sättigungsverlauf für SV 1.7_1-A

6.1.2 Ergebnisse SV 1.7_1-B

Der zweite Sättigungsversuch wurde mit $w_{\text{opt}} = 14 \%$ und $\rho_d = 1,72 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,64$) durchgeführt. Durch den Ausfall einer TDR Sonde und eines Tensiometers blieben die Sensoreingänge auf einer Höhe von 25 cm frei. Der Anfangssättigungsgrad betrug laut TDR-Daten $64,5 \%$, $65,7 \%$, $67,6 \%$ für TDR 1, TDR 3, TDR 4. Vom Einbau bis zum Zeitpunkt der Wasserzugabe „A“ änderte sich der Wert der TDR Sensoren kaum (siehe Abb. 58). Nach einer Sättigungsdauer von ca. 2 h ist ein Sättigungsgrad für TDR 1 = $81,3 \%$, TDR 3 = $80,3 \%$, TDR 4 = $84,1 \%$ erreicht. Zeitpunkt „B“ beschreibt hier das Auftreten des Wassers an der Probenoberfläche und „C“ zeigt das Absperren des Wasserzulaufs an. Beide Punkte haben keinen Einfluss mehr auf den Verlauf der TDR-Messungen.

Die Tensiometer stellten sich gleich nach dem Einbau auf eine Saugspannung zwischen -3 und $-3,5 \text{ kPa}$ ein. Auch 8 h nach Einbau unterschieden sich die Messwerte kaum.

Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Tensiometer nicht mehr vom Einbauvorgang beeinflusst waren und sich der Saugspannung des umliegenden Bodens angepasst hatten. Dies erfolgte hier ca. 30 min nach dem Tensiometereinbau (Abb. 59). Beim Absperrn der Wasserzufuhr stellten sich die Tensiometer auf die Werte $T1 = 2,0$ kPa, $T3 = 1,6$ kPa und $T4 = 0,63$ kPa ein, welche dem hydrostatischen Wasserdruck entsprachen.

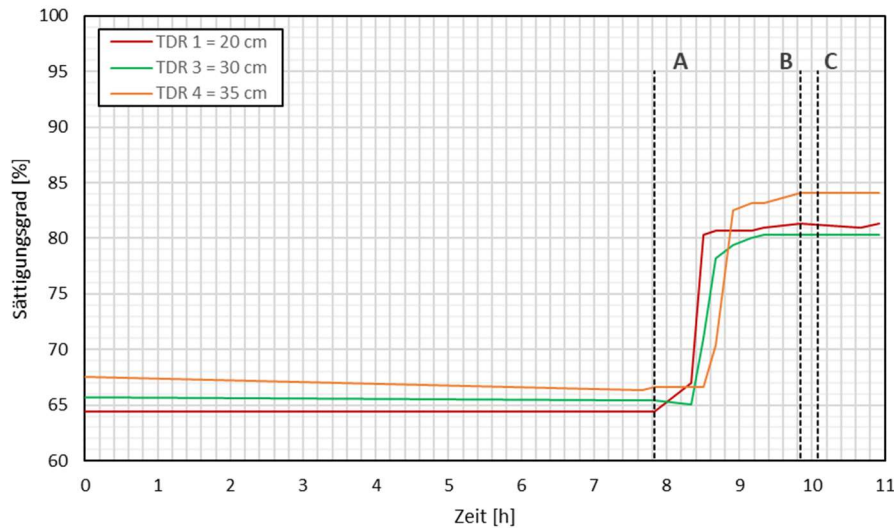


Abb. 58 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_1-B

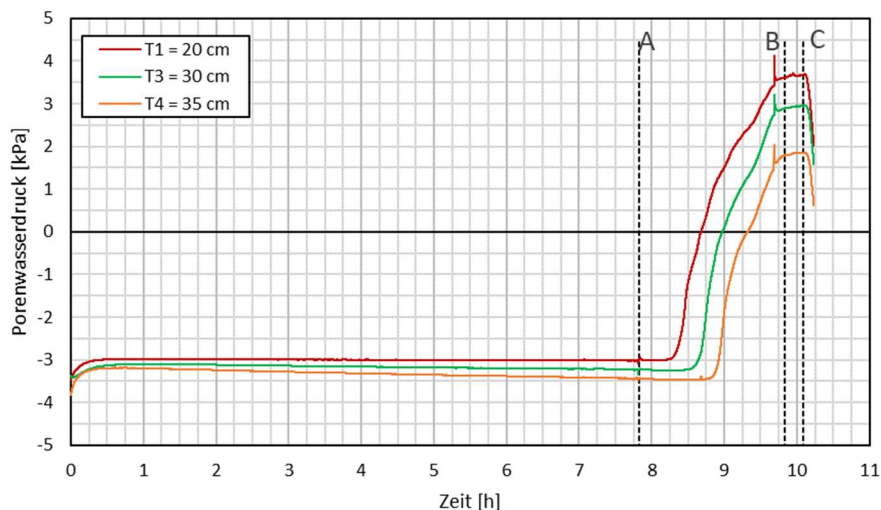


Abb. 59 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_1-B

Die Bewässerungskurve ist in Abb. 60 dem Ergebnis des Hyprop Versuchs gegenübergestellt. Beide Graphen weisen zu Beginn eine horizontale Tangente auf und fallen gleich stark ab. Die Bewässerungskurve endet mit einer Saugspannung von

- 3,5 kPa, dies entspricht bei diesem Sättigungsgrad einer Differenz von 8 kPa zur Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch.

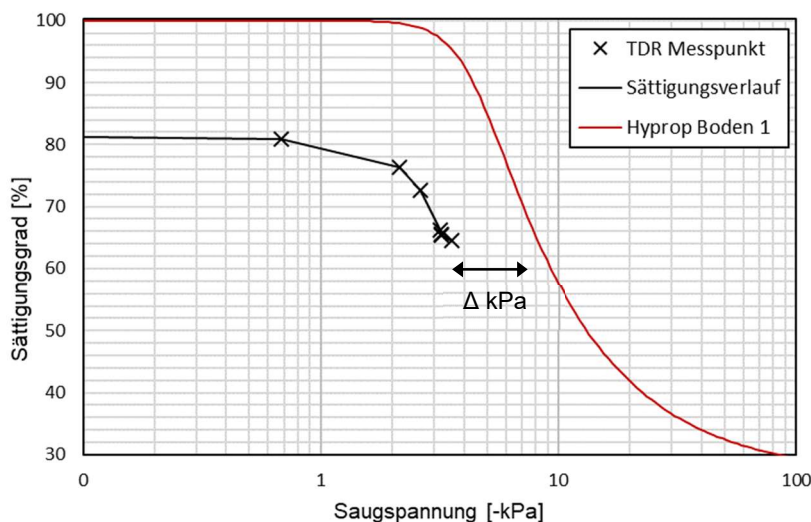


Abb. 60 Sättigungsverlauf für SV 1.7_1-B

6.1.3 Interpretation

Die Bodenproben waren schon nach weniger als 2,5 h von Wasser durchströmt. Dabei starteten beide Proben bei einem Anfangssättigungsgrad von ca. 65 – 70 %. Der gemittelte Sättigungsgrad ist bei SV 1.7_1-A mit 84,7 % um 2,8 % Punkte höher als bei SV 1.7_1-B. Dies ist auf eine nachhergehende Sättigung von 1-A zurückzuführen. Versuch 1-A wurde noch ca. 24 h mit einem freien Wasserspiegel von oben gesättigt, wobei Versuch 1-B gleich nach Wasseraustritt an der Oberfläche beendet wurde.

Die Startwerte der Tensiometer lagen bei Versuch B (-3 bis -3,5 kPa) leicht unter denen von Versuch A (-3,5 bis -4,9 kPa). Dieser minimale Unterschied kann durchaus mit der etwas höheren Trockendichte von Versuch A zusammenhängen. Je größer ρ_d desto größer ist auch der Wert der Saugspannung und des Sättigungsgrades. Vergleicht man die Bewässerungskurven mit den Wasserretentionskurven aus dem Hyprop Versuch (Abb. 57 und Abb. 60), sollte sich bei $w = 14\%$ eine Saugspannung von ungefähr -8 kPa einstellen. Die Differenz beträgt hier 4 kPa, jedoch kann in diesem niedrigen Saugspannungsbereich eine Schwankung von ± 4 kPa einem Sättigungsgrad von 100 % - 70 % zugeordnet werden. Die Differenz zwischen den Sättigungsverläufen und der Wasserretentionskurve ist höchstwahrscheinlich auf die Hysterese zurückzuführen.

6.1.4 Ergebnisse SV 1.7_2-A

„Boden 2“ wurde mit einem Anfangswassergehalt von $w = 14 \%$ und $\rho_d = 1,73 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,58$) eingebaut. Die höhere Trockendichte ergibt sich aus demselben Grund wie bei SV 1.7_1-A. Nach 15 h ist eine Auflast von 90 kg aufgebracht und die Plastikfolie, die den Boden vor Austrocknung schützt, vom Prüfzylinder entfernt worden. Der Start der Wasserzugabe erfolgte nach 35 h und es dauerte 2 h bis Wasser an der Bodenoberfläche ersichtlich war. An Punkt „F“ wurde die Wasserzufuhr gestoppt und es verblieb 1 cm Wasserspiegel auf dem Unterboden. Prinzipiell unterscheidet sich der Ablauf nicht zu „SV 1.7_2-A“, nur wurde in diesem Versuch die Auflast während der Tensiometer-Messung aufgesetzt („A“).

- A: 90 kg Auflast aufgebracht
- B: Start der Wasserzugabe
- C: Wasser erscheint auf Bodenoberkante
- D: Wasserzufuhr geschlossen
- E: Wasserzufuhr geöffnet
- F: Wasserzufuhr geschlossen, 1 cm WSP auf dem Unterboden

Abb. 61 zeigt, dass das langsame Aufbringen des Gewichtes die Trockendichte nicht veränderte. Die Abnahme des Sättigungsgrades ab Zeitpunkt „A“ war nicht der Auflast bedingt, sondern der langsamen Austrocknung des Bodens, hier speziell die oberen Schichten. Der Anfangssättigungsgrad von 69,5 %, 68,2 %, 65 % und 66,6 % stieg auf 87,8 %, 87,8 %, 85,9 % und 88,5 % für TDR 1 – 4.

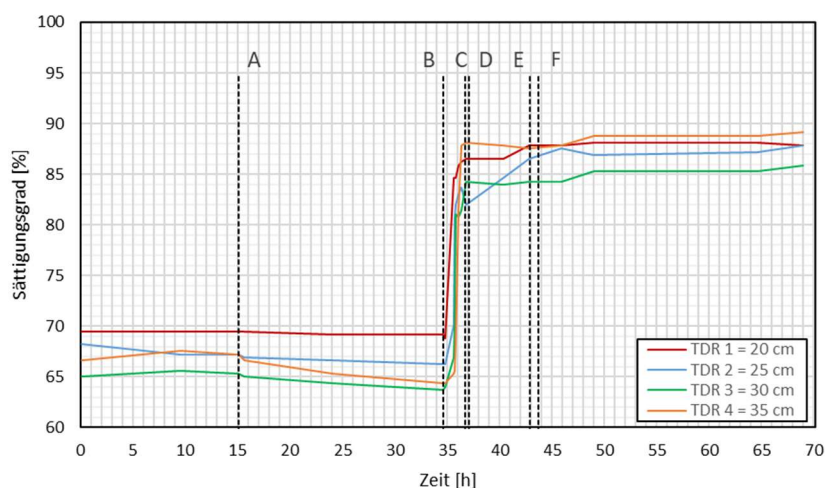


Abb. 61 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_2-A

Die Tensiometer 1 – 3 stellten sich schnell nach dem Einbau auf eine Saugspannung im Bereich von -7 bis -8 kPa ein (Abb. 62). T4 benötigte ca. 6.5 h, um sich auf das Bodenmaterial einzustellen. Ab Zeitpunkt „A“ hat die Saugspannung der Tensiometer in den zwei höheren Schichten etwas erhöht. Durch das Entfernen der Plastikfolie begannen die oberen Schichten auszutrocknen. Dies war besonders bei T3 und T4 zu beobachten. Die in der Probe tieferliegenden Tensiometer wurden davon weniger beeinflusst. Im Detailausschnitt der Tensiometer-Messungen in Abb. 63 ist erkennbar, dass die Werte der Tensiometer sich innerhalb von 15 min vom Saugspannungsbereich in den positiven Druckbereich änderten. Zwischen 35,5 h und 36,5 h wurden die Werte linear interpoliert, da einen Ausfall der Messtechnik keine Daten gespeichert werden konnten. Bei „E“ wurde der Wasserspiegel auf 1 cm über den Unterboden erhöht und bei Zeitpunkt „F“ die Wasserzufuhr abgestellt.

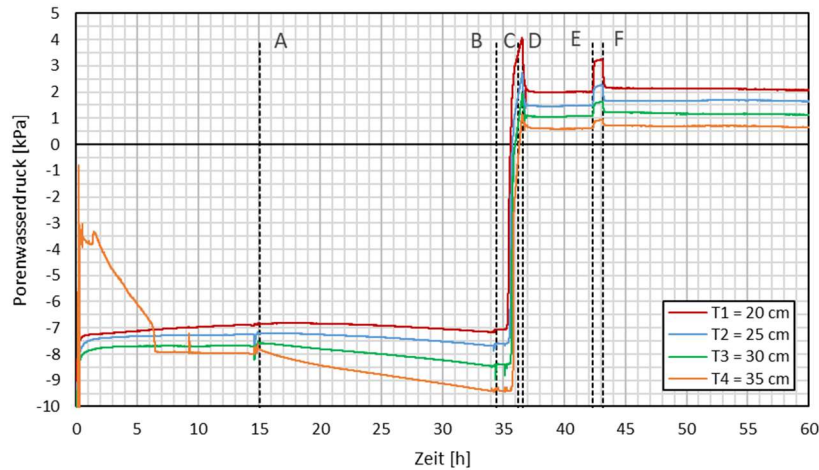


Abb. 62 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_2-A

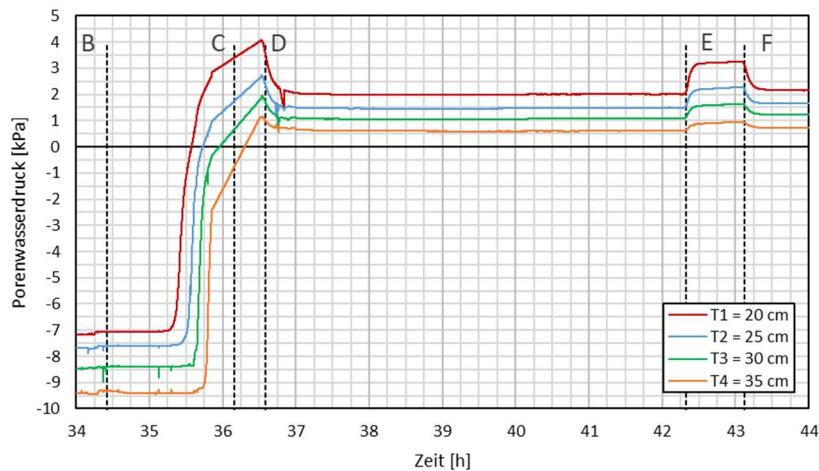


Abb. 63 Detailausschnitt Tensiometer-Messung für SV 1.7_2-A

Die Änderung des Sättigungsgrades vor und nach der Wasserzugabe ist in Abb. 64 aufbereitet. Der theoretische Sättigungsgrad nach dem Einbau des Bodens lag bei 65,3 %. Die Messwerte der TDR Sonden haben sich durch die Wasserzugabe von ca. 67 % auf 88 % erhöht. Die Ergebnisse aus den Wassergehaltsbestimmungen beim Bodenausbau ($S_{r,Ausbau} = 88,2\%$) stimmten mit den TDR-Messungen am Ende ($S_r = 88,1\%$) überein. Bei genauer Betrachtung des Sättigungsverlaufes kann eine konstante Sättigung über die Zylinderhöhe angenommen werden.

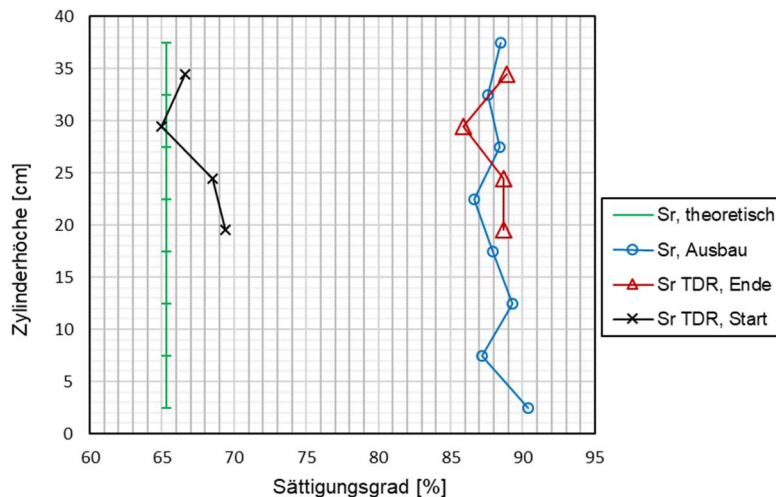


Abb. 64 Sättigungsgrade für SV 1.7_2-A

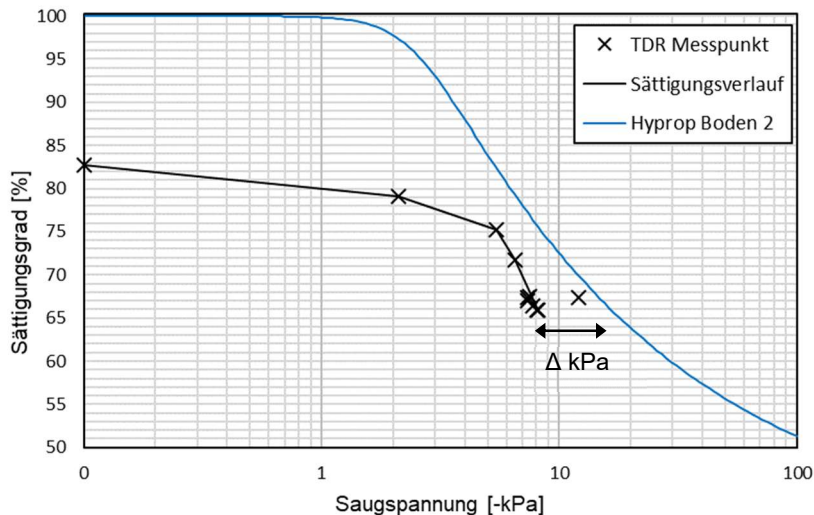


Abb. 65 Sättigungsverlauf für SV 1.7_2-A

In Abb. 65 ist der Sättigungsverlauf und die Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch dargestellt. Die Sättigungskurve startet 83 %. Dieser Wert liegt 5 % unter dem letztendlich erreichten Sättigungsgrad für SV 1.7_2-A. Grund für diese Differenz ist eine

Sättigung die im Druckbereich der Tensiometer stattgefunden hat. Die Messpunkte nähern sich bei ca. -8 kPa der Wasserretentionskurve an. Die Differenz in der Saugspannung beträgt jedoch ca. 12 kPa.

6.1.5 Ergebnisse SV 1.7_2-B

Der Wassergehalt und die Trockendichte blieben mit $w = 14 \%$ und $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,61$) gleich. Bei diesem Versuch sollte ein Kolben eines hydraulischen Prüfstandes statt einem Auflastgewicht die obere Filterplatte gegen eine vertikale Verschiebung nach oben sperren. Beim Hinunterfahren des Kolbens kam es zu einer stoßartigen Belastung der Filterplatte („A“) und diese wurde 8 mm in das Bodenmaterial gedrückt. Dies ergab eine neue Trockendichte von $\rho_d = 1,73 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,58$) ab Zeitpunkt „A“. Auf den Sättigungsversuch folgte ein weiterführender Belastungsversuch, deswegen konnte für diese Probe kein gravimetrischer Wassergehalt beim Ausbau des Bodens bestimmt werden. Im Verlauf der Masterarbeit wurde ein TDR-Sensor beschädigt, daher blieb bei diesem Versuch der Sensoreingang auf 25 cm unbelegt.

- A: Filterplatte mit hydraulischen Kolben 8 mm in den Boden gedrückt
- B: Start der Wasserzugabe
- C: Wasserzufuhr geschlossen
- D: Wasserzufuhr geöffnet
- E: Wasserspiegel erscheint auf Bodenoberkante
- F: Wasserzufuhr geschlossen

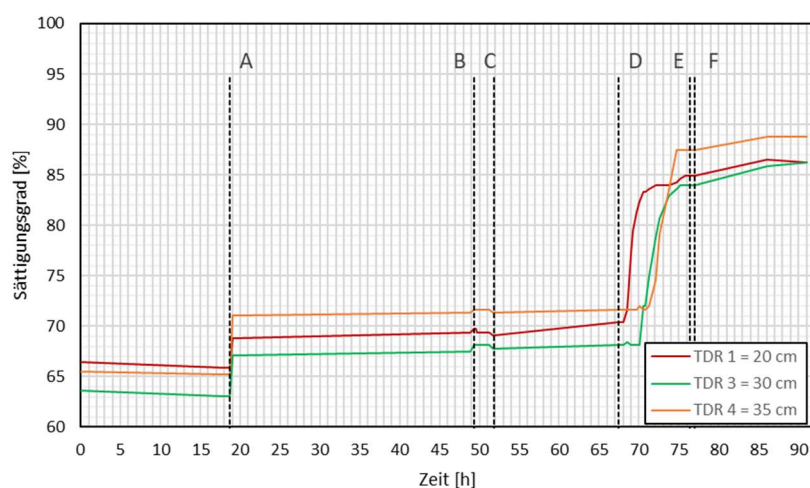


Abb. 66 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_2-B

TDR 1, TDR 2 und TDR 4 starteten mit $S_r = 66,5 \%$, $63,7 \%$ und $65,5 \%$ (Abb. 66). Durch das Zusammendrücken des Zylinders kam es zu einer Porenraumverkleinerung und somit sprangen die TDR-Werte in Punkt „A“ auf einen höheren Sättigungsgrad. TDR 4 stieg hierbei um 4,2 Prozentpunkte an. Der Wert des Anstieges nahm über die Tiefe ab. Das deutet darauf hin, dass die höherliegenden Schichten stärker zusammengedrückt wurden als die tieferliegenden. Jedoch wurde auch bei TDR 1 noch ein Sprung von 1 % gemessen. Die Sättigungsphase („D“) startete bei 67,5 h und es dauerte 8 h („E“) bis Wasser die Probe durchflossen hatte. Nach dem Versuch betrug der Wert der Sättigung 86,2 %, 86,2 % und 88,8 % für TDR 1, TDR 3 und TDR 4.

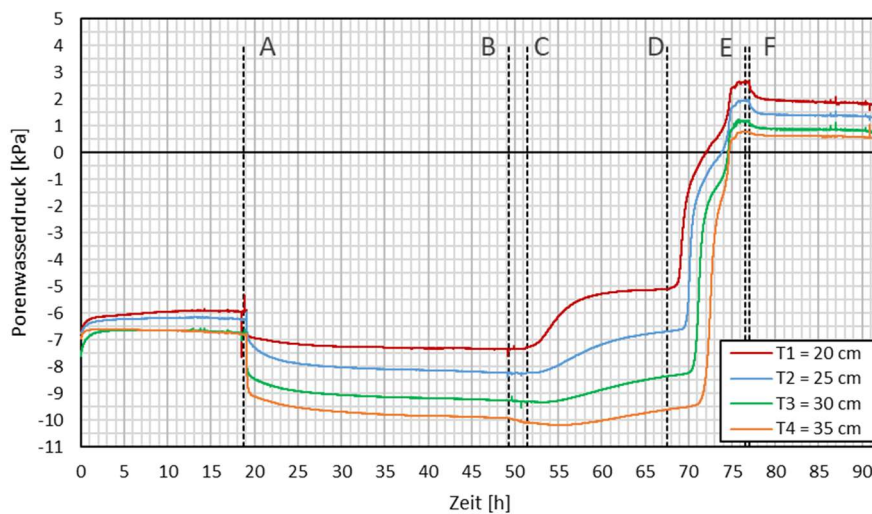


Abb. 67 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_2-B

Der Startwerte der Tensiometer lag nach dem Einbau zwischen - 6 und - 7 hPa (Abb. 67). Bei Zeitpunkt „A“ stieg der Wert der Saugspannung sprunghaft an. Dies ist wiederum auf eine schlagartige Kompression des Bodens zurückzuführen. Eine Verkleinerung des Porenraumes führte zu höheren Saugspannungen. Zeitpunkt „B“ und „C“ beschreiben ein Öffnen der Wasserzufuhr mit anschließendem Absperren. Obwohl die TDR-Messung keine Änderung der Sättigung zeigte, verringerten sich die Saugspannungen in den darauffolgenden 15 h. Da sich der Wassergehalt in den untersten Bodenschichten änderte, hat dies Auswirkungen auf das Matrixpotential der darüber liegenden Schichten. Anhand von T1 ist gut zu erkennen, wie die Saugspannung rasch von -7,5 kPa, abfiel und sich bei 57 h auf -5 kPa wieder einpendelte. T4 war nur mehr gering von diesem Effekt betroffen. Die Reduktion der Saugspannung betrug hier nur 0,5 kPa. Bei einem erneuten öffnen der Wasserzufuhr stiegen dann alle Tensiometer mit ähnlichen Verlauf auf den Strömungsdruck und stellten sich nach dem Schließen der Wasserzufuhr auf den hydrostatischen Wasserdruck ein.

Abb. 68 zeigt eine Annäherung der Bewässerungskurve an die Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch. Durch die lange Sättigungsdauer in diesem Versuch sind mehrere Messpunkte für den Sättigungsverlauf vorhanden und die Kurve kann relativ genau bestimmt werden. Sie startet mit 85 % Sättigungsgrad und nähert sich bei 67 % auf eine Differenz von 4 kPa der Wasserretentionskurve an.

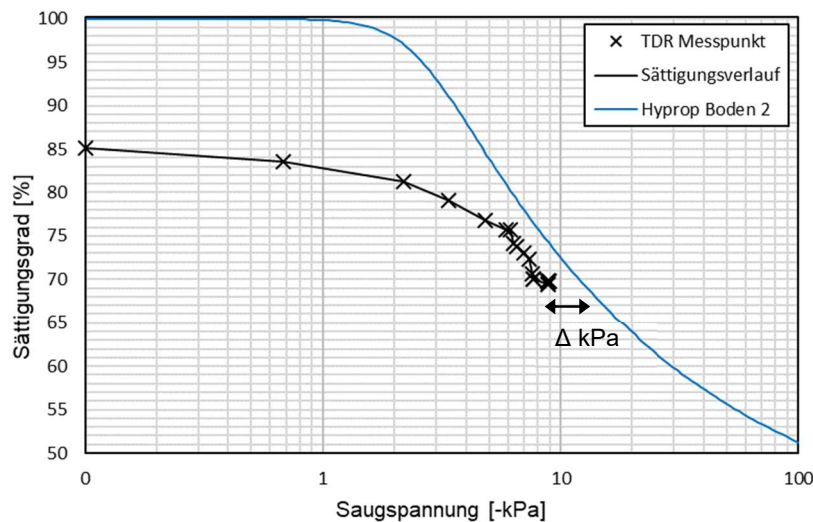


Abb. 68 Sättigungsverlauf für SV 1.7_2-B

6.1.6 Interpretation

Beim Vergleich der beiden Versuche fällt sofort die unterschiedlich lange Dauer der Sättigungsphase auf. Während 2-A schon nach 2 h von Wasser durchflossen war, hatte die erste Wasserzugabe bei 2-B (2,5 h von „B“ – „C“) keinen Einfluss auf die TDR-Messungen. Auch die Saugspannungen nahmen in den darauffolgenden 15 h vergleichsweise sehr langsam ab. Das Zusammendrücken durch den Kolben in Versuch 2-B hat den Porenraum verkleinert und die Durchlässigkeit vermindert. Die Sättigungsphase dauerte daher über 8 h länger als bei 2-A. Auf den Grad der Sättigung hatte dies aber keinen Einfluss. Mit der Trockendichte von $\rho_d = 1,73 \text{ g/cm}^3$ wurde für SV 1.7_2-A und SV 1.7_2-B eine Sättigung von 87,1 % und 87,1 % erreicht.

Die Bewässerungskurven von „Boden 2“ nähern sich im Bereich des Anfangssättigungsgrades der Wasserretentionskurve an. Der Hysterese-Effekt kann in den zwei Versuchen gut dargestellt werden. Jedoch liegt der Sättigungsgrad bei einer Saugspannung von 0 kPa etwas unter dem letztendlich erreichten Sättigungsgrad. Dies ist auf die nachhergehende Sättigung des Bodens zurückzuführen. Porenräume füllten sich erst, als die Tensiometer schon hydrostatischen Druck angezeigt haben.

6.1.7 Ergebnisse SV 1.7_3-A

Der intermittierend gestufte „Boden 3“ wurde mit dem optimalen Wassergehalt $w_{opt} = 11 \%$ und $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,59$) eingebaut. Dies führte zu einem Sättigungsgrad von TDR 1 = 52,7 %, TDR 2 = 50,8 % und TDR 4 = 54,3 % nach dem Materialeinbau. Innerhalb „A“ und „B“ ist der Zeitraum zwischen dem Start der Wasserzugabe und dem Erscheinen des Wasserspiegels auf der Bodenoberkante gekennzeichnet. Es dauerte 3 h bis Wasser die Probe durchströmt hat. Die Wasserversorgung wurde bei „C“ geschlossen. Zu diesem Zeitpunkt stand der Wasserspiegel bei +2cm auf der Bodenoberkante. Nach weiteren 24 h stiegen die TDR-Werte auf 77,4 %, 79,7% und 87,1 % für TDR 1, TDR 2 und TDR 4 (siehe Abb. 69). Besonders TDR 4 weist mit +4,5 % eine große Zunahme im Sättigungsgrad auf. Die bedeutet, dass sich „Boden 3“ noch im Nachhinein mit dem Wasser an der Oberfläche gesättigt hat. Der Wasserspiegel reduzierte sich dabei von 2 cm auf 0,7 cm.

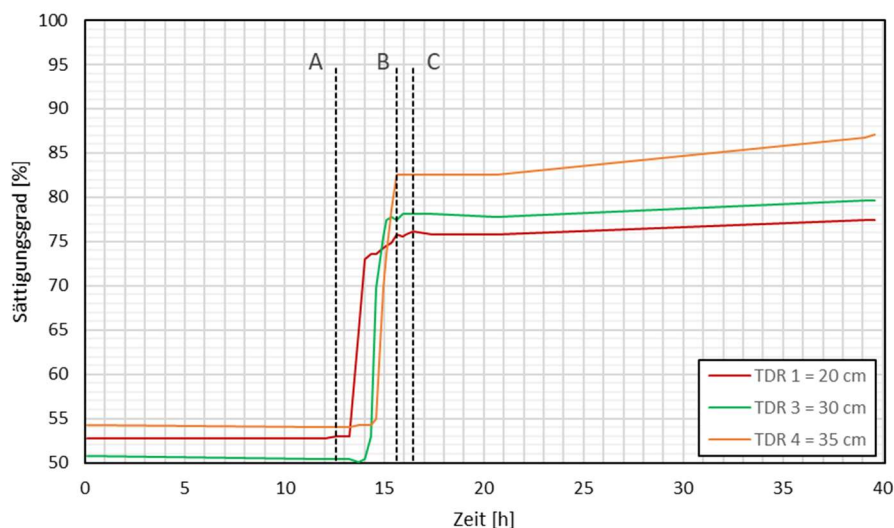


Abb. 69 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_3-A

Die Tensiometer stellten sich etwa 2 h nach ihrem Einbau auf -5,5 kPa bis -6,5 kPa ein (siehe Abb. 70). Der Ausschlag der Graphen bei 7 h ist wahrscheinlich auf ein Berühren der Messtechnik zurückzuführen und ist nicht weiter relevant. Die Saugspannungswerte nahmen leicht zeitversetzt ab und wanderten mit einem sehr ähnlichen Verlauf in den Druckbereich. Hier stellten sie sich auf den hydrostatischen Druck ein. Das leichte Abnehmen zum Ende der Messung hin ist auf die Reduktion des freien Wasserspiegels von 2 cm auf 0,7 cm zurückzuführen.

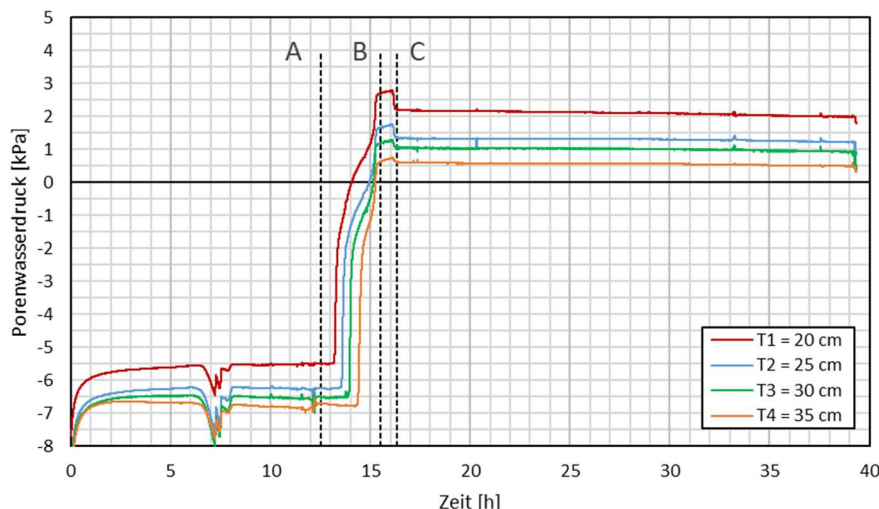


Abb. 70 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_3-A

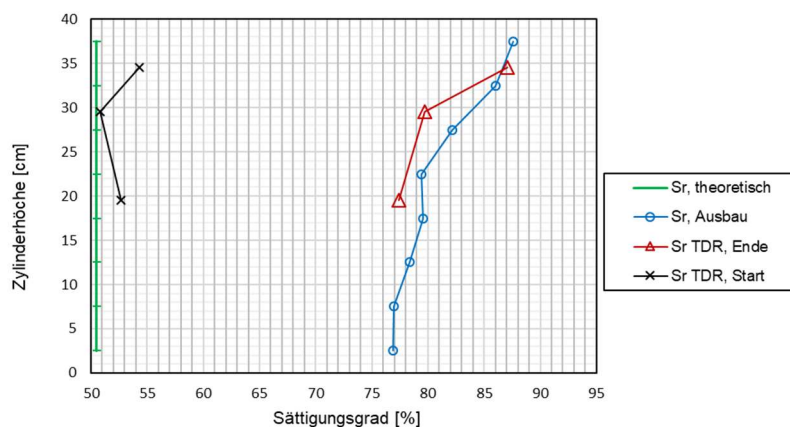


Abb. 71 Sättigungsgrade für SV 1.7_3-A

Zur Wassergehaltsbestimmung wurden beim Ausbau über die Tiefe des Prüfzylinders 8 Bodenproben entnommen. Der Sättigungsgrad in Abb. 71 nimmt mit der Materialhöhe zu. Obwohl die Wasserzugabe von unten durch die gesamte Probe erfolgte, waren die oberen Bodenschichten stärker mit Wasser gesättigt. Auch die TDR-Messungen zeigen einen höheren Sättigungsgrad bei TDR 4 in 35 cm Zylinderhöhe. Die TDR Sonden starteten bei 52,7 %, 50,8 %, 54,3 % und stiegen auf 77,4 %, 79,7 %, 87,1 % Sättigung für TDR 1, TDR 3 und TDR 4. Der Verlauf der TDR Sonden zeigt eine Zunahme des Sättigungsgrades über die Höhe und deutet daher auf eine nachfolgende Wasseraufnahme der Bodenprobe hin.

Die Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch in Abb. 72 nimmt, gleich wie die Bewässerungskurve, direkt nach Beginn schon bei sehr niedrigen Saugspannung ab. Die Bewässerungskurve beginnt bei 76 % Sättigung und ist somit 5 % niedriger als der

erreichte Sättigungsgrad für diesen Versuch. Der Anfangswassergehalt $w = 11\%$ resultiert in einem Sättigungsgrad von 50% mit einer Saugspannung von $-8,5\text{ kPa}$. Die Differenz zum Hyprop Ergebnis ist in diesem Bereich sehr hoch ($> 90\text{ kPa}$).

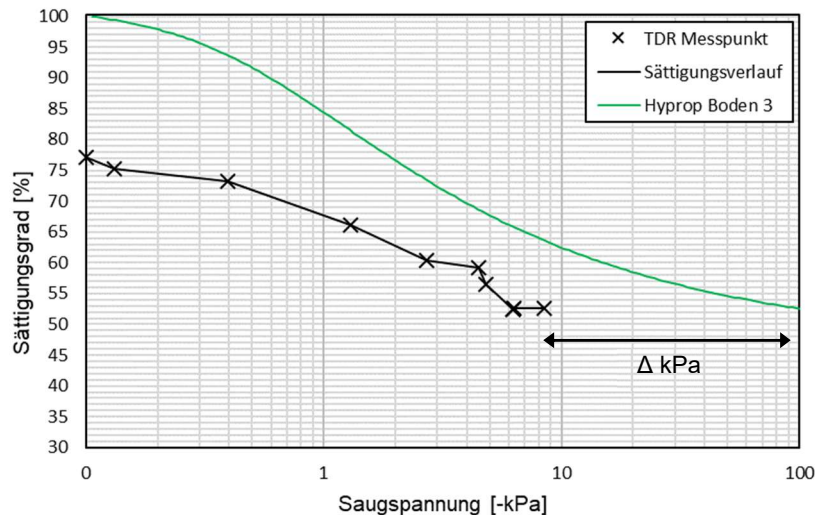


Abb. 72 Sättigungsverlauf für SV 1.7_3-A

6.1.8 Ergebnisse SV 1.7_3-B

In diesem Versuch erfolgte die Sättigung mit einer variablen Druckhöhe. Mittels eines Flaschenzuges wurde dafür das hydraulische Gefälle vom Zylinderboden ausgehend immer um 5 cm erhöht. Wenn sich die Sättigung auf dieses Niveau (5 cm) eingestellt hat, wurde der Zylinder um weitere 5 cm erhöht. Erst als sich der WSP im Wasserbehälter und im Prüfzylinder ausgeglichen hatten, erfolgte eine weitere Erhöhung um 5 cm . Dieser Vorgang wurde bis auf eine Höhe von 40 cm wiederholt. Der Versuch nützt die Kapillarität des Bodens und durch das langsame Steigern der hydraulischen Druckhöhe sollten sich zuerst die Feinporen mit Wasser ansaugen und in späterer Folge die Makroporen füllen. Durch diesen Effekt sollte auch weniger Luft in den Mikroporen eingeschlossen werden und somit ein höherer Sättigungsgrad erreicht werden. Die Anfangsbedingungen waren mit $w_{\text{opt}} = 11\%$ und $\rho_d = 1,7\text{ g/cm}^3$ ($e = 0,59$) wie bei SV 1.7_3-A.

- A: Start Wasserzugabe, WSP 0 – 5 cm
- B: Stufe 2, WSP 5 – 10 cm
- C: Stufe 3, WSP 10 – 15 cm
- D: Stufe 4, WSP 15 – 20 cm
- E: Stufe 5, WSP 20 – 25 cm
- F: Stufe 6, WSP 25 – 30 cm
- G: Stufe 7, WSP 30 – 35 cm
- H: Stufe 8, WSP 35 – 40 cm
- I: Wasserspiegel bis 1 cm über Bodenoberkante aufgefüllt
- J: Wasserzugabe gestoppt

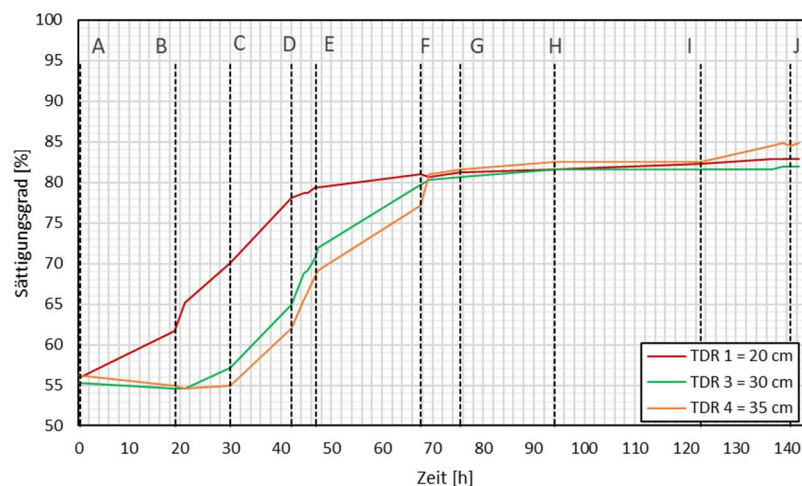


Abb. 73 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.7_3-B

Die TDR Sonden haben zu Beginn des Versuches einen Sättigungsgrad zwischen 55,3 und 56,2 % gemessen (Abb. 73). Obwohl die erste Stufe mit einer hydraulischen Höhe von 5 cm über dem Zylinderboden begann, ändert sich der Messwert des untersten Sensors (TDR 1) sofort. TDR 3 und 4 zeigen keinen Einfluss bis zum Zeitpunkt „B“. Daraus lässt sich ableiten, dass die kapillare Steighöhe bei „Boden 3“ bei ca. 20 cm liegt. TDR 3 hat ab „B“ und TDR 4 ab „C“ einen Anstieg des Wassergehaltes gemessen. Die letzte Stufe wurde zum Zeitpunkt „H“ erreicht. Hier hatten sich TDR 1 = 82,9 % und TDR 3 = 81,9 % schon auf den Endwert eingestellt. Trotz einer Fortführung des Versuches von 55 h haben sich die Messwerte dieser zwei Sensoren nicht mehr merklich verändert. Nur TDR 4 stieg ab Punkt „I“ auf 84,8 % Sättigung an.

Die Saugspannungswerte in Abb. 74 veränderten sich, wie die TDR-Messungen, stufenweise. Die Tensiometer zeichneten schon vor den TDR Sonden Veränderungen auf, da sich das Matrixpotential verringert, wenn der Abstand zum Bezugsniveau

geringer wird. Deswegen hat die Saugspannung in T4 schon ab dem Zeitpunkt „B“ abgenommen und nicht ab Zeitpunkt „C“ wie TDR 4.

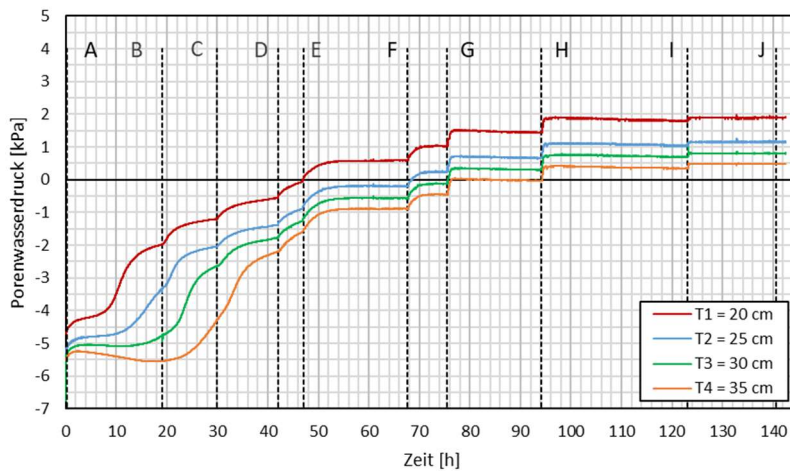


Abb. 74 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.7_3-B

Durch die lange Aufsättigungsdauer sind auch hier mehrere Messpunkte zur Bestimmung der Bewässerungskurve (Abb. 75) aufgezeichnet. Sie verläuft ab 1 kPa Saugspannung parallel zur Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch. Ein Schnittpunkt zwischen den beiden Kurven ist hier nicht ersichtlich. Bei einem Sättigungsgrad von 56 % weist die Bewässerungskurve -6 kPa auf, wohingegen die Wasserretentionskurve, durch ihren flachen Verlauf bei $S_r = 56\%$ eine Saugspannung von -40 kPa wiedergibt.

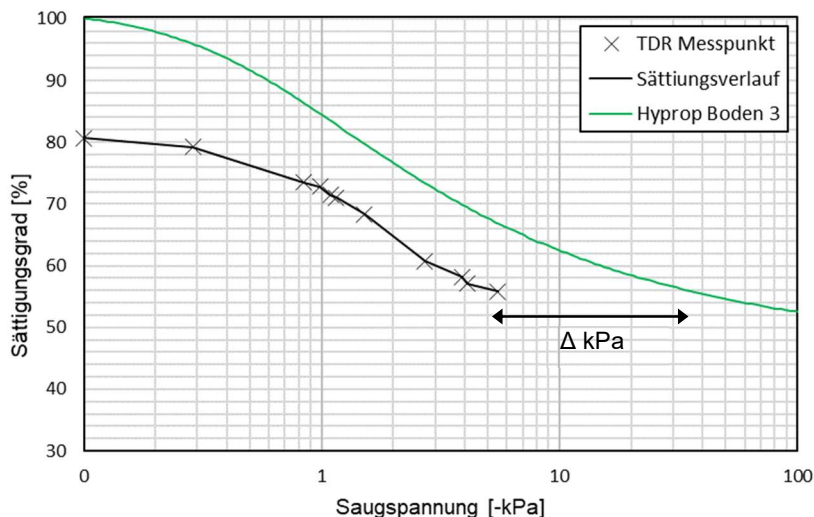


Abb. 75 Sättigungsverlauf für SV 1.7_3-B

6.1.9 Interpretation

Angesichts der unterschiedlichen Sättigungsmethoden sind die Verläufe der Tensiometer und der TDR Sonden schwer zu vergleichen. In „Versuch 3-B“ sollte, wie beim Hyprop Versuch, eine bessere Sättigung über die Kapillarität des Bodens erfolgen. Die Feinporen sollten sich kapillar mit Wasser vollsaugen und so weniger Porenluft einschließen. Die Grobporen hätten danach durch das stufenweise Anheben des Wasserspiegels gefüllt werden sollen. Trotz der längeren Aufsättigungsdauer von insgesamt 6 Tagen, konnte ein nur leicht höherer Sättigungsgrad als bei „Versuch 3-A“ erreicht werden. Die veränderte Sättigungsmethode erreichte einen gemittelten Wert von $S_r = 83,5 \%$ und ist somit nur um 1,5 Prozentpunkte höher als im ersten Versuch. Dies kann genauso auf die längere Sättigungsdauer zurückgeführt werden und hat nicht zwingend mit dem veränderten Sättigungsprozedere zu tun.

Eine Annäherung der Bewässerungskurven an die Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch ist bei diesen Versuchen schwierig festzustellen. Die Kurven verlaufen beinahe parallel. Ein Schnittpunkt zwischen Bewässerungs- und Entwässerungskurve ist wahrscheinlich erst im Bereich betragsmäßig sehr hoher Saugspannungen vorzufinden. Der unterschied in den Saugspannungen beträgt beim Anfangssättigungsgrad über 40 kPa.

6.2 Diskussion der Ergebnisse aus der Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$

In dieser Testreihe wurden für jeden Boden zwei Versuchsdurchgänge abgewickelt. Dabei stellte sich heraus, dass die Ergebnisse der Böden untereinander gut übereinstimmen. Somit lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die Versuche mit der Trockendichte $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$ reproduzierbare Ergebnisse liefern.

Obwohl „Boden 2“ mit $70 \% < 0,063 \text{ mm}$ den höchsten Feinanteil aufweist, wurde mit $87,5 \%$ und $87,1 \%$ der höchste Sättigungsgrad gemessen. Auch die beiden anderen Versuchsböden befinden sich in einem Bereich zwischen $82 - 85 \%$ Sättigung. Die Sättigungsphase ist mit $2 - 3 \text{ h}$ bei allen Böden gleich. Einen Unterschied aufgrund der Kornverteilung ist nur schwer festzustellen. Viel höher ist der Einfluss der Trockendichte. Der Sättigungsgrad ist in diesem Bereich sehr sensibel – eine Änderung der Einbaudichte um $\pm 0,3 \text{ g/cm}^3$ für z.B. „Boden 2“, würde in diesen Versuchen den Sättigungsgrad um $\pm 4\%$ verändern. Mit diesem Versuchsaufbau liegt der wahrscheinlich maximal zu erreichende Sättigungsgrad bei ca. $85 - 88 \%$. Der hohe Anfangswassergehalt bedingt einen Anfangssättigungsgrad $> 55 \%$. Dies bedeutet,

dass mehr als die Hälfte des Porenvolumens schon vor Versuchsbeginn mit Wasser gefüllt ist. Dabei wird im Einbauprozess Luft in den Poren eingeschlossen, aus denen sie später sehr schwer entweichen kann.

Die ermittelten Sättigungsverläufe aus den Versuchen bilden den Effekt der Hysterese ab. Sie sind eine Annäherung an die tatsächliche Bewässerungskurve aus dem Hyprop Versuch. Der Kurvenverlauf kann nur über die TDR-Sonden und über die manuellen Datenablesungen gebildet werden. Eine höhere Anzahl an aufgezeichneten Messpunkten während des Sättigungsvorganges liefern somit eine bessere Abbildung des Sättigungsverlaufes. Speziell bei „Boden 2“ nähert sich der Verlauf aus der Bewässerung sehr gut der Wasserretentionskurve aus dem Hyprop Versuch. Für diesen Boden kann ein wahrscheinlicher Schnittpunkt der beiden Kurven extrapoliert werden (siehe Abb. 68). Die Auswirkung der Hysterese ist von der Kornverteilung abhängig. Bei einer Kornverteilung mit hohen Feinanteilen werden die Mikroporen durch die Kapillarität im Bewässerungsvorgang schon vor den Makroporen gesättigt. Dies ist hier bei „Boden 2“ der Fall. Bei einem höheren Anteil an Makroporen ist der Effekt der Hysterese schon bei höheren Saugspannungen zu erkennen (siehe Abb. 75). Im Vergleich der Bewässerungskurven von „Boden 2“ und „Boden 3“ ist das sehr gut erkennbar.

Sobald der Wasserspiegel im Boden über die Tensiometer steigt, zeigen diese den hydrostatischen Druck an. Obwohl der Boden noch nicht zu 100 % gesättigt ist, messen die Tensiometer, auch im teilgesättigtem Bereich, eine zusammenhängende Wassersäule. Daher darf nicht angenommen werden, dass der Boden gesättigt ist sobald die Tensiometer vom Saugspannungsbereich in den positiven Druckbereich wandern.

6.3 Sättigungsversuche mit $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$

6.3.1 Ergebnisse SV 1.6_1

Dieser Versuch startete mit $w_{\text{opt}} = 13,5 \%$ und $\rho_d = 1,63 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,71$). Zusätzlich zum Sättigungsversuch wurde noch ein Versuch zum Verdichtungseinfluss einer monotonen Laststeigerung durchgeführt. Der Prüfzylinder ist dafür in den Prüfstand geschoben und vor der Sättigung mit einer kontinuierlichen Laststeigerung von 0 – 15 kN und einer Geschwindigkeit von 2 kN/min beansprucht worden. Auf den Unterboden war eine Gleisschotterplatte aufgesetzt. Zum Zeitpunkt der monotonen Belastung „A“ erfassten die TDR Sonden keine Veränderungen, die auf eine Verdichtung des Bodens schließen lassen. Abb. 76 zeigt, wie sich der Sättigungsgrad ab „B“ von anfangs ca. 50 % auf 71,3 %, 70,4 % und 73,6 % für TDR 1, TDR 2 und TDR 3 erhöhte. Vom Zeitpunkt der

Wassergabe bis zum Auftreten des Wassers auf der Bodenoberkante dauerte es 45 min.

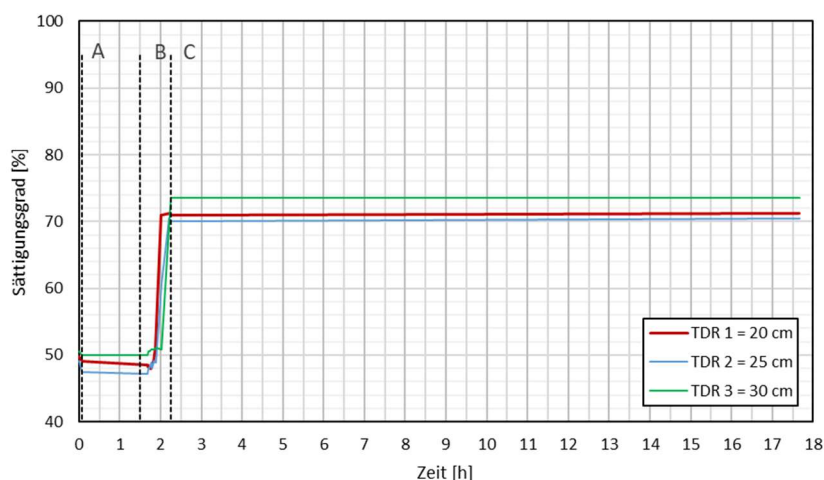


Abb. 76 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.6_1

Durch die monotone Belastung im Prüfstand haben sich die Porenwasserdrücke nicht geändert, da die Gleisschotterplatte nur in die obere Bodenschicht eingedrückt wurde und keine Veränderung der Lagerungsdichte der unteren Schichten verursachte. Die Saugspannungen nahmen nach dem Start der Sättigungsphase („B“) sehr rasch ab und wanderten in den Druckbereich (siehe Abb. 77). Nach dem Absperrern der Wasserzufuhr in Punkt „C“ sanken die Messwerte vom Strömungsdruck auf den hydrostatischen Wasserdruck ab. Diese Differenz beträgt hier bis zu 5 kPa bei T1.

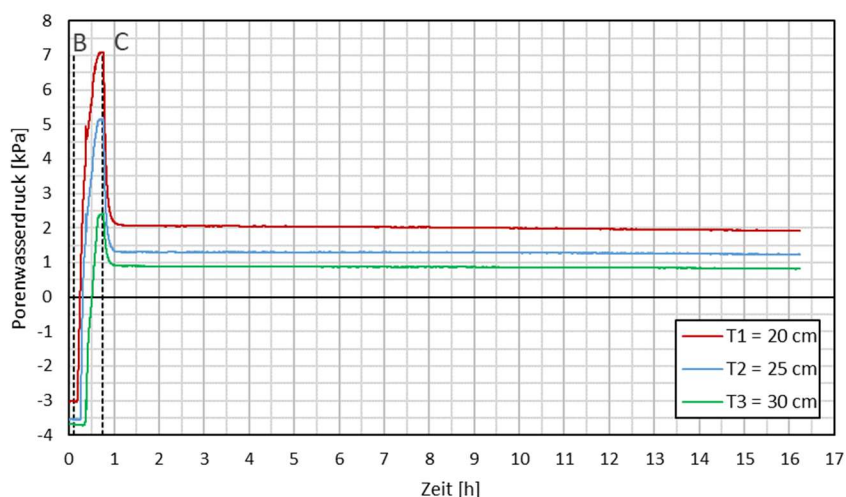


Abb. 77 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.6_2

6.3.2 Ergebnisse SV 1.6_2-A

„Boden 2“ wurde mit $w = 14\%$ und $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,71$) eingebaut. Im Anschluss ist die zweite Filterplatte und die Auflast von 90 kg auf den Unterboden aufgesetzt worden. Kurz nach dem Start der Wasserzugabe ist mit Feinanteilen verschmutztes Wasser lokal an der Oberfläche des Unterbodens ausgetreten. Der Versagensmechanismus hat im Inneren der Bodenprobe stattgefunden. Die geringe Trockendichte führte zu einer internen Erosion des Bodens. Indraratna et al (2018) behandeln in ihrer Arbeit das Auftreten von Suffusion und Hebung bei einem Durchströmen von Bodenproben. In sind die beiden Versagensmechanismen dargestellt. Hebung entwickelt sich in intern stabilen Bodenproben bei höheren hydraulischen Gradienten, wenn die Sickerspannung höher ist als die effektiven Vertikalspannungen ($\sigma_s > \sigma'_{vt}$). Suffusion hingegen tritt bei niedrigeren hydraulischen Gradienten und bei innerlich instabilen Böden auf. Hierbei haben die Feinanteile keinen mechanischen Kontakt zum stabilen Korngerüst. Die Korn-zu-Korn-Reibung ist kleiner als die Kontaktreibung des Korngerüstes. Die Schleppspannung ist höher als die Kontaktspannung der Feinanteile und verursacht daher einen Materialtransport der Feinanteile durch den Porenraum ($\sigma_s < \alpha \sigma'_{vt}$).

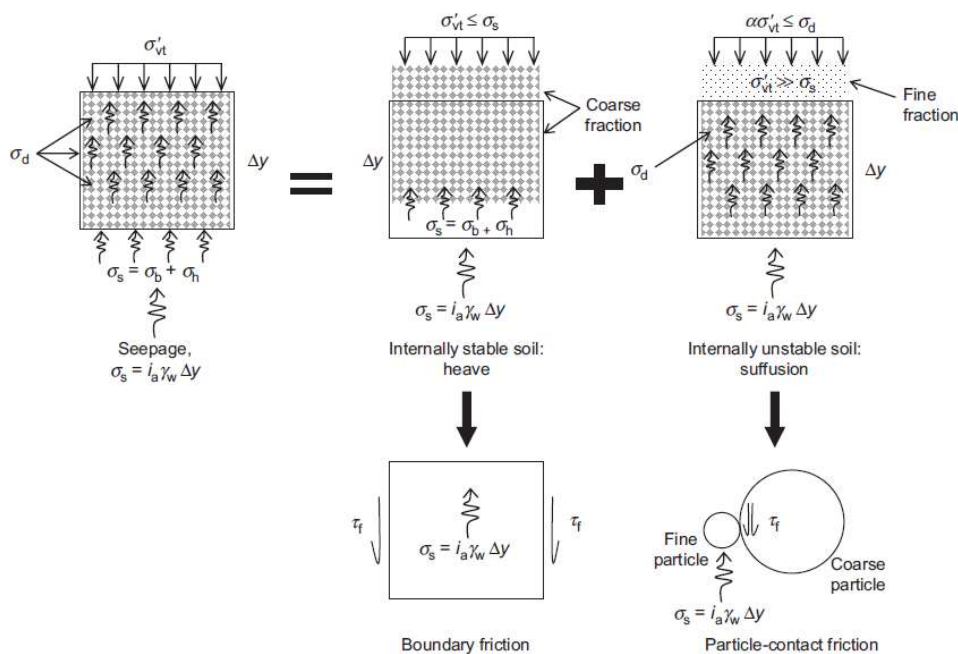


Abb. 78 Versagensmechanismen Hebung und Suffusion (Indraratna et al 2018)

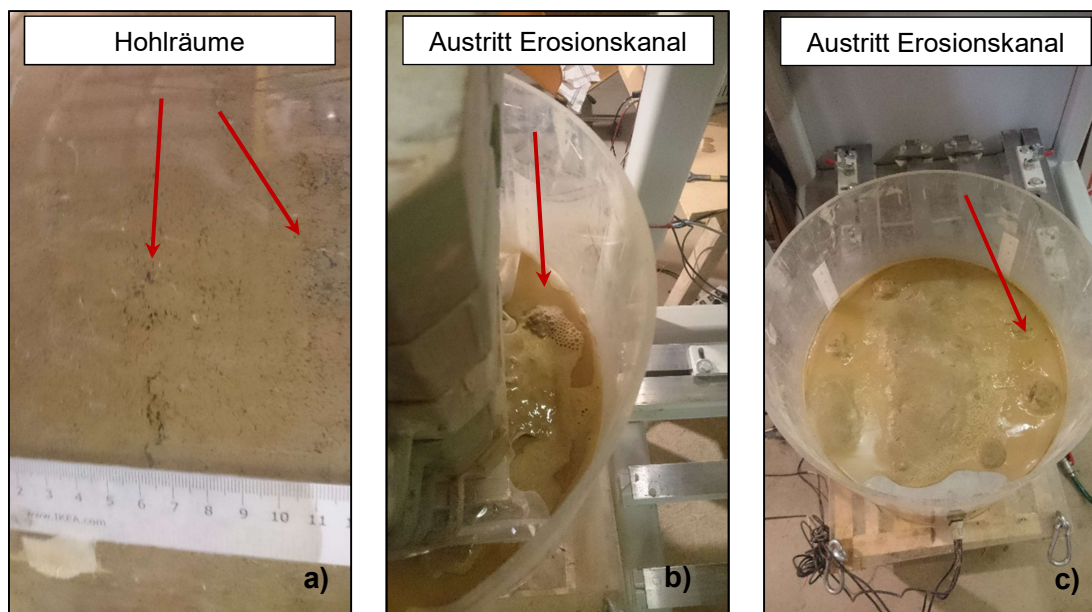


Abb. 79 Schadensbilder SV 1.6_2-A

Die weit gestufte Kornverteilung von „Boden 2“ spricht gegen ein alleiniges Auftreten von Suffusion. Die Probe versagte wahrscheinlich durch ein Zusammenwirken mehrerer Faktoren. Die geringe Trockendichte verursacht ein instabiles Korngerüst im Inneren der Bodenprobe. Durch den Wasserdruck bildet sich ein großer Erosionskanal und verdrängt Feinanteile. Sobald der Erosionskanal an der Oberfläche durchschlägt, werden Feinanteile ausgespült und die Probe versagt. In Abb. 79 a) sind große Porenräume, welche durch die geringe Trockendichte bedingt sind, zu erkennen. Die Fotos in Abb. 79 b) und c) veranschaulichen den Austrag von Feinanteilen aus dem Boden.

6.3.3 Ergebnisse SV 1.6_2-B

Auch in einem 2. Versuch mit „Boden 2“ und der Trockendichte $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ versagte die Probe. Diesmal sollte der Prüfzylinder im Versuchsstand gesättigt werden. Wie im ersten Versuch hat sich in der Probenmitte ein Erosionskanal an die Oberfläche durchgeschlagen und Material ausgeschwemmt. In Abb. 80 a) ist der Versuchszylinder mit der Gleisschotterplatte und dem verschmutzten Wasser an der Oberfläche zu sehen. Über der Bodenoberkante ist ca. 5 cm verschmutztes Wasser ausgetreten. Am Rand waren keine Anzeichen eines Versagens ersichtlich. Jedoch zeigt Abb. 80 b) größerer Hohlräume an der Zylinderwand. Dies ist ein Anzeichen für eine schlechte, bzw. zu lockere Verdichtung.

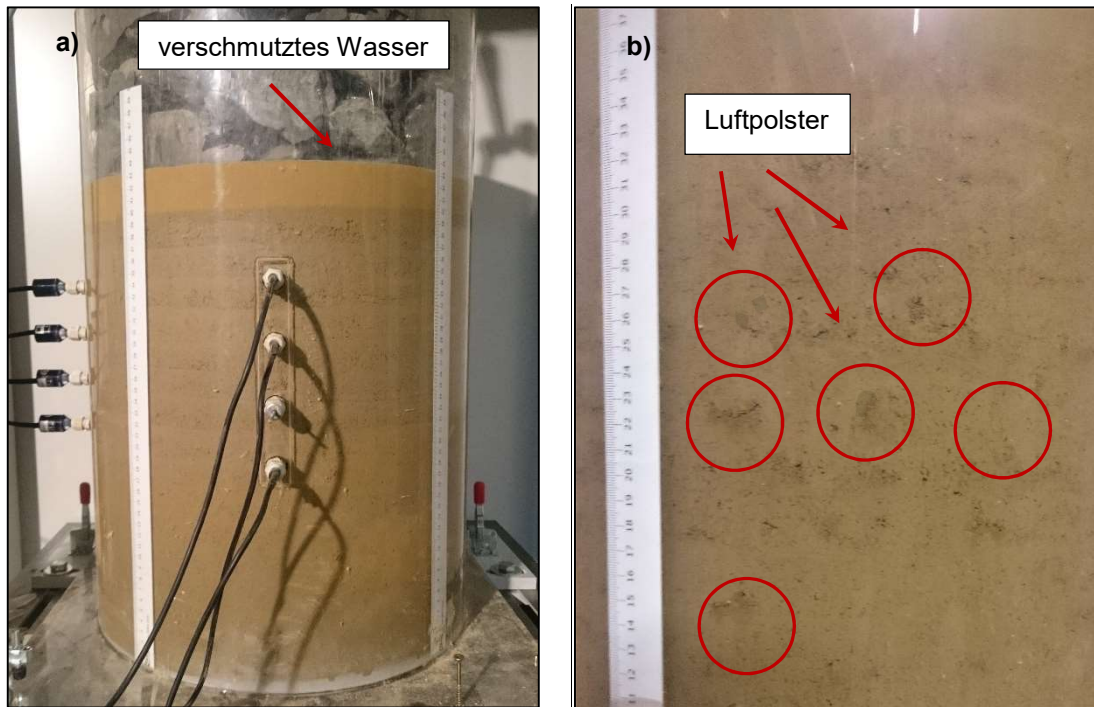


Abb. 80 Versagensbilder SV 1.6_2-B

6.3.4 Ergebnisse SV 1.6_3

„Boden 3“ wurde in diesem Versuch mit $w_{opt} = 11 \%$ und $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0,69$) eingebaut. Die beiden Sensoreingänge auf Höhe 40 cm blieben unbelegt. Wie SV 1.6_3 ist auch diese Probe vor dem Sättigen mit einer kontinuierlichen Laststeigerung von 0 – 15 kPa beansprucht worden („A“). Die TDR Sonden haben keine Auswirkungen dieser Auflast aufgezeichnet. Sie starteten mit einem Sättigungsgrad um 50 % und endeten nach der Wasserzugabe mit TDR 1 = 72,4 %, TDR 2 = 71,6 %, TDR 3 = 74,8 % (siehe Abb. 81).

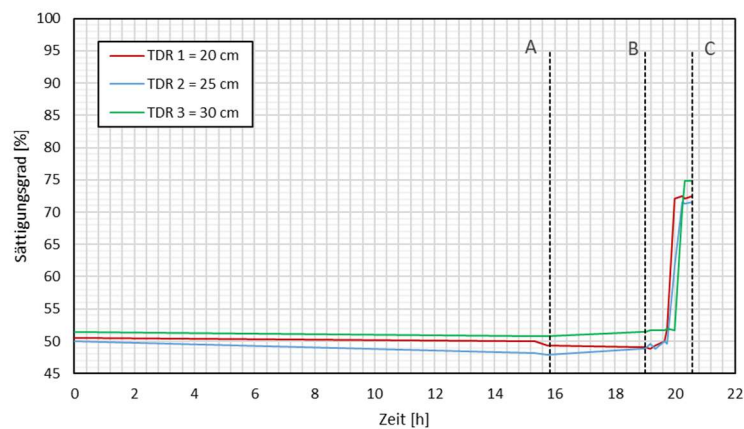


Abb. 81 Verlauf der TDR-Messungen für SV 1.6_3

Die Tensiometer-Messungen wurden erst nach der monotonen Laststeigerung gestartet. Die Saugspannungen stellten sich nach der Vorbelastung bis zur Wasserzugabe in Punkt „B“ auf einen kontinuierlichen Wert ein. Die Saugspannungen haben innerhalb weniger Minuten sehr stark abgenommen und sind rasch in den Druckbereich gewandert. Gleich nach dem Schließen der Wasserzufuhr haben sich die Tensiometer vom Durchströmungsdruck auf den hydrostatischen Wasserdruck eingestellt. Die Messung wurde daraufhin beendet, da sofort im Anschluss ein dynamischer Belastungsversuch folgte (siehe Abb. 82).

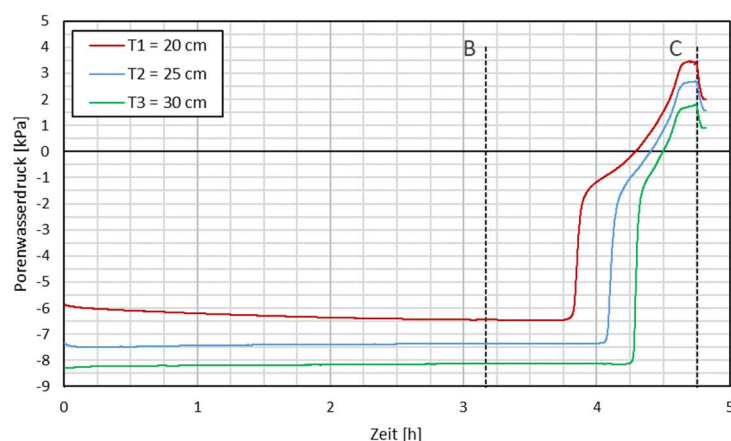


Abb. 82 Verlauf der Tensiometer-Messungen für SV 1.6_3

6.4 Diskussion der Ergebnisse aus der Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$

Der Sättigungsgrad der beiden durchgeführten Versuche ist mit 71 % bis 72 % deutlich unter den Werten der Versuchsreihe mit $\rho_d = 1,70 \text{ g/cm}^3$ (81 – 85 %). Durch die geringere Trockendichte erhöht sich das Porenvolumen. Für einen gleich hohen Sättigungsgrad müsste eine größere Wassermenge in die Bodenprobe fließen. Die Böden hatten bei Versuchsende aber die gleiche absolute Wassermenge enthalten. Die Auswertungen belegen, dass bei einer Zunahme des Porenvolumens dieses nicht leichter mit Wasser gefüllt wird. Im Gegenteil fließt das Wasser in den größten Porenkanälen durch die Bodenprobe, wobei kleinere Poren ungesättigt bleiben. Daraus resultiert der verhältnismäßig niedrige Sättigungsgrad.

In der kontinuierlichen Laststeigerung im teilgesättigten Zustand handelt es sich um einen Vorversuch für eine spätere dynamische Belastung. Sie ist auch notwendig, um die Kontaktflächen zwischen Gleisschotterplatte und Unterboden zu erhöhen. Somit wird verhindert, dass ein Versagen durch Hebung eintritt, wenn sich der Boden durch die nach oben wirkende Wasserlast in die Gleisschotterplatte drückt. Durch diese Vorbelastung wurde keine Änderung der Trockendichte aufgezeichnet. Wegen der

weiterführenden Versuche, welche nicht Teil dieser Arbeit sind, konnten für diese Versuchsreihe keine Wassergehaltsbestimmungen beim Materialausbau durchgeführt werden.

Die Sättigungsversuche mit „Boden 2“ sind aufgrund von Versagen der Bodenprobe fehlgeschlagen. Grund dafür war eine Kombination aus Hebung und Suffusion (Indraratna et al 2018). Bedingt durch die geringe Einbaudichte konnten sich Erosionskanäle bis an die Probenoberfläche durchschlagen und Feinanteile auswaschen. Generell ist zu überdenken, ob die Trockendichte $\rho_d = 1,60 \text{ g/cm}^3$ bei diesem hydraulischen Gradienten nicht zu gering für repräsentative Ergebnisse ist. Bei den fehlgeschlagenen Versuchen waren am Zylinderrand immer vereinzelte Hohlräume zu sehen. Diese müssten mit einem höheren Verdichtungsgrad geschlossen werden.

Beim schichtweisen Ausbau der gesättigten Böden war teilweise erkennbar, dass die Sättigung nicht komplett gleichmäßig über den Zylinderquerschnitt erfolgte. Obwohl der Boden optisch homogen eingebaut wurde, waren unterschiedliche Bereiche des Versuchszylinders stärker gesättigt als andere. Teilweise konnte der Zylinderquerschnitt regelrecht in einen gesättigten (Bodenmaterial sehr aufgeweicht, leichtes Eindringen mit dem Finger) und einen nicht gesättigten Bereich (kein Eindringen mit dem Finger möglich) unterteilt werden. Solche besser bzw. schlechter gesättigte „Polster“ wurden vermehrt beim Materialausbau angefundnen (siehe Abb. 83).

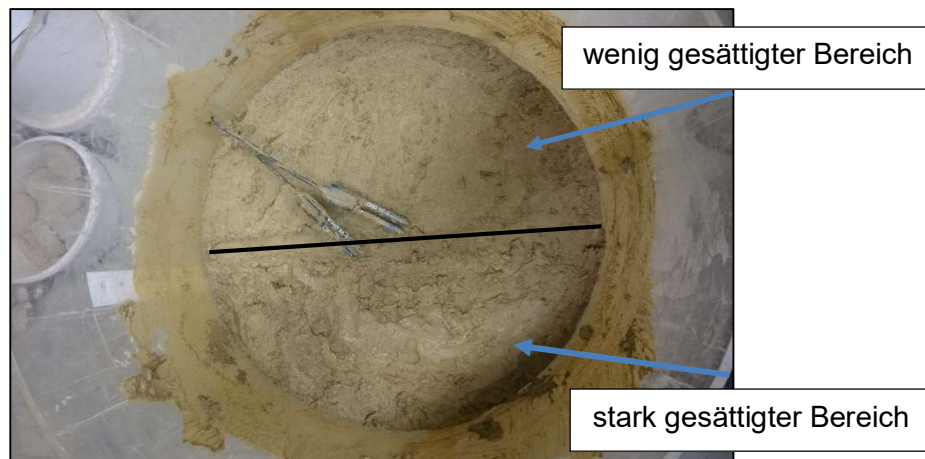


Abb. 83 Boden 1, Unterschiedlicher Wassergehalt beim Materialausbau

6.5 Sättigungsversuche mit $\rho_d = 1,50 \text{ g/cm}^3$

Mit dieser Trockendichte wurde mit „Boden 1“ und „Boden 3“ Versuche durchgeführt. Beide Male hat der Probenkörper versagt. Abb. 84 zeigt die Entwicklung eines Erosionskanals am Zylinderrand. Der Kanal startete vorne am Zylinderboden und hat

sich nach rechts zur Hinterseite des Zylinders entwickelt. Dort ist er nach oben gewandert und ist an der Oberfläche ausgetreten. Das lockere Korngerüst ermöglichte schnell die Ausbreitung des Erosionskanals auf eine Breite von mehreren Zentimeter. Dies macht sich im starken Materialtransport nach oben bemerkbar. Der Ausbau des Bodens zeigte, dass der gegenüberliegende Bereich kaum mit Wasser gesättigt war. Das gesamte Wasser ist durch diesen Erosionskanal nach oben geflossen.

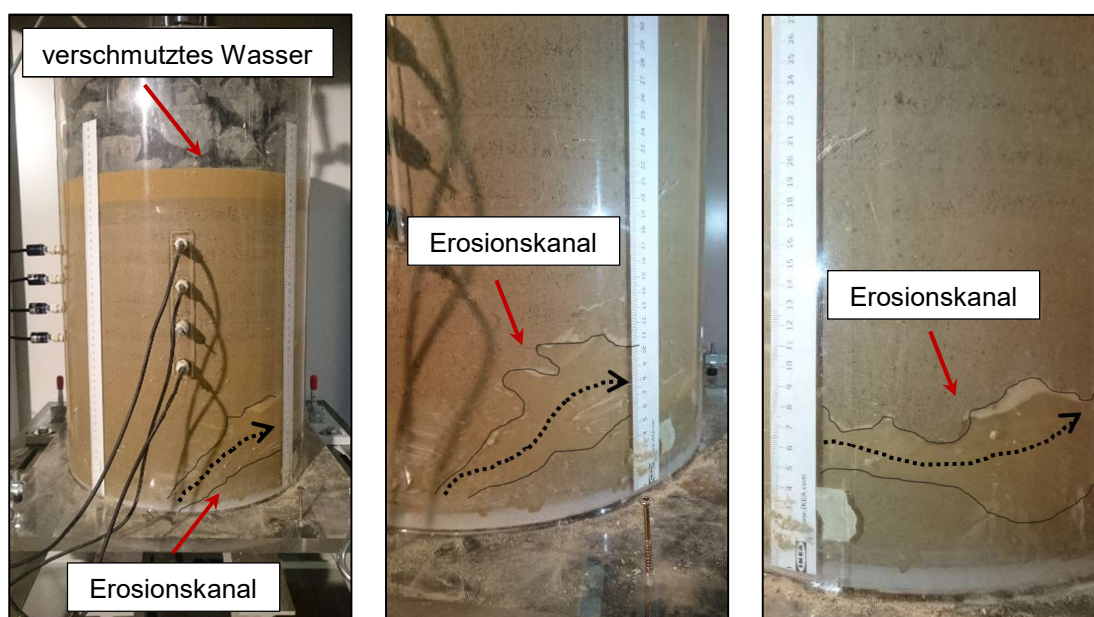


Abb. 84 Versagensbilder SV 1.5_1

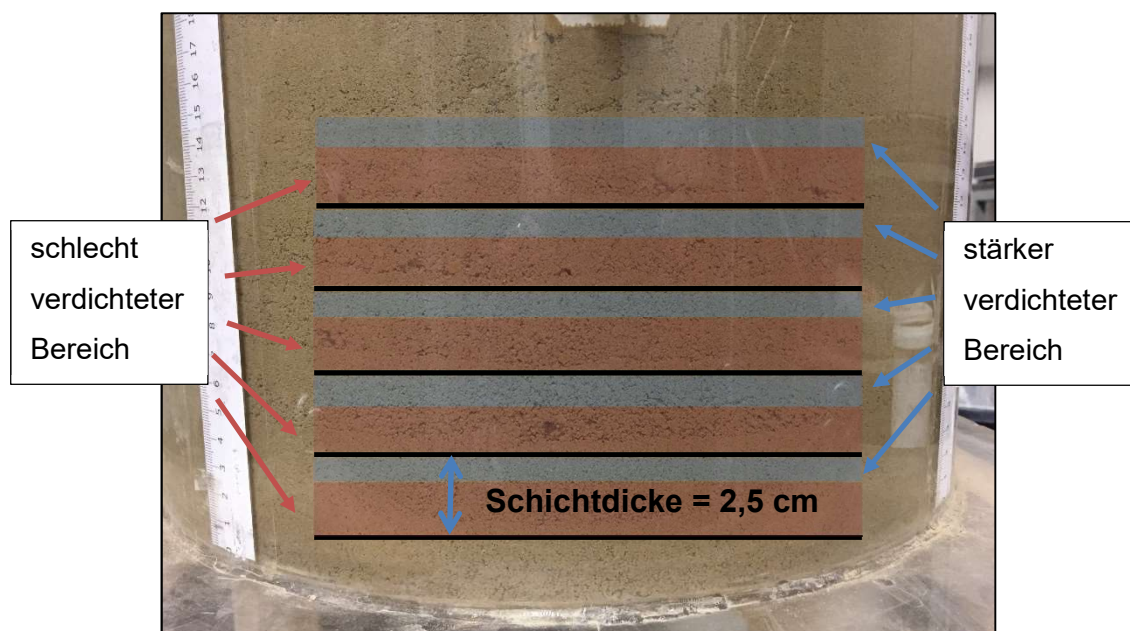


Abb. 85 Schichtung bei Trockendichte $\rho_d = 1,50 \text{ g/cm}^3$

Für eine repräsentative Versuchsdurchführung ist die Trockendichte bei diesem hydraulischen Gradienten zu gering. Bei einer Schichtdicke von 2,5 cm wird die Schicht ungleichmäßig stark verdichtet (siehe Abb. 85) Die Körner im oberen Bereich werden stärker zusammengepresst, wohingegen die untere Hälfte des Schichtpakets sehr große Porenräume aufweist. Mit dieser Verdichtungsmethode können keine gleichen Ausgangsbedingungen für die Versuchsreihen gewährleistet werden. Aufgrund dieses ungleichmäßigen Einbaus und der Tatsache, dass „Boden 1“ und „Boden 2“ mit dieser Einbaudichte fehlgeschlagen sind, wurden die Versuchsreihen mit $\rho_d = 1,50 \text{ g/cm}^3$ nicht weiter fortgesetzt.

6.6 Darstellung der Ergebnisse

Die Eingangsparameter und die gemessenen Sättigungsgrade der einzelnen TDR Sonden sind in Tab. 10 aufgelistet. Aus den TDR-Messungen wurde für jeden Versuch der Mittelwert des Sättigungsgrades $S_{r,\emptyset}$ [%] gebildet. Durch den Ausfall eines TDR Sensors blieb in den meisten Versuchen ein Sensoreingang unbelegt.

Tab. 10 Zusammenstellung der erreichten Sättigungsgrade

Versuch	ρ_d	w_{start}	e	n	S_r	S_r	S_r	S_r	$S_{r,\emptyset}$
	[g/cm ³]	[%]	[-]	[-]	TDR 1 [%]	TDR 2 [%]	TDR 3 [%]	TDR 4 [%]	
SV 1.7_1-A	1,73	14,0	0,61	0,38	86,0	83,2	83,8	85,7	84,7
SV 1.7_1-B	1,72	14,0	0,62	0,38	81,3	-	80,3	84,1	81,9
SV 1.7_2-A	1,73	14,0	0,59	0,37	87,8	87,8	85,9	88,5	87,5
SV 1.7_2-B	1,73	14,0	0,58	0,37	86,2	-	86,2	88,8	87,1
SV 1.7_3-A	1,70	11,0	0,59	0,37	77,4	-	79,7	87,1	81,4
SV 1.7_3-B	1,70	11,0	0,59	0,37	82,9	-	81,9	84,8	83,2
SV 1.6_1	1,63	13,5	0,71	0,40	71,3	70,4	73,6	-	71,7
SV 1.6_3	1,60	11,0	0,69	0,41	-	72,4	71,6	74,8	72,9

Der schlussendliche Sättigungsgrad aus jedem Versuch in einem Balkendiagramm dargestellt (siehe Abb. 86). Die Versuchsreihen sind nach Bodenart zusammengefasst. Die Versuchsreihen mit Trockendichte $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ erreichten gemittelte Werte zwischen 81,4 % und 87,5 % Sättigung. „Boden 1“ und „Boden 3“ sättigten sich in den Versuchen mit $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$ auf 71,7 % und 72,7 %.

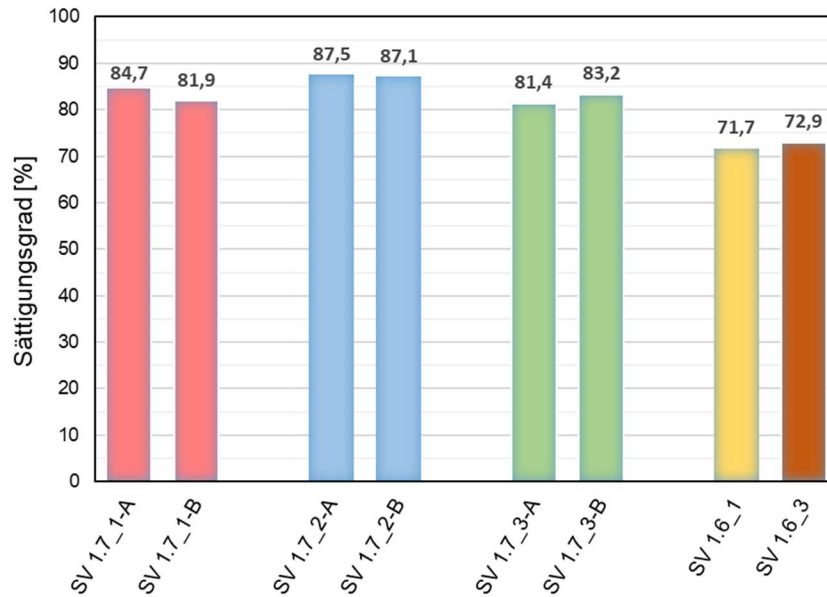


Abb. 86 Balkendiagramm der Endsättigungsgrade der Versuchsreihen

Die Verläufe für den Sättigungsvorgang sind in Abb. 87 veranschaulicht. Der Sättigungsgrad bei einer Saugspannung von 0 kPa entspricht jedoch nicht den letztendlichen Sättigungsgrad der Bodenprobe. SV 1.7_1 und SV 1.7_2 wurden mit demselben Wassergehalt und somit auch einem ähnlichen Sättigungsgrad durchgeführt. SV 1.7_3 startete mit einem niedrigeren Anfangssättigungsgrad. In den Versuchen SV 1.6_1 und SV 1.6_3 erfolgten nur TDR-Messungen vor der Sättigungsphase und im Druckbereich der Tensiometer. Deswegen sind keine Saugspannungen einer TDR-Messung zuordenbar und somit ist der Verlauf im Saugspannungsbereich zwischen Anfangs- und Endsättigungsgrad linear.

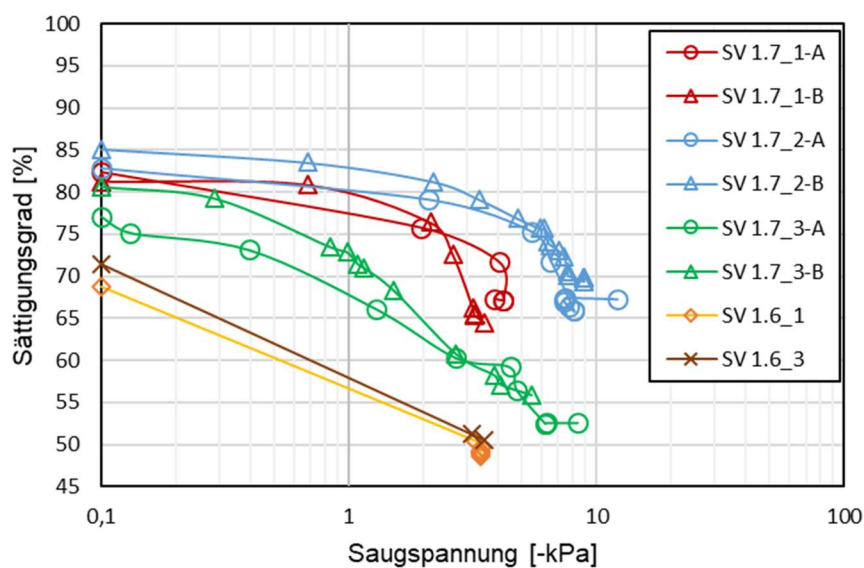


Abb. 87 Sättigungsverläufe der Bodenproben

7 Zusammenfassung

Diese Masterarbeit beschreibt das Sättigungsverhalten unterschiedlicher Unterböden in einem Großmodellversuch. Dabei handelt es sich um eine Vorstudie zum Forschungsprojekt „Mud Pumping“, welche die Entwicklung und Optimierung eines geeigneten Versuchsablaufes in Bezug auf den Sättigungsvorgang vorsieht. Die Versuche wurden daher mit Hinblick auf die weitere Forschung durchgeführt.

Es wurden drei künstlich gemischte Schluff/Sand Böden mit den Trockendichten $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$, $1,6 \text{ g/cm}^3$ und $1,7 \text{ g/cm}^3$ untersucht. Dementsprechend liefern die Versuchsergebnisse die Erkenntnis, dass eine höhere Einbaudichte in Korrelation mit einem höheren Sättigungsgrad steht. So erreichten die Versuche mit $\rho_d = 1,7 \text{ g/cm}^3$ eine Sättigung zwischen 82 – 88 %, wohingegen die geringere Trockendichte mit $\rho_d = 1,6 \text{ g/cm}^3$ Sättigungsgrade zwischen 71 – 74 % ergaben. Die Ergebnisse decken sich mit den Untersuchungen von Duong et al. (2014). In den Versuchen konnte eine nachhergehende Sättigung der oberen Bodenschicht nachgewiesen werden. Um einen Sättigungsgrad $> 90 \%$ zu erreichen, ist es wahrscheinlich notwendig die Bodenproben über einen längeren Zeitraum zu durchströmen. Dafür müsste jedoch der Versuchsaufbau modifiziert werden. Duong et al. (2013) haben diese Thematik in ihren Durchströmungsversuchen bearbeitet. In den Versuchsreihen mit der Trockendichte $\rho_d = 1,5 \text{ g/cm}^3$ konnten keine repräsentativen Ergebnisse ermittelt werden, da ungleiche Randbedingungen, ergeben durch ungleichmäßigen Materialeinbau, die Evidenz dieser Versuche verhinderten.

Die Versuchsböden wurden in einem Zeitraum von 2 – 3 h von Wasser durchströmt. Eine signifikante Abweichung in der Sättigungsdauer aufgrund der Kornverteilungen ist nicht erkennbar. Ebenfalls unterscheidet sich der letztendlich erreichte Sättigungsgrad nach Versuchsende sich zwischen den drei Versuchsböden um nur wenige Prozentpunkte. Der höchste Sättigungsgrad wurde in den Versuchen mit „Boden 2“ ermittelt. Größere Unterschiede, bedingt durch die verschiedenen Kornverteilungen, sind erst bei höherer Trockendichte zu erwarten. Eine Erhöhung der Trockendichte ρ_d führt zu einer Verringerung des Porenraumes. Dabei nehmen die gefügebedingten Makroporen überproportional zu den körnungsbedingten Mittel- und Feinporen ab. Das bedeutet, je dichter ein Boden eingebaut wird, desto eher wird das Sättigungsverhalten durch die Kornverteilung des Bodens beeinflusst. Dies müsste in einer weiteren Versuchsreihe mit einer Trockendichte $\rho_d > 1,7 \text{ g/cm}^3$ untersucht werden.

Die Bestimmung des Sättigungsgrades durch die in den Versuchen verwendete Messtechnik wurde mit den tatsächlichen Ergebnissen aus den Kontrollmessungen überprüft. Die Ermittlung der Wasserretentionskurve für den Bewässerungszustand konnte nur teilweise erfolgreich durchgeführt werden. Jedoch konnte der Hysterese-Effekt zwischen Be- und Entwässerung sehr gut dargestellt werden. Das Ausmaß der Hysterese ist sehr stark von der Kornverteilung des Bodens abhängig. Das manuelle Ablesen der TDR Sonden erwies sich hierbei als Fehlerquelle und kann sehr leicht zu ungenauen Kurvenverläufen führen. Ein Verbesserungsvorschlag ist hier die Datenaufzeichnungen der TDR Sonden an einen weiteren Datalogger anzuschließen und somit eine bessere Annäherung an die Wasserretentionskurve für den Bewässerungsvorgang zu erzielen. Mit dem exakt gleichen Zeitstempel der Datenaufzeichnungen ergibt sich eine genauere Zuordnung von Wassergehalt und Saugspannung. In diesem niedrigen Saugspannungsbereich können aber auch schon die Messungengenauigkeit der Sensoren großen Einfluss ausüben. Ob sich mit solch einem Versuch eine genaue Wasserretentionskurve für diesen Bereich sehr niedriger Saugspannungen erstellen lässt, müssen weitere Untersuchungen klären, denn auch im Hyprop Versuch ist dieser Bereich nicht exakt zu definieren.

Eine Ermittlung des Sättigungsgrades über die Saugspannung ist ohnehin nicht genau möglich, da die Wasserretentionskurve nur bis zu einer Saugspannung von 0 kPa läuft. Im Bewässerungsvorgang entspricht dies jedoch nicht der endgültigen Sättigung der Bodenprobe. Eine nachhergehende Sättigung kann mit dieser Methode nicht mehr erfasst werden, da die Tensiometer nur mehr hydrostatischen Wasserdruck im Druckbereich anzeigen, sobald die Keramikspitze vom Grundwasserspiegel in der Bodenprobe erfasst wird. Daher ist eine Wassergehaltsermittlung mittels der EC-5 TDR Sensoren notwendig, um auf die Sättigung zu schließen. Der Sättigungsgrad bezieht sich jedoch immer nur auf einen gemessenen Punkt in der Bodenprobe. Der Materialausbau ließ erkennen, dass sich stärker und weniger gesättigte Bereiche im Versuchszylinder bilden.

Die Erkenntnisse aus den durchgeführten Versuchen bilden eine gute Basis auf denen weiterführende Forschungsversuche aufgebaut werden können. Die anfänglichen Probleme mit der Messtechnik konnten gelöst werden, sodass sie ohne weiteres in diesem Versuchsaufbau für anschließende Versuche eingesetzt werden kann.

8 Literatur

Boley (2012)

Handbuch Geotechnik: Grundlagen - Anwendungen - Praxiserfahrungen.
Wiesbaden, Germany: Vieweg+Teubner Verlag

Duong TV, Cui Y-J, Tang AM, Dupla J-C, Canou J, Calon N und Robinet A (2014)

Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway sub-structure. *Engineering Geology* 171: 45–58

Duong TV, Trinh VN, Cui YJ, Tang AM und Calon N (2013)

Development of a Large-Scale Infiltration Column for Studying the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Fouled Ballast. *Geotech. Test. J.*

Indraratna et al (2018)

Inception of geohydraulic failures in granular soils – an experimental and theoretical treatment. *Géotechnique* 68: 233–248

Möller (2016)

Geotechnik: Bodenmechanik. Berlin, Germany: Wilhelm Ernst & Sohn

Mualem (1976)

A catalogue of the hydraulic properties of unsaturated soils

Prinz und Strauß (2011)

Ingenieurgeologie. Heidelberg, Germany: Spektrum Akademischer Verlag

Rost A (1978)

Messung dielektrischer Stoffeigenschaften. Vieweg Verlag, Braunschweig

Scheffer und Schachtschabel (2010)

Lehrbuch der Bodenkunde. Heidelberg, Germany: Spektrum Akademische Verlag

Schick (2002)

Die pF-Kurve bindiger Böden bei großen Wasserspannungen. *Bautechnik* 79: 842–849

Schindler (1980)

Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben. Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde 24

Shukla und Lal (2004)

Principles of Soil Physics. New York, USA: Marcel Dekker,

UMS EC-5 (2009)

Operator's Manual EC-5: UMS GmbH München, Gmunder Str. 37, 81379 München, Germany

UMS Hyprop (2015)

Bedienungsanleitung Hyprop: UMS GmbH München, Gmunder Str. 37, 81379 München, Germany

UMS T5 (2009)

Bedienungsanleitung T5/T5x Druckaufnehmer-Tensiometer: Meter Group AG, Mettlacher Straße 8, 81379 München, Germany

van Genuchten (1980)

Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils: Contribution from the U.S. Salinity Laboratory, Riverside, CA

Wind (1968)

Capillary conductivity Capillary conductivity data estimated by a simple method. Wageningen, Netherlands: Proc. UNESCO/IASH Symp.